BUDIDAYA TANAMAN PANGAN UTAMA

PENULIS :

- Almira Ulimaz
- Dewi Puspa Arisandi
- Syaifullah Rahim
- Purbokurniawan
- Jamilah
- Nandini Ayuningtias
- Emilia Farida Budi Handayani
- Rahmawati Ning Utami
- Baso Daeng
- Tiara Ayu Nugraha Putri
- Jeefry Andrian
- Christa Dyah Utami



ISBN 978-634-255-754-3

BUDIDAYA TANAMAN PANGAN UTAMA

Almira Ulimaz
Dewi Puspa Arisandi
Syaifullah Rahim
Purbokurniawan
Jamilah
Nandini Ayuningtias
Emilia Farida Budi Handayani
Rahmawati Ning Utami
Baso Daeng
Tiara Ayu Nugraha Putri
Jeefry Andrian
Christa Dyah Utami

GET PRESS INDONESIA

BUDIDAYA TANAMAN PANGAN UTAMA

Penulis :
Almira Ulimaz
Dewi Puspa Arisandi
Syaifullah Rahim
Purbokurniawan
Jamilah
Nandini Ayuningtias
Emilia Farida Budi Handayani
Rahmawati Ning Utami
Baso Daeng
Tiara Ayu Nugraha Putri
Jeefry Andrian
Christa Dyah Utami

ISBN : 978-634-255-756-3

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

Penerbit : GET PRESS INDONESIA
Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Redaksi :
Jln. Palarik Air Pacah No 26 Kel. Air Pacah
Kec. Koto Tangah Kota Padang Sumatera Barat
Website : www. getpress.co.id
Email : adm.getpress@gmail.com

Cetakan pertama, September 2026

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

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur atas kehadirat Allah SWT dalam segala kesempatan. Sholawat beriring salam dan doa kita sampaikan kepada Nabi Muhammad SAW. Alhamdulillah atas Rahmat dan Karunia-Nya penulis telah menyelesaikan Buku Budidaya Tanaman Pangan Utama ini.

Buku Ini Membahas : Pengantar Budidaya Tanaman Pangan Utama, Prinsip Dasar Budidaya Tanaman Pangan, Budidaya Padi, Budidaya Jagung, Pengelolaan Tanah dalam Budidaya Tanaman Pangan, Pengendalian Hama dan Penyakit Tanaman Pangan, Irigasi dan Manajemen Air dalam Budidaya Tanaman Pangan, Penggunaan Teknologi dalam Budidaya Tanaman Pangan, Budidaya Tanaman Pangan Berkelanjutan, Pengembangan Varietas Tanaman Pangan Unggul, Dampak Perubahan Iklim terhadap Budidaya Tanaman Pangan, Peluang dan Tantangan Budidaya Tanaman Pangan di Masa Depan.

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

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

Padang, Juli 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **ii**
DAFTAR TABEL ..... **xv**
DAFTAR GAMBAR ..... **xvi**
BAB 1 PENGANTAR BUDIDAYA TANAMAN PANGAN **1**
1.1 Konsep Dasar Budidaya Tanaman Pangan 3
1.1.1 Pengertian dan Ruang Lingkup Budidaya Tanaman Pangan 3
1.1.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produksi Tanaman Pangan 3
1.1.3 Sistem Pertanaman dan Intensifikasi 4
1.2 Budidaya Padi (*Oryza Sativa L.*) 5
1.2.1 Botani dan Ekologi Padi 5
1.2.2 Syarat Tumbuh dan Pemilihan Varietas 6
1.2.3 Teknik Budidaya Padi Sawah 6
1.2.4 Panen dan Produktivitas 7
1.3 Budidaya Jagung (*Zea Mays L.*) 8
1.3.1 Karakteristik Botani Jagung 8
1.3.2 Persyaratan Ekologi dan Pemilihan Varietas 8
1.3.3 Teknik Budidaya Jagung 9
1.3.4 Panen Jagung 10
1.4 Budidaya Kedelai (*Glycine max (L.) Merr.*) 10
1.4.1 Arti Penting dan Karakteristik Kedelai 10
1.4.2 Syarat Tumbuh dan Pemilihan Varietas 11
1.4.3 Teknik Budidaya Kedelai 11
1.5 Budidaya Ubi Kayu (*Manihot esculenta Crantz*) 12
1.5.1 Peran dan Karakteristik Ubi Kayu 12
1.5.2 Teknik Budidaya Ubi Kayu 13
1.6 Budidaya Ubi Jalar (*Ipomoea batatas (L.) Lam.*) 14
1.6.1 Nilai Gizi dan Potensi Ubi Jalar 14
1.6.2 Teknik Budidaya Ubi Jalar 14
1.7 Pengelolaan Organisme Pengganggu Tanaman 15
1.7.1 Konsep Pengelolaan Hama Terpadu 15
1.7.2 Hama dan Penyakit Utama Tanaman Pangan 16
1.7.3 Pengelolaan Gulma 17

1.8 Pascapanen Dan Teknologi Pengolahan 17
1.8.1 Pentingnya Penanganan Pascapanen 17
1.8.2 Teknologi Pengeringan dan Penyimpanan 18
1.8.3 Pengolahan Primer dan Sekunder 18
1.9 Inovasi Dan Tantangan Masa Depan 19
1.9.1 Pemuliaan Tanaman dan Bioteknologi 19
1.9.2 Pertanian Presisi dan Digitalisasi 20
1.9.3 Perubahan Iklim dan Adaptasi Pertanian 20
1.9.4 Ketahanan Pangan dan Gizi 21
1.10 Teknologi Budidaya Terkini Dan Penerapannya 21
1.10.1 Teknologi Jajar Legowo pada Budidaya Padi 21
1.10.2 Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT) 23
1.10.3 Pertanian Organik dalam Budidaya Tanaman Pangan 23
1.11 Aspek Ekonomi, Sosial, Dan Kelembagaan Budidaya Tanaman Pangan 24
1.11.1 Analisis Usahatani Tanaman Pangan 24
1.11.2 Rantai Nilai dan Pemasaran Tanaman Pangan 25
1.11.3 Peran Penyuluhan Pertanian dalam Diseminasi Teknologi 26
1.14 Kebijakan Pertanian Dan Program Swasembada Pangan Indonesia 27
1.14.1 Kebijakan Pertanian Pangan di Indonesia 27
1.14.2 Swasembada Beras dan Ketahanan Pangan Nasional 28
1.14.3 Diversifikasi Pangan dan Pengurangan Ketergantungan pada Beras 29
1.12 Studi Kasus Keberhasilan Budidaya Tanaman Pangan Di Indonesia 30
1.12.1 Pengembangan Kawasan Pertanian Pangan di Sumatera Selatan 30
1.12.2 Pengembangan Jagung di Nusa Tenggara Timur 30
1.12.3 Agribisnis Ubi Kayu Berbasis Industri di Lampung 31
1.13 Evaluasi Konsep Dasar Budidaya Tanaman Pangan Dan Relevansinya Bagi Ketahanan Pangan Indonesia 32

1.14 Analisis Kritis Teknik Budidaya Komoditas Tanaman Pangan Utama 33
1.14.1 Budidaya Padi: Antara Tradisi, Inovasi, dan Keberlanjutan 33
1.14.2 Budidaya Jagung: Potensi dan Hambatan Menuju Swasembada 35
1.14.3 Budidaya Kedelai: Tantangan Struktural Menuju Kemandirian Pangan 36
1.14.4 Budidaya Ubi Kayu dan Ubi Jalar: Komoditas Lokal yang Perlu Direvitalisasi 37
1.15 Pengelolaan Opt Terpadu Dan Teknologi Pascapanen: Kunci Efisiensi Sistem Produksi 38
1.16 Inovasi Teknologi Pertanian Dan Implikasinya Bagi Masa Depan Budidaya Tanaman Pangan 40
1.16.1 Bioteknologi dan Pemuliaan Tanaman: Peluang dan Kontroversi 40
1.16.2 Pertanian Presisi dan Digitalisasi: Mewujudkan Pertanian Cerdas di Indonesia 41
1.16.3 Adaptasi Pertanian terhadap Perubahan Iklim: Urgensi dan Strategi 43
1.17 Dimensi Sosial-Ekonomi Dan Kelembagaan: Membangun Ekosistem Pertanian Yang Tangguh 44
1.17.1 Profil Petani Indonesia dan Tantangan Regenerasi Pertanian 44
1.17.2 Akses Pembiayaan dan Asuransi Pertanian 45
1.17.3 Pengembangan Rantai Nilai dan Nilai Tambah Tanaman Pangan 46
1.18 Pertanian Berkelanjutan Dan Kerangka Kebijakan Nasional 47
1.18.1 Pertanian Organik: Prospek dan Tantangan di Indonesia 47
1.18.2 Kebijakan Pangan Nasional dan Implikasinya bagi Budidaya Tanaman Pangan 48
1.19 Ketahanan Pangan, Gizi, Dan Transformasi Sistem Pangan Berkelanjutan 49

1.20 Sintesis Pembahasan: Menuju Sistem Budidaya Tanaman Pangan Yang Produktif, Berkelanjutan, Dan Inklusif 51
1.21 Penutup 54
DAFTAR PUSTAKA 56
BAB 2 PRINSIP DASAR BUDIDAYA TANAMAN PANGAN DENGAN PENDEKATAN SUSTAINABLE AGRICULTURE 65
2.1 Konsep Sustainable Agriculture 67
2.1.1 Aspek Lingkungan (*Environmental Sustainability*) . 67
2.1.2 Aspek Ekonomi (*Economic Sustainability)* 67
2.1.3 Aspek Sosial (*Social Sustainability*) 68
2.2 Karakteristik Tanaman Pangan 68
2.2.1 Tanaman Serealia 69
2.2.2 Tanaman Kacang-kacangan (Legum) 69
2.2.3 Tanaman Umbi-umbian 69
2.3 Pengelolaan Lahan Berkelanjutan 69
2.3.1 Krakteristik dan Kesuburan Tanah 70
2.3.3 Pengolohan Tanah yang Ramah Lingkungan 73
2.4 Pengelolaan Benih dan Varietas Unggul 76
2.4.1 Karakteristik Benih Bermutu 77
2.4.2 Varietas Unggul dan Perannya dalam Pertanian Berkelanjutan 78
2.4.3 Benih Lokal dan Pelestarian Sumber Daya Genetik 78
2.5 Pengelolaan Nutrisi Tanaman Secara Berkelanjutan 79
2.5.1 Peran Unsur Hara Bagi Tanaman 80
2.5.2 Konsep Pemupukan Berimbang 81
2.5.3 Peran Bahan Organik sebagai Nutrisi Tanaman 82
2.5.4 Integrasi Pupuk Organik dan Anorganik 82
2.6 Pengelolaan Air 83
2.7 Pengelolaan OPT Secara Berkelanjutan 85
2.7.1 OPT dalam Budidaya Tanaman Pangan 86
2.7.2 Konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT) 87
2.7.3 Pengendalian Hayati dan Pelestarian Musuh Alami 88
2.7.4 Penggunaan Pestisida secara Bijaksana 88
2.8 Inovasi Teknologi dalam Budidaya Tanaman Pangan Berkelanjutan 89

2.8.1 Peran Teknologi dan Inovasi dalam Pertanian Berkelanjutan....90
DAFTAR PUSTAKA....92
BAB 3 BUDIDAYA PADI....97
3.1 Syarat Tumbuh dan Persiapan Benih....97
3.1.1 Karakteristik Botani dan Fase Pertumbuhan Padi....97
3.1.2 Syarat Tumbuh (Agroklimat dan Tanah)....98
3.1.3 Pemilihan Varietas Unggul....99
3.1.4 Pematahan Dormansi dan Teknik Persemaian....101
3.2 Persiapan Lahan dan Penanaman....102
3.2.1 Teknik Pengolahan Tanah....102
3.2.2 Pola dan Metode Penanaman....103
3.3 Pemeliharaan dan Perlindungan Tanaman....105
3.3.1 Manajemen Pengairan....105
3.3.2 Pemupukan Berimbang....106
3.3.3 Pengendalian Hama Utama....107
3.3.4 Pengendalian Penyakit Utama....109
3.3.5 Manajemen Pengendalian Gulma....112
3.4 Panen, Pascapanen, dan Analisis Kelayakan....113
3.4.1 Kriteria Umur Panen dan Teknik Pemanenan....113
3.4.2 Penanganan Pascapanen dan Mutu Beras....114
3.4.3 Analisis Ekonomi Usaha Tani....115
DAFTAR PUSTAKA....117
BAB 4 BUDIDAYA JAGUNG....121
4.1 Botani Jagung....122
4.2 Syarat Tumbuh Jagung....123
4.2.1 Suhu....123
4.2.2 Intersitas cahaya matahari....123
4.2.3 Kelembaban udara....123
4.2.4 Sifat fisik tanah....124
4.2.5 Sifat kimia tanah....124
4.2.6 Sifat biologi tanah....124
4.3 Budidaya Jagung....125
4.3.1 Pemilihan varietas....125
4.3.2 Pengolahan tanah....125
4.3.3 Pengairan....125
4.3.4 Pemupukan....126

4.3.5 Pengendalian hama dan penyakit 128
4.3.6 Panen dan pascapanen 129
DAFTAR PUSTAKA 130
BAB 5 PENGELOLAAN TANAH DALAM BUDIDAYA TANAMAN PANGAN: INTEGRASI BIOCHAR, MIKORIZA, DAN PENGELOLAAN KESUBURAN TANAH BERKELANJUTAN PADA LAHAN MARGINAL 133
5.1 Karakteristik dan Permasalahan Tanah untuk Tanaman Pangan 134
5.1.1 Tanah Masam 134
5.1.2 Ultisol 135
5.1.3 Oxisol 137
5.1.4 Gambut Masam 138
5.1.5 Tanah Sawah intensif dengan Keterbatasan Hara .. 141
5.2 Rendahnya Bahan Organik sebagai Faktor Pembatas 145
5.3 Kemasaman Tanah dan Toksisitas Al serta Fe 147
5.4 Fiksasi Fosfor dan Strategi Peningkatan Ketersediaan P 147
5.5 Penggunaan Bakteri Pelarut Fosfat (PSB) 149
5.6 Inokulasi Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) 152
5.6.1 Fungsi CMA bagi Tanaman 155
5.6.2 Tanaman yang Bersimbiosis dengan CMA 155
5.6.3 Peranan CMA di Pertanian 155
5.6.4 Teknik Isolasi Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) dari Tanah 156
5.7 Identifikasi Genus CMA 159
5.7.1 Faktor yang Mempengaruhi Jumlah Spora CMA 159
5.7.2 Kendala dalam Isolasi CMA 159
5.8 Pengembangan Teknik Isolasi Modern 159
5.8.1 Teknik Molekuler: PCR dan DNA Barcoding 159
5.8.2 Digital Imaging: Identifikasi Berbasis Citra 160
5.8.3 Trap Culture: Perbanyakan CMA Menggunakan Tanaman Inang 161
5.9 Aplikasi Biochar 162
5.10 Pemupukan Berimbang 162
5.11 Efisiensi Pemupukan pada Lahan Marginal 164
5.12 Peran Biochar dalam Pengelolaan Kesuburan Lahan Marginal 165

5.13 Rekomendasi 166
5.1.3.1 Pengembangan teknologi local dan pendekatan teknologi terpadu 166
5.14 Penutup 170
DAFTAR PUSTAKA 172
BAB 6 PENGENDALIAN HAMA DAN PENYAKIT TANAMAN 177
6.1 Konsep Dasar Pengendalian Hama Terpadu (HPT) 177
6.1.1 Filosofi dan Prinsip Ekologi PHT 177
6.1.2 Pengambilan Keputusan Berdasarkan Ambang Ekonomi 178
6.1.3 Metode PHT secara Fisik, Mekanis, dan Kultur Teknis 179
6.2 Hama Utama Tanaman Pangan dan Strategi Pengendaliannya 180
6.2.1 Hama Penggerek dan Pengisap Batang 180
6.2.2 Hama Pemakan Daun dan Polong 181
6.2.3 Hama Mamalia dan Rodensia (Tikus Sawah) 182
6.2.4 Hama Gudang dan Pascapanen 183
6.2.5 Teknik Pemantauan dan Pengamatan Populasi Hama 184
6.3 Penyakit Utama Tanaman Pangan dan Epidemiologinya 185
6.3.1 Penyakit Akibat Infeksi Cendawan (Jamur) 185
6.3.2 Penyakit Akibat Infeksi Bakteri 186
6.3.3 Penyakit Akibat Infeksi Virus dan Peran Serangga Vektor 187
6.3.4 Cekaman Abiotik dan Penyakit Fisiologis 188
6.4 Agen Pengendali Hayati dan Manajemen Pestisida Kimiawi 189
6.4.1 Eksploitasi Agen Pengendali Hayati (Bioremediasi) 190
6.4.2 Aplikasi Pestisida Kimiawi secara Bijaksana 191
DAFTAR PUSTAKA 193
BAB 7 IRIGASI DAN MANAJEMEN AIR DALAM BUDIDAYA TANAMAN PANGAN 197
7.1 Pengantar Irigasi Pertanian 197
7.1.1 Pengertian irigasi 197

7.1.2 Irigasi dan tantangan masa depan 198
7.2 Hubungan Tanah, Air, dan Tanaman 199
7.2.1 Tanah 200
7.2.2 Air 200
7.2.3 Tanaman 201
7.3 Klasifikasi Sistim Irigasi 201
7.3.1 Irigasi permukaan (*surface irrigation*) 201
7.3.2 Irigasi bawah permukaan (*subsurface irrigation*) 202
7.3.3 Irigasi sprinkler (*sprinkler irrigation*) 203
7.3.4 Irigasi Tetes 205
7.3.5 Sistem Irigasi Modern Lainnya 206
7.4 Kebutuhan Air Untuk Tanaman Padi, Palawija, Tebu, Sayuran, Rumput 208
7.4.1 Kebutuhan Air Tanaman (*Crop Water Requirement*) 209
7.4.2 Kebutuhan Air Irigasi 209
7.4.3 Faktor yang Memengaruhi Kebutuhan Air Tanaman 210
7.4.4 Parameter Analisis Kehilangan dan Kebutuhan Air 210
7.4.5 Analisis Kebutuhan Air 212
7.4.6 Tanaman Padi 212
7.4.7 Tanaman Palawija 214
7.4.8 Tanaman Tebu 215
7.4.9 Tanaman Sayuran 216
7.4.10 Tanaman Rumput 217
7.5 Manajemen Air Dan Efisiensi 217
7.5.1 Manajemen Air 217
7.5.2 Metode Distribusi Air Irigasi 218
7.5.3 Pola Tanam 219
7.5.4 Sistem Golongan dan Rotasi 220
DAFTAR PUSTAKA 222
BAB 8 PENGGUNAAN TEKNOLOGI DALAM BUDIDAYA TANAMAN PANGAN 223
8.1 Jenis dan Peran Teknologi dalam Budidaya Tanaman Pangan 225
8.1.1 Pengertian Teknologi Pertanian dalam Budidaya Tanaman Pangan 225

8.1.2 Perkembangan Teknologi Budidaya Tanaman Pangan Utama 226
8.1.3 Peran Teknologi dalam Meningkatkan Produktivitas, Efisiensi, dan Kualitas Hasil Panen 230
8.1.4 Modernisasi Pertanian di Era Globalisasi 231
8.2 Penerapan Teknologi pada Tahapan Budidaya Tanaman Pangan 232
8.2.1 Teknologi Pengolahan Lahan 232
8.2.2 Teknologi Benih Unggul dan Kultur Jaringan 233
8.2.3 Teknologi Pemupukan dan Irigasi Modern 234
8.2.4 Penggunaan Teknologi Pengendalian Hama dan Penyakit 235
8.2.5 Teknologi Panen dan Pascapanen 236
8.3 Manfaat, Tantangan, dan Pengembangan Teknologi Budidaya Tanaman Pangan 237
8.3.1 Manfaat Penggunaan Teknologi bagi Petani dan Ketahanan Pangan 237
8.3.2 Kendala Penerapan Teknologi 238
8.3.3 Dampak Teknologi terhadap Lingkungan dan Keberlanjutan Pertanian 240
8.3.4 Strategi Pengembangan Teknologi Pertanian Berkelanjutan di Masa Depan 241
DAFTAR PUSTAKA 242
BAB 9 BUDIDAYA TANAMAN PANGAN BERKELANJUTAN 247
9.1 Konsep dan Prinsip Budidaya Tanaman Pangan Berkelanjutan 247
9.2 Pendekatan Agroekologi dalam Budidaya Tanaman Pangan 249
9.3 Pengelolaan Sumber Daya Tanah Secara Berkelanjutan 253
9.4 Efisiensi Penggunaan Air dan Energi dalam Sistem Budidaya 255
9.5 Pengelolaan Hama dan Penyakit Ramah Lingkungan 259
9.6 Inovasi Teknologi untuk Pertanian Berkelanjutan 261
9.7 Aspek Sosial dan Ekonomi dalam Budidaya Berkelanjutan 264

9.8 Indikator, Evaluasi, dan Implementasi Sistem Pertanian Berkelanjutan 266
DAFTAR PUSTAKA 269
BAB 10 PENGEMBANGAN VARIETAS TANAMAN PANGAN UNGGUL 273
10.1 Pengantar dan Urgensi Varietas Unggul 273
10.2 Metode Pemuliaan Tanaman Pangan: Konvensional dan Modern 275
10.2.1 Pemuliaan Konvensional 275
10.2.2 Pemuliaan Modern 277
10.3 Prosedur Pengujian, Pelepasan, dan Sertifikasi Varietas 285
10.3.1 Pengujian Varietas 285
10.3.2 Prosedur Pelepasan Varietas 286
10.3.3 Sertifikasi Benih 287
10.4 Manajemen Plasma Nutfah dan Gene Bank 289
10.4.1 Plasma Nutfah Lokal sebagai Pool Genetik 289
10.4.2 Konservasi dan Pengelolaan Plasma Nutfah 290
10.5 Diseminasi dan Adopsi Varietas Unggul 290
10.5.1 Strategi dan Metode Diseminasi 290
10.5.2 Proses Adopsi Varietas Unggul 291
DAFTAR PUSTAKA 294
BAB 11 DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP BUDI DAYA TANAMAN PANGAN 297
11.1 Konsep Perubahan Iklim dan Sistem Pertanian 298
11.2 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produktivitas Tanaman Pangan 299
11.2.1 Peningkatan Suhu Udara 299
11.2.2 Perubahan Pola Curah Hujan 300
11.2.3 Peningkatan Frekuensi Cuaca Ekstrem 302
11.2.4 Dampak Terhadap Hama dan Penyakit Tanaman 303
11.3 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Tanaman Pangan Utama 305
11.3.1 Tanaman Padi 305
11.3.2 Tanaman Jagung 306
11.3.3 Tanaman Gandum 308
11.4 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Ketahanan

Pangan 309
11.5 Strategi Adaptasi Budi Daya Tanaman Pangan
Terhadap Perubahan Iklim 311
11.5.1 Penggunaan Varietas Toleran 312
11.5.2 Diversifikasi Tanaman 313
11.5.3 Pengelolaan Air yang Efisien 314
11.5.4 Pemanfaatan Teknologi Pertanian Modern 315
11.6 Prospek Pengembangan Sistem Pertanian
Tangguh Iklim 317
11.7 Kesimpulan 318
DAFTAR PUSTAKA 319
BAB 12 PELUANG DAN TANTANGAN BUDIDAYA TANAMAN PANGAN DI MASA DEPAN 325
12.1 Pengertian Budidaya Tanaman Pangan 326
12.2 Pengertian Budidaya Tanaman Pangan 326
12.3 Revolusi Pertanian 4.0 327
12.4 Digitalisasi Budidaya Tanaman Pangan 327
12.5 Dampak Transformasi Pertanian terhadap
Ketahanan Pangan 328
12.6 Tantangan Global Budidaya Tanaman Pangan
Di Masa Depan 329
12.6.1 Perubahan Iklim dan Ketidakpastian Produksi 329
12.6.2 Degradasi Lahan dan Krisis Sumber Daya Alam 329
12.6.3 Alih Fungsi Lahan Pertanian 330
12.6.4 Menurunnya Minat Generasi Muda terhadap
Pertanian 330
12.6.5 Ketergantungan terhadap Input Kimia 330
12.6.6 Ketidakstabilan Pasar dan Rantai Pasok 331
12.7 Peluang Inovasi Dan Teknologi Dalam Budidaya
Tanaman Pangan 331
12.7.1 Pengembangan Varietas Unggul 331
12.7.2 Pertanian Presisi 332
12.7.3 Smart Farming dan Internet of Things 332
12.7.4 Urban Farming dan Vertical Farming 332
12.7.5 Penguatan Agripreneurship 333
12.7.6 Big Data dan Artificial Intelligence 333
12.8 Pertanian Berkelanjutan Dan Ketahanan Pangan

Masa Depan 334
12.8.1 Konsep Pertanian Berkelanjutan 334
12.8.2 *Climate Smart Agriculture* (CSA) 334
12.8.3 Agroekologi dan Pertanian Organik 335
12.8.4 Efisiensi Energi dan Pertanian Rendah Karbon 335
12.8.5 Ketahanan Pangan dan Kemandirian Pangan 335
12.8.6 Peran Kebijakan dalam Pertanian Berkelanjutan . 336
12.9 Strategi Dan Arah Pengembangan Budidaya Tanaman Pangan Masa Depan 336
12.9.1 Penguatan Sumber Daya Manusia Pertanian 336
12.9.2 Integrasi Teknologi dan Kearifan Lokal 336
12.9.3 Penguatan Sistem Riset dan Inovasi 337
12.9.4 Penguatan Kelembagaan dan Kemitraan 337
12.9.5 Pengembangan Pertanian Berbasis Data 337
12.9.6 Prospek Budidaya Tanaman Pangan Masa Depan 338
12.9.7 Transformasi Digital dalam Penyuluhan Pertanian 338
12.9.8 Peran Pendidikan Tinggi dalam Transformasi Pertanian Masa Depan 339
12.9.9 Ketahanan Pangan Global dan Dinamika Geopolitik 340
12.9.10 Diversifikasi Pangan sebagai Strategi Masa Depan 341
12.10 Penutup 342
DAFTAR PUSTAKA 344
BIODATA PENULIS

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Dosis dan waktu pemupikan jagung.....127
Tabel 4.2. Gejala defisiensi hara tanaman jagung.....128
Tabel 5.1. Status hara tanah berdasarkan Hardjowigeno (1983) 142
Tabel 5.2. kadar C-organik dan Bahan Organik tanah mineral berdasarkan kategorinya.....147
Tabel 7.1. Hasil percobaan kebutuhan air tanaman padi di daerah 213
Tabel 7.2. Kebutuhan air beberapa tanaman palawija 214
Tabel 7.3. Perbandingan pemberian air tersebut di dasarkan tiga jenis tanaman padi sawah, tebu dan palawija di beberapa daerah.....215
Tabel 7.4. Kebutuhan Air Tanaman beberapa sayuran 216
Tabel 7.5. Pola Tanam Sawah dalam Satu Tahun 220
Tabel 10.1. Kelas dan Syarat Mutu Benih.....289

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1. Morfologi Tanaman Padi 97
Gambar 3.2. Sistem Jajar Legowo 104
Gambar 3.3. a. Wereng Coklat 107
Gambar 3.3. b. Penggerek Batang Padi 108
Gambar 3.3. c. Tikus Sawah 109
Gambar 3.4. a. Penyakit Blas pada Padi 110
Gambar 3.4. b. Hawar Daun Bakteri pada Padi 111
Gambar 3.4. c. Tungro 111
Gambar 5.1. Profil Ultisol yang memiliki sub horizon Bt 136
Gambar 5.2. Profil Oxisol 137
Gambar 5.3. Profil Tanah antara Oxisol dan Ultisol 138
Gambar 5.4. Profil Tanah Gambut (Histosol) 139
Gambar 5.5. Proses pembentukan tanah gambut di atas tanah mineral pada daerah cekungan atau lahan yang selalu tergenang air 140
Gambar 5.6. Sebaran tanah gambut di Indonesia 141
Gambar 5.7. Tanah sawah yang berada di Kecamatan Palembayan, Kabupaten Agam 144
Gambar 5.8. Landsekap tanah sawah dengan kondisi tanaman padi keracunan besi 145
Gambar 5.9. Profil tanah dengan kadar bahan organic mulai dari tinggi, sedang dan rendah 146
Gambar 5.10. Dampak Kemasaman Tanah terhadap Pertumbuhan Tanaman 148
Gambar 5.11. Khelat bahan organic terhadap Al dan Fe dan pembebasan Fosfat 148
Gambar 5.12. Penampakan Mikroskopis dan Struktur Flagela *Pseudomonas fluorescens* 149
Gambar 5.13. Mekanisme Biologis *P. fluorescens* dalam Mendukung Pertumbuhan Tanaman 151
Gambar 5.14. Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) atau *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) hidup bersimbiosis dengan akar tanaman. 153

Gambar 5.15. Simbiosis Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) atau *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dengan akar tanaman dalam membantu penyerapan unsur hara dan air. ..154
Gambar 5.16. Infeksi Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) pada akar padi sawah (pewarnaan *Tryphan Blue*) ..158
Gambar 5.17. Pembuatan biochar dari limbah sekam padi ..162
Gambar 5.18. Mekanisme serapan hara pada tanaman yang dilakukan melalui perakaran tanaman 164
Gambar 5.19. Teknologi Sawah Pokok Murah (SPM) pada Budidaya Padi Berkelanjutan ..167
Gambar 5.20. Pengurangan Pupuk Anorganik dengan AMF dan Biochar Bermuatan pada Sistem Budidaya Ratoon..168
Gambar 6.1. Hama Penggerek Batang ..181
Gambar 6.2. Kumbang Daun Kacang Polong (*Sitona lineatus*)..182
Gambar 6.3. Tikus Sawah..182
Gambar 6.4. Hama Gudang ..184
Gambar 6.5. Penyakit Blas Tanaman Padi ..185
Gambar 6.6. Hawar Daun Bakteri ..187
Gambar 6.7. Wereng Penular Tungro pada Padi ..188
Gambar 6.7. Pengaruh Salinitas pada Padi ..189
Gambar 7.1. Irigasi Sprinkler..204
Gambar 7.2. Irigasi tetes..206
Gambar 7.3. Bagan keseimbangan air pada petak sawah ..213
Gambar 9.1. Prinsip-Prinsip Budidaya Tanaman Pangan Berkelanjutan ..250
Gambar 9.2. Pengelolaan Tanah, Air, dan Energi Secara Berkelanjutan dalam Sistem Budidaya Tanaman Pangan ..258
Gambar 9.3. Inovasi Teknologi untuk Pertanian Berkelanjutan ..262

Gambar 10.1. Struktur promoter OsNAS2 dan mekanisme peningkatan akumulasi Zn pada biji padi IR64 282
Gambar 10.2. Analisis Genomik Pemuliaan Padi Pengembangan Beras Indeks Glikemik Rendah 284
Gambar 11.1. Skema dampak perubahan iklim terhadap dinamika hama dan penyakit tanaman. 304

BAB 1
PENGANTAR BUDIDAYA TANAMAN PANGAN

Ketahanan pangan merupakan salah satu pilar utama pembangunan berkelanjutan yang menjadi perhatian global. Menurut *Food and Agriculture Organization*, ketahanan pangan tercapai ketika semua orang, setiap saat, memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi untuk memenuhi kebutuhan dan preferensi pangan mereka demi kehidupan yang aktif dan sehat (Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, 2024). Tanaman pangan utama, yang meliputi serealia, legum, dan umbi-umbian, memainkan peran sentral dalam mewujudkan ketahanan pangan tersebut.

Indonesia sebagai negara agraris dengan luas lahan pertanian yang signifikan memiliki potensi besar dalam produksi tanaman pangan. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik, luas panen padi di Indonesia mencapai lebih dari 10 juta hektar per tahun, dengan produksi beras sekitar 31-33 juta ton (Dr. Kadarmanto, 2023). Namun demikian, tekanan populasi yang terus meningkat dan perubahan iklim yang semakin nyata memberikan tantangan serius terhadap keberlanjutan produksi pangan nasional (Surmaini, Runtunuwu and Las, 2015).

Tanaman pangan utama dapat dikategorikan berdasarkan kandungan gizi dominannya. Serealia seperti padi dan jagung merupakan sumber karbohidrat utama yang menjadi makanan pokok sebagian besar penduduk Asia dan Afrika. Legum, khususnya kedelai, merupakan sumber protein nabati yang sangat penting. Sementara itu, umbi-umbian seperti ubi kayu dan ubi jalar berperan sebagai sumber energi alternatif dan memiliki keunggulan dalam ketahanan terhadap kondisi lahan marginal (Howeler et al., 2013).

Budidaya tanaman pangan merupakan suatu sistem pertanian yang mencakup serangkaian kegiatan mulai dari pemilihan varietas, pengolahan tanah, penanaman, pemupukan, pengelolaan air, pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT), hingga pemanenan dan pascapanen. Setiap aspek dalam sistem budidaya ini saling berkaitan dan mempengaruhi produktivitas serta kualitas hasil panen. Pemahaman yang komprehensif tentang prinsip-prinsip budidaya menjadi kunci keberhasilan produksi tanaman pangan (Dobermann and Fairhurst, 2000).

Revolusi Hijau yang terjadi pada dekade 1960-an dan 1970-an telah membuktikan bahwa inovasi dalam budidaya tanaman pangan dapat mengubah lanskap produksi pangan secara dramatis. Pengembangan varietas unggul berdaya hasil tinggi, penggunaan pupuk kimia, dan perbaikan sistem irigasi berhasil melipatgandakan produksi padi dan jagung di berbagai negara berkembang, termasuk Indonesia (Pingali, 2012). Namun, pendekatan intensifikasi pertanian tersebut juga menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap lingkungan, seperti penurunan keanekaragaman hayati, degradasi lahan, dan pencemaran sumber daya air.

Paradigma pertanian modern kini bergeser menuju pendekatan yang lebih berkelanjutan. Konsep pertanian berkelanjutan atau sustainable agriculture menekankan pentingnya menjaga keseimbangan antara produktivitas ekonomi, kelestarian lingkungan, dan keadilan sosial (Pretty *et al.*, 2018). Dalam konteks budidaya tanaman pangan, hal ini berarti mengoptimalkan penggunaan input pertanian, meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, serta mempertahankan atau meningkatkan produktivitas dalam jangka panjang.

Bab ini ditulis bertujuan untuk memberikan tinjauan komprehensif mengenai prinsip-prinsip dan teknik budidaya tanaman pangan utama. Secara khusus, bab ini akan membahas:

1. Konsep dasar budidaya tanaman pangan
2. Teknik budidaya padi, jagung, kedelai, ubi kayu, dan ubi jalar
3. Pengelolaan organisme pengganggu tanaman
4. Teknologi pascapanen
5. Inovasi serta tantangan masa depan dalam budidaya tanaman pangan.

Dengan demikian, diharapkan bab ini dapat menjadi referensi yang berguna bagi mahasiswa, peneliti, dan praktisi pertanian.

1.1 Konsep Dasar Budidaya Tanaman Pangan

1.1.1 Pengertian dan Ruang Lingkup Budidaya Tanaman Pangan

Budidaya tanaman atau agronomi merupakan ilmu dan seni yang berhubungan dengan produksi tanaman. Kata agronomi berasal dari bahasa Yunani, yakni agros yang berarti lapangan atau lahan, dan nomos yang berarti pengelolaan atau hukum. Secara luas, agronomi mencakup semua aspek produksi tanaman, termasuk fisiologi tanaman, ekologi, genetika, dan teknik budidaya (Fageria, Baligar and Clark, 2006). Dalam konteks tanaman pangan, agronomi berfokus pada optimalisasi produksi tanaman yang menghasilkan bahan pangan bagi manusia.

Tanaman pangan dapat didefinisikan sebagai tanaman yang bagian-bagiannya dapat dikonsumsi oleh manusia dan menjadi sumber energi serta nutrisi. Berdasarkan klasifikasi FAO, tanaman pangan utama dibagi menjadi beberapa kelompok:

1. Serealia, meliputi padi, jagung, gandum, sorgum, dan jewawut
2. Akar dan umbi-umbian, meliputi ubi kayu, ubi jalar, kentang, dan talas
3. Kacang-kacangan, meliputi kedelai, kacang tanah, kacang hijau, dan kacang merah
4. Tanaman gula dan minyak (*The State of Food Security and Nutrition in the World 2022*, 2022).

1.1.2 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Produksi Tanaman Pangan

Produksi tanaman pangan dipengaruhi oleh berbagai faktor yang dapat dikategorikan menjadi faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal meliputi potensi genetik varietas yang ditanam, sementara faktor eksternal mencakup kondisi iklim, tanah, air, dan manajemen budidaya yang diterapkan (Fageria, Baligar and Clark, 2006).

Iklim merupakan faktor eksternal yang sangat berpengaruh terhadap produksi tanaman pangan. Unsur-unsur iklim yang paling berpengaruh meliputi suhu udara, curah hujan, intensitas dan durasi sinar matahari, serta kelembaban udara. Setiap tanaman pangan memiliki kisaran suhu optimal untuk pertumbuhan dan perkembangannya. Padi, misalnya, tumbuh optimal pada suhu 25-35°C, sementara jagung membutuhkan suhu antara 20-30°C (Yoshida, 1981). Perubahan iklim yang menyebabkan peningkatan suhu rata-rata global, perubahan pola curah hujan, dan peningkatan frekuensi kejadian cuaca ekstrem menjadi ancaman serius bagi produksi tanaman pangan (Lobell, Schlenker and Costa-Roberts, 2011).

Tanah merupakan media tumbuh tanaman yang menyediakan unsur hara, air, dan tempat bagi akar untuk berjangkar. Sifat-sifat tanah yang relevan dengan produksi tanaman pangan meliputi tekstur, struktur, pH, kapasitas tukar kation, kandungan bahan organik, dan ketersediaan unsur hara. Tanah yang ideal untuk budidaya tanaman pangan umumnya memiliki tekstur lempung berpasir hingga lempung liat, pH antara 5,5-7,0, kandungan bahan organik yang cukup, dan drainase yang baik (Hayes *et al.*, 2022). Degradasi lahan akibat erosi, pemadatan, dan penurunan kandungan bahan organik merupakan masalah serius yang mengancam keberlanjutan produksi pangan.

1.1.3 Sistem Pertanaman dan Intensifikasi

Sistem pertanaman (*cropping system*) mengacu pada pola penanaman satu atau lebih tanaman dalam suatu lahan selama periode tertentu. Sistem pertanaman yang umum diterapkan dalam budidaya tanaman pangan meliputi monokultur, tumpangsari (*intercropping*), rotasi tanaman, dan sistem pertanaman bertingkat (agroforestri). Pilihan sistem pertanaman dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk ketersediaan lahan, tenaga kerja, modal, kondisi iklim dan tanah, serta kebutuhan pasar (Willey R W, 1979).

Intensifikasi pertanian merupakan strategi untuk meningkatkan produktivitas lahan yang sudah ada melalui penggunaan input yang lebih baik, termasuk varietas unggul, pupuk, pestisida, dan teknologi irigasi. Intensifikasi Padi Maju (IPM) atau

System of Rice Intensification (SRI) merupakan salah satu contoh pendekatan intensifikasi yang berhasil meningkatkan produksi padi secara signifikan di berbagai negara dengan mengoptimalkan pengelolaan air, tanah, tanaman, dan nutrisi (Stoop, Uphoff and Kassam, 2002). Namun, intensifikasi yang tidak terencana dengan baik dapat menimbulkan dampak negatif seperti penurunan kualitas tanah dan pencemaran lingkungan.

Ekstensifikasi pertanian, yaitu perluasan lahan pertanian ke wilayah-wilayah baru, merupakan strategi lain untuk meningkatkan produksi pangan. Namun, peluang untuk ekstensifikasi semakin terbatas seiring dengan berkurangnya lahan yang tersedia dan meningkatnya tekanan terhadap kawasan hutan dan ekosistem alami. Oleh karena itu, intensifikasi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan menjadi pilihan yang lebih realistis untuk meningkatkan produksi pangan di masa depan (Tilman *et al.*, 2011).

1.2 Budidaya Padi (*Oryza Sativa* L.)

1.2.1 Botani dan Ekologi Padi

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan tanaman serealia yang termasuk dalam famili Poaceae (*Gramineae*). Tanaman ini bersifat annual atau setahun, dengan sistem perakaran serabut, batang berbentuk buluh berongga, dan daun berbentuk pita yang memanjang. Malai padi tersusun dari sejumlah spikelet yang masing-masing mengandung satu biji. Biji padi yang disebut gabah terdiri dari bagian lembaga (embrio), endosperma yang kaya karbohidrat, dan lapisan aleuron yang mengandung protein dan lemak, semuanya terbungkus oleh sekam (Yoshida, 1981).

Padi merupakan tanaman semiakuatik yang secara alami tumbuh di habitat lembap atau tergenang air. Terdapat dua subspesies utama padi yang dibudidayakan, yaitu *Oryza sativa* subsp. indica yang umum ditanam di daerah tropis dan subtropis, serta Oryza sativa subsp. japonica yang lebih toleran terhadap suhu rendah dan umum ditanam di daerah beriklim sedang. Di Indonesia, sebagian besar padi yang dibudidayakan termasuk dalam subspesies indica (Khush, 1997).

1.2.2 Syarat Tumbuh dan Pemilihan Varietas

Padi dapat tumbuh dengan baik pada suhu udara antara 22-32°C dengan suhu optimal sekitar 25°C. Tanaman ini membutuhkan intensitas cahaya matahari yang cukup tinggi, dengan durasi minimal 8 jam per hari selama periode pertumbuhan. Kebutuhan air padi sangat tinggi, terutama pada fase vegetatif dan generatif. Di sawah irigasi, kebutuhan air berkisar antara 1.200-2.000 mm per musim tanam (Bouman *et al.*, 2007).

Pemilihan varietas merupakan langkah pertama yang sangat penting dalam budidaya padi. Varietas unggul modern yang telah dirilis oleh Balai Penelitian Tanaman Padi (BB Padi) dan instansi penelitian lainnya telah menunjukkan potensi hasil yang jauh lebih tinggi dibandingkan varietas lokal. Beberapa varietas unggul padi yang populer di Indonesia antara lain IR64, Ciherang, Inpari 32, Inpari 42, dan varietas hibrida seperti Hipa 5 dan Hipa 7. Pemilihan varietas harus mempertimbangkan kesesuaian dengan kondisi agroekologi setempat, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta preferensi konsumen (Suprihatno, 2009).

1.2.3 Teknik Budidaya Padi Sawah

Persiapan lahan untuk budidaya padi sawah meliputi pengolahan tanah yang bertujuan untuk menciptakan kondisi lahan yang optimal bagi pertumbuhan tanaman. Tahapan pengolahan tanah meliputi pembajakan atau pembalik tanah, penggaruan, dan perataan atau pelandaian. Pengolahan tanah yang baik akan memperbaiki struktur tanah, membenamkan sisa-sisa tanaman dan gulma, serta menciptakan lumpur yang kondusif untuk pertumbuhan padi sawah. Pada sistem pertanian konservasi, minimum tillage atau zero tillage mulai diterapkan untuk mengurangi biaya pengolahan tanah dan menjaga kualitas tanah (Giller *et al.*, 2009).

Persemaian merupakan tahap penting dalam budidaya padi sawah konvensional. Benih padi disemai di lahan persemaian yang lembap atau tergenang selama 20-25 hari sebelum dipindahtanamkan. Kualitas bibit yang ditanam sangat menentukan pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Bibit yang baik memiliki pertumbuhan yang seragam, bebas dari serangan hama dan

penyakit, serta memiliki sistem perakaran yang kuat (Surajit K. De Datta, 1981).

Penanaman atau transplantasi dilakukan setelah bibit berumur sekitar 21 hari. Jarak tanam yang umum digunakan adalah 25 x 25 cm atau 20 x 20 cm, dengan 2-3 bibit per lubang tanam. Namun, dalam sistem SRI (System of Rice Intensification), penanaman dilakukan dengan bibit lebih muda (7-14 hari), satu bibit per lubang tanam, dengan jarak tanam yang lebih lebar. Sistem ini terbukti dapat meningkatkan produktivitas padi hingga 20-30% dibandingkan sistem konvensional (Uphoff, Kassam and Harwood, 2011).

Pemupukan merupakan komponen penting dalam budidaya padi untuk memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman. Unsur hara makro yang paling penting untuk padi adalah nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K). Rekomendasi pemupukan padi sawah bervariasi tergantung pada kondisi tanah dan target hasil. Secara umum, dosis pupuk N yang direkomendasikan berkisar antara 90-120 kg N/ha per musim tanam, yang diberikan dalam 2-3 kali aplikasi. Pupuk P dan K biasanya diberikan sebagai pupuk dasar pada saat tanam (Dobermann and Cassman, 2004).

Pengairan merupakan aspek kritis dalam budidaya padi sawah. Pada sistem irigasi konvensional, sawah dipertahankan dalam kondisi tergenang sepanjang musim tanam, kecuali pada saat pengeringan menjelang panen. Namun, teknik pengairan berselang (intermittent irrigation) atau pengairan aerobik telah dikembangkan untuk mengurangi konsumsi air tanpa menurunkan produktivitas secara signifikan. Teknik ini dapat mengurangi penggunaan air hingga 30-50% dibandingkan sistem penggenangan terus-menerus (Bouman *et al.*, 2007).

1.2.4 Panen dan Produktivitas

Padi dipanen ketika sekitar 90-95% gabah telah menguning dan kandungan air gabah berkisar 20-25%. Pemanenan yang terlambat dapat menyebabkan kehilangan hasil akibat kerontokan gabah, serangan burung, dan serangan tikus. Pemanenan dapat dilakukan secara manual menggunakan sabit atau secara mekanis menggunakan mesin combine harvester. Penggunaan alat mekanis

dapat meningkatkan efisiensi panen dan mengurangi kehilangan hasil pascapanen (Gummert *et al.*, 2019).

1.3 Budidaya Jagung (*Zea Mays* L.)

1.3.1 Karakteristik Botani Jagung

Jagung (*Zea mays* L.) adalah tanaman serealia yang termasuk dalam famili Poaceae dan merupakan salah satu tanaman pangan paling penting di dunia. Tanaman jagung memiliki batang yang tegak dan solid, beruas-ruas, dengan tinggi yang bervariasi antara 1-3 meter tergantung varietas dan kondisi lingkungan. Sistem perakaran jagung terdiri dari akar seminal yang berkembang dari benih dan akar adventif yang tumbuh dari buku-buku batang bagian bawah. Akar udara (*prop roots* atau *brace roots*) yang tumbuh dari buku-buku batang bawah berfungsi memperkokoh berdirinya tanaman (Carena, Hallauer and Miranda Filho, 2010).

Jagung merupakan tanaman berumah satu (*monoecious*) dengan bunga jantan (*tassel*) terletak di pucuk batang dan bunga betina (silk atau rambut jagung) yang terdapat pada tongkol (*ear*). Penyerbukan pada jagung bersifat silang (*cross pollination*) karena bunga jantan dan betina berada pada posisi yang berbeda. Satu tanaman jagung umumnya menghasilkan satu atau dua tongkol, dengan setiap tongkol mengandung 400-800 biji yang tersusun dalam 8-24 baris (Troyer, 2004).

1.3.2 Persyaratan Ekologi dan Pemilihan Varietas

Jagung dapat tumbuh di berbagai kondisi iklim, dari daerah tropis hingga subtropis. Suhu optimal untuk pertumbuhan jagung berkisar antara 21-30°C, dengan suhu minimum 10°C dan suhu maksimum 40°C. Jagung merupakan tanaman C4 yang sangat efisien dalam penggunaan cahaya matahari dan air, sehingga memiliki potensi hasil yang tinggi di daerah dengan intensitas cahaya tinggi. Kebutuhan air jagung berkisar antara 500-800 mm per musim tanam, tergantung pada varietas, kondisi iklim, dan sistem irigasi yang digunakan (Edmeades *et al.*, 2004).

Varietas jagung yang tersedia di Indonesia sangat beragam, mulai dari varietas lokal tradisional, varietas bersari bebas (open-pollinated varieties), hingga varietas hibrida. Varietas hibrida

umumnya memiliki potensi hasil yang jauh lebih tinggi dibandingkan varietas bersari bebas, tetapi memerlukan pembelian benih baru setiap musim karena sifat hibrida tidak diturunkan secara konsisten kepada generasi berikutnya. Beberapa varietas hibrida jagung yang populer di Indonesia antara lain Pioneer 21, NK212, Bisi 2, dan varietas hibrida dari perusahaan benih nasional (Mejaya, Azrai and Iriany, 2007).

1.3.3 Teknik Budidaya Jagung

Persiapan lahan untuk jagung meliputi pengolahan tanah yang bertujuan untuk menggemburkan tanah, menghilangkan gulma, dan menciptakan kondisi yang baik untuk perkecambahan benih. Pengolahan tanah dapat dilakukan secara konvensional dengan bajak dan garu, atau secara minimum menggunakan herbisida untuk membunuh gulma sebelum tanam. Sistem tanam tanpa olah tanah (zero tillage atau no-till) juga mulai banyak diterapkan, terutama di daerah dengan risiko erosi tinggi (Giller *et al.*, 2009).

Penanaman jagung dilakukan dengan cara membuat lubang tanam atau alur sedalam 3-5 cm, kemudian memasukkan 1-2 benih per lubang. Jarak tanam yang umum digunakan untuk jagung komposit adalah 75 x 25 cm atau 75 x 20 cm, sementara untuk jagung hibrida jarak tanam yang lebih rapat seperti 75 x 20 cm atau bahkan 50 x 20 cm sering direkomendasikan untuk memaksimalkan populasi tanaman per hektar. Populasi tanaman optimal untuk jagung hibrida umumnya berkisar antara 60.000-80.000 tanaman per hektar (Tollenaar and Lee, 2002).

Kebutuhan nutrisi jagung relatif tinggi, terutama untuk nitrogen. Jagung dengan potensi hasil 8-10 ton/ha membutuhkan N sekitar 150-200 kg/ha, P2O5 sekitar 60-90 kg/ha, dan K2O sekitar 60-120 kg/ha. Pemupukan nitrogen biasanya dilakukan dalam tiga tahap: sebagian sebagai pupuk dasar saat tanam, pemberian kedua pada saat tanaman berumur 3-4 minggu, dan pemberian ketiga pada saat tanaman berumur 6-7 minggu (Dobermann and Cassman, 2004). Penggunaan pupuk organik sebagai pelengkap pupuk anorganik sangat dianjurkan untuk memperbaiki sifat fisik dan biologi tanah.

Pengelolaan gulma pada jagung sangat penting, terutama pada 3-6 minggu pertama setelah tanam yang merupakan periode kritis kompetisi. Gulma yang tidak dikendalikan dapat menyebabkan kehilangan hasil hingga 30-50%. Pengendalian gulma dapat dilakukan secara mekanis menggunakan cangkul atau cultivator, atau secara kimiawi menggunakan herbisida. Herbisida pra-tumbuh seperti atrazine dan herbisida pasca-tumbuh seperti glifosfat dan nikosulfuron sering digunakan dalam budidaya jagung (Moechnig *et al.*, 2003).

1.3.4 Panen Jagung

Jagung umumnya dipanen ketika tongkol telah mencapai kematangan fisiologis, yang ditandai dengan terbentuknya lapisan hitam (*black layer*) pada pangkal biji. Pada tahap ini, kadar air biji biasanya berkisar antara 30-35%. Untuk meminimalkan biaya pengeringan, banyak petani memilih memanen jagung ketika kadar air biji telah turun secara alami di lapangan menjadi sekitar 20-25%. Pemanenan dapat dilakukan secara manual atau mekanis. Produktivitas jagung hibrida di tingkat petani di Indonesia berkisar antara 5-8 ton/ha pipilan kering, sementara potensi hasil di lahan percobaan dapat mencapai 10-12 ton/ha (Mejaya et al., 2010).

1.4 Budidaya Kedelai (*Glycine max* (L.) Merr.)

1.4.1 Arti Penting dan Karakteristik Kedelai

Kedelai (*Glycine max* (L.) Merr.) merupakan tanaman legum paling penting secara ekonomi di dunia. Biji kedelai mengandung protein sekitar 35-40% dan lemak sekitar 15-20% dari berat kering, menjadikannya sumber protein nabati yang sangat bernilai. Di Indonesia, kedelai terutama digunakan sebagai bahan baku industri tempe, tahu, kecap, dan susu kedelai. Kebutuhan kedelai Indonesia sangat besar, sekitar 2-2,5 juta ton per tahun, namun produksi dalam negeri baru mencapai sekitar 800.000-900.000 ton per tahun, sehingga kekurangannya dipenuhi melalui impor (Direktorat Jenderal Tanaman Pangan, 2023).

Tanaman kedelai termasuk dalam famili Fabaceae (*Leguminosae)* dan memiliki kemampuan untuk melakukan fiksasi nitrogen biologis melalui simbiosis dengan bakteri Bradyrhizobium

japonicum yang hidup pada bintil-bintil akar. Kemampuan ini memungkinkan kedelai untuk memenuhi sebagian besar kebutuhan nitrogennya sendiri, sehingga kedelai sering ditanam sebagai tanaman penutup atau dalam sistem rotasi untuk memperbaiki kesuburan tanah (Graham and Vance, 2003).

1.4.2 Syarat Tumbuh dan Pemilihan Varietas

Kedelai tumbuh optimal pada suhu antara 25-30°C dengan curah hujan 350-600 mm per musim tanam. Kedelai sangat sensitif terhadap genangan air, sehingga lahan dengan drainase yang baik sangat diperlukan. Tanaman ini juga sensitif terhadap panjang hari (fotoperiode), dimana sebagian besar varietas kedelai merupakan tanaman hari pendek (short-day plant) yang memerlukan panjang hari kurang dari 13 jam untuk memulai pembungaan (*Compendium of Soybean Diseases and Pests, Fifth Edition*, 2016).

Varietas kedelai yang telah dirilis di Indonesia sangat beragam. Varietas Anjasmoro, Argomulyo, Grobogan, dan Dena 1 merupakan beberapa varietas yang populer dengan potensi hasil berkisar antara 2,0-3,4 ton/ha. Kedelai Grobogan merupakan varietas lokal yang sangat populer di Jawa Tengah karena ukuran bijinya yang besar dan rasa yang disukai konsumen. Pemilihan varietas harus mempertimbangkan kesesuaian dengan kondisi agroekologi, ketahanan terhadap penyakit utama, dan preferensi pasar (BALITKABI, 2011).

1.4.3 Teknik Budidaya Kedelai

Persiapan lahan untuk kedelai umumnya dilakukan dengan pengolahan tanah minimum untuk menjaga kelembaban tanah dan menekan biaya produksi. Kedelai dapat ditanam di sawah bekas padi atau di lahan kering. Pada lahan sawah, pembuatan saluran drainase sangat penting untuk mencegah genangan air yang dapat menyebabkan kerusakan tanaman. pH tanah yang ideal untuk kedelai adalah antara 6,0-7,0. Pada tanah masam dengan pH rendah, pengapuran perlu dilakukan untuk meningkatkan pH dan ketersediaan unsur hara (*Compendium of Soybean Diseases and Pests, Fifth Edition*, 2016).

Penanaman kedelai dilakukan dengan cara tugal atau menggunakan alat tanam (planter). Jarak tanam yang umum digunakan adalah 40 x 15 cm atau 40 x 10 cm dengan 2 biji per lubang, menghasilkan populasi 200.000-250.000 tanaman per hektar. Inokulasi benih dengan Bradyrhizobium japonicum sebelum tanam sangat dianjurkan, terutama pada lahan yang baru pertama kali ditanami kedelai atau lahan dengan populasi bakteri Bradyrhizobium yang rendah. Inokulasi yang berhasil dapat meningkatkan fiksasi nitrogen dan mengurangi kebutuhan pupuk nitrogen sintetis (Graham and Vance, 2003).

Kebutuhan pupuk kedelai relatif lebih rendah dibandingkan dengan serealia karena kemampuan fiksasi nitrogennya. Namun, pada tanah dengan kesuburan rendah, pemupukan N starter dosis rendah (15-20 kg N/ha) dan pupuk P (60-75 kg P2O5/ha) serta K (50-60 kg K2O/ha) tetap diperlukan. Selain itu, kedelai juga responsif terhadap pemberian pupuk mikro, terutama molibdenum (Mo) yang berperan sebagai kofaktor enzim nitrogenase dalam proses fiksasi nitrogen (BALITKABI, 2011).

Hama dan penyakit utama pada kedelai yang perlu diwaspadai antara lain lalat kacang (*Melanagromyza sojae*), ulat grayak (*Spodoptera litura*), penghisap polong (*Riptortus linearis* dan *Nezara viridula*), serta penyakit karat kedelai (*Phakopsora pachyrhizi*), virus mosaik kedelai (Soybean Mosaic Virus), dan antraknosa (*Colletotrichum truncatum*). Pengendalian hama terpadu (PHT) yang mengkombinasikan penggunaan varietas tahan, musuh alami, dan pestisida kimia secara bijaksana menjadi pendekatan yang direkomendasikan (Bedjo and Marwoto, 2019).

1.5 Budidaya Ubi Kayu (*Manihot esculenta* Crantz)

1.5.1 Peran dan Karakteristik Ubi Kayu

Ubi kayu (*Manihot esculenta* Crantz) merupakan tanaman umbi-umbian yang termasuk dalam famili Euphorbiaceae. Tanaman ini merupakan sumber karbohidrat penting yang menjadi makanan pokok bagi lebih dari 500 juta orang di seluruh dunia, terutama di Afrika, Asia, dan Amerika Latin (El-Sharkawy, 2004). Di Indonesia, ubi kayu atau singkong merupakan bahan pangan penting kedua setelah beras dan jagung, dan juga merupakan bahan baku penting

untuk industri tapioka dan bioetanol. Indonesia merupakan salah satu produsen ubi kayu terbesar di dunia, dengan produksi sekitar 18-20 juta ton per tahun (BPS, 2023).

Ubi kayu memiliki beberapa keunggulan komparatif sebagai tanaman pangan. Tanaman ini sangat toleran terhadap kondisi lahan marginal, termasuk lahan dengan curah hujan rendah, tanah miskin hara, dan pH tanah rendah. Ubi kayu dapat dipanen kapan saja setelah mencapai kematangan, biasanya antara 8-24 bulan setelah tanam, sehingga berfungsi sebagai 'bank pangan' yang dapat dipanen sesuai kebutuhan (Howeler, R., Lutaladio, N., & Thomas, 2013).

1.5.2 Teknik Budidaya Ubi Kayu

Ubi kayu umumnya diperbanyak secara vegetatif menggunakan stek batang berukuran 20-30 cm dengan 4-8 buku (nodes). Stek ditanam dengan cara dibenamkan secara tegak, miring, atau horizontal tergantung pada kondisi tanah dan ketersediaan kelembaban. Penanaman secara miring (45°) atau horizontal direkomendasikan pada lahan yang kering untuk meningkatkan pembentukan umbi (El-Sharkawy, 2004). Bahan tanaman yang berkualitas baik, bebas dari penyakit, dan berasal dari tanaman induk yang sehat sangat penting untuk keberhasilan budidaya.

Pengolahan tanah untuk ubi kayu umumnya dilakukan dengan membuat guludan atau bedengan untuk memperbaiki drainase dan mempermudah pembentukan serta pemanenan umbi. Jarak tanam yang umum digunakan adalah 1 x 1 m atau 1 x 0,8 m, menghasilkan populasi 10.000-12.500 tanaman per hektar. Pada lahan dengan kesuburan rendah, pemupukan sangat penting untuk mencapai produktivitas optimal. Rekomendasi pemupukan ubi kayu umumnya mencakup N 60-80 kg/ha, P_2O_5 30-40 kg/ha, dan K_2O 60-100 kg/ha (Howeler, R., Lutaladio, N., & Thomas, 2013).

Budidaya ubi kayu secara intensif berpotensi menyebabkan degradasi tanah yang serius karena pemupukan yang tidak berimbang dan kurangnya pengembalian bahan organik ke tanah. Pemanfaatan mulsa organik, rotasi tanaman, dan penerapan sistem konservasi tanah dan air sangat penting untuk menjaga keberlanjutan budidaya ubi kayu. Penggunaan varietas unggul dengan produktivitas tinggi dan kandungan sianida rendah, seperti

varietas Adira, Malang, dan UJ-5, sangat dianjurkan untuk meningkatkan efisiensi produksi dan keamanan konsumsi (BALITKABI, 2011).

1.6 Budidaya Ubi Jalar (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.)

1.6.1 Nilai Gizi dan Potensi Ubi Jalar

Ubi jalar (Ipomoea batatas (L.) Lam.) merupakan tanaman umbi-umbian yang termasuk dalam famili Convolvulaceae. Tanaman ini merupakan salah satu dari lima tanaman pangan terpenting di dunia berdasarkan produksi global. Ubi jalar memiliki nilai gizi yang tinggi, terutama sebagai sumber karbohidrat kompleks, serat pangan, vitamin A (beta-karoten, terutama pada varietas berdaging oranye), vitamin C, vitamin B6, kalium, dan mangan (Bovell-Benjamin, 2007). Di Indonesia, ubi jalar banyak dikonsumsi sebagai makanan pokok di Papua dan sebagai makanan kudapan atau penganan di daerah lainnya.

Ubi jalar oranye dan ungu mendapat perhatian besar dari ilmuwan gizi karena kandungan antioksidannya yang tinggi, khususnya beta-karoten dan antosianin. Program biofortifikasi ubi jalar oranye (*Orange Fleshed Sweet Potato*) telah berhasil meningkatkan konsumsi vitamin A di berbagai negara Afrika Timur dan Asia, dengan dampak positif terhadap kesehatan anak-anak dan ibu hamil (Low *et al.*, 2007).

1.6.2 Teknik Budidaya Ubi Jalar

Ubi jalar diperbanyak secara vegetatif menggunakan stek pucuk batang berukuran 20-30 cm yang diambil dari tanaman induk yang sehat. Stek pucuk yang mengandung 4-5 buku ditanam secara tegak atau miring pada guludan yang telah disiapkan. Jarak tanam ubi jalar yang umum digunakan adalah 100 x 25 cm atau 100 x 30 cm pada guludan tunggal, menghasilkan populasi 33.000-40.000 tanaman per hektar. Penanaman pada guludan sangat penting untuk memfasilitasi pembentukan dan perkembangan umbi yang optimal serta mempermudah pemanenan ('Sweet potato: an untapped food resource', 1992).

Pemupukan ubi jalar umumnya diberikan secara terbagi, dengan sebagian sebagai pupuk dasar pada saat tanam dan sisanya

sebagai pupuk susulan pada 4-6 minggu setelah tanam. Rekomendasi umum pemupukan ubi jalar mencakup N 60-80 kg/ha, P2O5 40-60 kg/ha, dan K2O 60-90 kg/ha. Pemberian kalium yang cukup sangat penting untuk pembentukan umbi yang berkualitas. Pemupukan nitrogen yang berlebihan justru dapat mendorong pertumbuhan vegetatif yang berlebihan (*vine growth*) pada detriment pembentukan umbi ('Sweet potato: an untapped food resource', 1992).

Hama utama yang menyerang ubi jalar adalah penggerek umbi (*Cylas formicarius*) yang menyerang umbi di dalam tanah. Pengendalian hama ini sangat sulit karena larva berada di dalam umbi. Pencegahan melalui penggunaan stek bebas hama, penyiraman tanah secara teratur untuk menghambat serangan hama, dan pemanenan tepat waktu merupakan strategi pengendalian yang efektif. Penyakit virus ubi jalar, yang disebarkan oleh kutudaun (aphid), juga merupakan masalah serius yang dapat menurunkan produksi secara signifikan (Schloemer, Graham and Lawrence, 2025).

Ubi jalar umumnya dipanen pada umur 3,5-5 bulan setelah tanam, tergantung varietas dan kondisi lingkungan. Tanda-tanda kematangan panen adalah daun yang mulai menguning dan mengering, serta batang yang mulai mengeras. Pemanenan dilakukan dengan cara memotong batang terlebih dahulu, kemudian membongkar guludan untuk mengambil umbi. Produktivitas ubi jalar di tingkat petani berkisar antara 15-25 ton/ha umbi segar, sementara varietas unggul di lahan penelitian dapat menghasilkan 30-40 ton/ha (BALITKABI, 2011).

1.7 Pengelolaan Organisme Pengganggu Tanaman

1.7.1 Konsep Pengelolaan Hama Terpadu

Pengelolaan Hama Terpadu (PHT) atau *Integrated Pest Management* (IPM) merupakan pendekatan ekosistem dalam pengelolaan hama yang menggabungkan berbagai metode pengendalian secara komprehensif dan kompatibel untuk menekan populasi hama di bawah ambang ekonomi. Konsep PHT dikembangkan sebagai respons terhadap dampak negatif penggunaan pestisida kimia secara berlebihan, yang menyebabkan

resistensi hama, resurjensi hama sekunder, pencemaran lingkungan, dan gangguan terhadap kesehatan manusia (Paoletti, 2005).
Komponen utama PHT meliputi:

1. Pemantauan populasi hama dan musuh alaminya secara berkala
2. Penggunaan ambang ekonomi atau ambang tindakan sebagai dasar pengambilan keputusan pengendalian
3. Pengendalian biologis melalui pemanfaatan musuh alami
4. Pengendalian kultural melalui modifikasi praktek budidaya
5. Penggunaan varietas tahan
6. Penggunaan pestisida secara selektif dan bijaksana sebagai pilihan terakhir (Pretty and Bharucha, 2015).

1.7.2 Hama dan Penyakit Utama Tanaman Pangan

Pada tanaman padi, hama yang paling merugikan antara lain wereng batang coklat (*Nilaparvata lugens*), penggerek batang padi (*Scirpophaga spp.*), walang sangit (*Leptocorisa oratorius*), dan tikus sawah (*Rattus argentiventer*). Wereng batang coklat merupakan hama paling berbahaya yang dapat menyebabkan 'hopperburn' atau hangus pada tanaman padi. Penyakit utama padi meliputi blas (*Pyricularia oryzae*), hawar daun bakteri (*Xanthomonas oryzae pv. oryzae*), tungro yang disebabkan oleh virus dan ditularkan oleh wereng hijau (*Nephotettix spp*.), serta busuk batang (Helminthosporium sigmoidenum) (Mew *et al.*, 2004).

Pengendalian biologis hama merupakan komponen penting dalam PHT. Musuh alami hama tanaman pangan sangat beragam, meliputi predator seperti laba-laba, kumbang carabid, dan kepik; parasitoid seperti *Trichogramma sp*. yang memarasit telur penggerek batang padi; serta entomopatogen seperti jamur Metarhizium anisopliae dan Beauveria bassiana yang menyerang serangga hama. Pelestarian dan peningkatan populasi musuh alami melalui rekayasa ekosistem, seperti penanaman bunga-bungaan di pematang sawah, merupakan strategi penting dalam PHT (Singh, Jasrotia and Crespo-Herreraa, 2022).

1.7.3 Pengelolaan Gulma

Gulma merupakan organisme pengganggu yang sangat penting dalam budidaya tanaman pangan karena kompetisinya dengan tanaman untuk mendapatkan cahaya, air, dan nutrisi. Kehilangan hasil akibat gulma pada tanaman pangan dapat mencapai 20-60% jika tidak dikendalikan. Gulma juga dapat menjadi inang alternatif bagi hama dan penyakit tanaman (Zimdahl and Basinger, 2024).

Pengendalian gulma pada tanaman pangan dapat dilakukan melalui metode fisik (penyiangan manual atau mekanis), metode kultural (penggunaan mulsa, kerapatan tanam tinggi, rotasi tanaman), pengendalian biologis (menggunakan serangga atau patogen spesifik gulma), dan pengendalian kimiawi (herbisida). Pemilihan metode pengendalian harus mempertimbangkan jenis gulma yang dominan, tahap pertumbuhan tanaman, efisiensi biaya, dan dampak lingkungan. Pendekatan terpadu yang mengkombinasikan berbagai metode pengendalian umumnya lebih efektif dan berkelanjutan dibandingkan mengandalkan satu metode saja (Zimdahl and Basinger, 2024).

1.8 Pascapanen Dan Teknologi Pengolahan

1.8.1 Pentingnya Penanganan Pascapanen

Kehilangan hasil pascapanen merupakan masalah serius dalam sistem pangan global. FAO (2019) memperkirakan bahwa sekitar sepertiga dari produksi pangan global hilang atau terbuang di sepanjang rantai pasokan pangan, mulai dari lapangan hingga konsumen akhir. Di negara-negara berkembang, kehilangan pascapanen terutama terjadi pada tahap pemanenan, pengeringan, penyimpanan, dan pengolahan. Untuk tanaman pangan serealia seperti padi dan jagung, kehilangan pascapanen di tingkat petani di negara-negara Asia dan Afrika dapat mencapai 10-20% dari total produksi (Gummert *et al.*, 2019).

Penanganan pascapanen yang baik sangat penting untuk menjaga kualitas dan kuantitas hasil panen. Praktik pascapanen yang buruk tidak hanya menyebabkan kehilangan bobot, tetapi juga dapat menurunkan kualitas gizi, keamanan pangan (kontaminasi aflatoksin dan mikotoksin), dan nilai ekonomi produk. Oleh karena itu, investasi

dalam teknologi dan infrastruktur pascapanen merupakan komponen penting dalam upaya meningkatkan ketahanan pangan dan pendapatan petani.

1.8.2 Teknologi Pengeringan dan Penyimpanan

Pengeringan merupakan tahap kritis dalam pascapanen serealia dan legum untuk menurunkan kadar air biji ke tingkat yang aman untuk penyimpanan. Kadar air aman untuk penyimpanan jangka panjang biji-bijian adalah sekitar 12-14% untuk serealia dan 10-12% untuk legum. Pengeringan dapat dilakukan secara alami (penjemuran di bawah sinar matahari) atau secara mekanis menggunakan mesin pengering (*dryer*). Penjemuran merupakan metode yang paling umum dan ekonomis di tingkat petani, namun hasilnya sangat bergantung pada kondisi cuaca (Gummert *et al.*, 2019).

Penyimpanan biji-bijian yang baik sangat penting untuk mencegah kehilangan akibat serangan hama gudang (terutama serangga dan tikus), perkembangan jamur penghasil mikotoksin, dan perubahan sifat fisik dan kimia biji. Faktor-faktor utama yang menentukan kualitas penyimpanan adalah suhu, kelembaban udara, kadar air biji, dan kebersihan tempat penyimpanan. Penggunaan wadah penyimpanan yang kedap udara (*hermetic storage*) terbukti efektif dalam mengendalikan serangga hama gudang tanpa penggunaan fumigan kimia.

1.8.3 Pengolahan Primer dan Sekunder

Pengolahan primer tanaman pangan bertujuan untuk mengubah bahan mentah hasil panen menjadi produk yang siap dikonsumsi atau siap untuk diproses lebih lanjut. Pengolahan primer padi meliputi perontokan, pengeringan, penggilingan, dan sortasi. Proses penggilingan padi menghasilkan beras sosoh (*white rice*), dedak, dan menir. Tingkat penggilingan atau derajat sosoh menentukan kandungan gizi beras, dimana beras merah (*less milled*) mengandung lebih banyak serat, vitamin, dan mineral dibandingkan beras putih (*fully milled*) (Bao, 2018).

Pengolahan sekunder menghasilkan berbagai produk pangan olahan dari bahan baku tanaman pangan. Dari padi, dapat dihasilkan

tepung beras, beras instan, bihun, dan kerupuk beras. Dari jagung, dapat dihasilkan tepung jagung, pati jagung, sirop jagung, dan berbagai makanan ringan. Dari kedelai, diperoleh tempe, tahu, kecap, susu kedelai, dan tepung kedelai. Dari ubi kayu, dihasilkan tapioka (pati ubi kayu), gaplek, tepung mocaf (Modified Cassava Flour), dan kerupuk singkong. Diversifikasi produk olahan tanaman pangan sangat penting untuk meningkatkan nilai tambah, menciptakan lapangan kerja, dan mengurangi ketergantungan pada impor pangan (Nweke, 2004).

1.9 Inovasi Dan Tantangan Masa Depan

1.9.1 Pemuliaan Tanaman dan Bioteknologi

Pemuliaan tanaman merupakan fondasi dari semua kemajuan dalam produktivitas pertanian. Metode pemuliaan konvensional melalui seleksi dan persilangan telah menghasilkan ribuan varietas unggul tanaman pangan yang digunakan secara luas oleh petani di seluruh dunia. Namun, perkembangan bioteknologi modern telah membuka peluang baru untuk mempercepat proses pemuliaan dan meningkatkan presisi dalam pengembangan varietas baru (Pixley *et al.*, 2022).

Teknologi pengeditan gen (*gene editing*) menggunakan sistem CRISPR-Cas9 merupakan inovasi revolusioner yang memungkinkan modifikasi genom tanaman dengan presisi tinggi dan efisiensi yang belum pernah ada sebelumnya. Teknologi ini telah diaplikasikan pada berbagai tanaman pangan untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap cekaman abiotik, nilai gizi, dan sifat-sifat agronomis lainnya. Dibandingkan dengan *Genetically Modified Organisms* (GMO) konvensional, tanaman hasil pengeditan gen di banyak negara tidak memerlukan regulasi yang sama ketatnya, sehingga lebih mudah untuk dikomersialisasikan (Gao, 2021).

Genomik dan bioinformatika telah merevolusi program pemuliaan tanaman melalui pendekatan *Genomic Selection* (GS) yang memungkinkan prediksi nilai pemuliaan suatu individu berdasarkan profil genomiknya. Pendekatan ini secara dramatis dapat mempersingkat siklus seleksi dan meningkatkan kemajuan genetik per unit waktu. Seleksi berbasis marka molekuler (*Marker Assisted*

Selection, MAS) juga telah terbukti efektif dalam program pemuliaan untuk mengintroduksi gen ketahanan hama dan penyakit ke dalam varietas unggul (Collard and Mackill, 2008).

1.9.2 Pertanian Presisi dan Digitalisasi

Pertanian presisi (*precision agriculture*) merupakan pendekatan manajemen pertanian yang menggunakan teknologi informasi dan sensor untuk mengoptimalkan input pertanian berdasarkan variabilitas spasial dan temporal di dalam suatu lahan. Teknologi yang digunakan dalam pertanian presisi meliputi GPS (*Global Positioning System*), penginderaan jauh (*remote sensing*), drone pertanian, sensor tanah dan tanaman, serta sistem informasi geografis (GIS). Penerapan pertanian presisi dapat meningkatkan efisiensi penggunaan input (pupuk, air, pestisida), mengurangi dampak lingkungan, dan meningkatkan profitabilitas usahatani (Zhang, Wang and Wang, 2002).

Kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*, AI) dan big data analytics semakin banyak diaplikasikan dalam pertanian untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat. Model prediksi berbasis AI dapat membantu petani dalam meramalkan serangan hama dan penyakit, memilih waktu pemupukan yang optimal, dan memprediksi hasil panen. Platform digital dan aplikasi smartphone yang menghubungkan petani dengan informasi pertanian, pasar, dan layanan keuangan juga berkembang pesat di negara-negara berkembang, termasuk Indonesia (Klerkx, Jakku and Labarthe, 2019).

1.9.3 Perubahan Iklim dan Adaptasi Pertanian

Perubahan iklim merupakan tantangan terbesar yang dihadapi oleh sistem pertanian pangan global di abad ke-21. Peningkatan suhu rata-rata bumi, perubahan pola curah hujan, meningkatnya frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem (kekeringan, banjir, angin topan), serta peningkatan konsentrasi CO_2 di atmosfer akan berdampak signifikan terhadap produktivitas tanaman pangan dan distribusi geografis wilayah pertanian yang produktif (Lobell, Schlenker and Costa-Roberts, 2011).

Adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim mencakup berbagai strategi, antara lain: pengembangan varietas tanaman yang toleran terhadap suhu tinggi, kekeringan, dan genangan; penyesuaian kalender tanam; diversifikasi tanaman; perbaikan pengelolaan air; dan pengembangan sistem pertanian yang lebih resilien. Pertanian agroforestri, yang mengintegrasikan tanaman kayu dengan tanaman pangan, merupakan salah satu sistem pertanian yang dinilai adaptif terhadap perubahan iklim karena kemampuannya menyediakan berbagai layanan ekosistem dan mengurangi risiko gagal panen (Pretty *et al.*, 2018).

1.9.4 Ketahanan Pangan dan Gizi

Tantangan ketahanan pangan dan gizi yang dihadapi dunia bersifat multidimensional. Di satu sisi, masih ada sekitar 733 juta orang di dunia yang mengalami kelaparan kronis (*The State of Food Security and Nutrition in the World 2023*, 2023). Di sisi lain, masalah gizi lebih (*overnutrition*) dan penyakit tidak menular terkait diet juga semakin meningkat, bahkan di negara-negara berkembang. Fenomena 'double burden of malnutrition' (beban ganda malnutrisi) ini memerlukan respons kebijakan yang komprehensif yang tidak hanya berfokus pada peningkatan produksi pangan, tetapi juga pada perbaikan akses, kualitas, dan keberagaman pangan (Johan Swinnen, 2020).

Sistem pangan yang berkelanjutan harus mampu menyediakan pangan yang cukup, bergizi, aman, dan terjangkau bagi semua orang, sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan dan memastikan keadilan bagi seluruh pelaku dalam rantai nilai pangan. Transformasi sistem pangan menuju keberlanjutan memerlukan inovasi teknologi, kebijakan yang mendukung, perubahan perilaku konsumen, dan kerja sama lintas sektor (Willett *et al.*, 2019).

1.10 Teknologi Budidaya Terkini Dan Penerapannya

1.10.1 Teknologi Jajar Legowo pada Budidaya Padi

Teknologi Jajar Legowo merupakan rekayasa teknik tanam yang memperkenalkan barisan kosong di antara dua atau lebih barisan tanaman padi. Nama “legowo” berasal dari bahasa Jawa yang

berarti berbaris lega atau lapang. Teknologi ini dikembangkan oleh Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi) sebagai salah satu inovasi untuk meningkatkan produktivitas padi sawah secara signifikan tanpa memerlukan perluasan lahan (Subhan, Kusmiah and Siadina, 2023).

Prinsip dasar teknologi Jajar Legowo adalah memanfaatkan efek tanaman pinggir (*border effect*), dimana tanaman yang berada di tepi barisan mendapatkan paparan sinar matahari yang lebih besar, sirkulasi udara yang lebih baik, dan kemudahan dalam pemupukan serta pengendalian organisme pengganggu tanaman. Penelitian menunjukkan bahwa tanaman padi di posisi pinggir dapat menghasilkan malai yang lebih panjang dengan jumlah gabah per malai yang lebih banyak dibandingkan tanaman di posisi tengah (Distan, 2020).

Terdapat beberapa tipe Jajar Legowo yang umum diterapkan, antara lain Jajar Legowo 2:1, 4:1, dan 6:1. Pada tipe 2:1, setiap dua baris tanaman diselingi satu baris kosong. Pada tipe 4:1, setiap empat baris tanaman diselingi satu baris kosong. Hasil penelitian di berbagai lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa penerapan Jajar Legowo dapat meningkatkan hasil panen padi antara 10-25% dibandingkan sistem tanam tegel konvensional (25 x 25 cm). Peningkatan produktivitas ini terutama disebabkan oleh peningkatan populasi tanaman yang efektif per satuan luas dan optimalisasi pemanfaatan cahaya matahari (Sembiring, 2008).

Selain meningkatkan produktivitas, Jajar Legowo juga memberikan keuntungan dalam pengendalian gulma dan pemupukan. Baris kosong yang terbentuk memudahkan petani untuk melakukan penyiangan menggunakan gasrok (alat penyiang mekanis beroda) tanpa mengganggu tanaman. Mekanisasi penyiangan ini tidak hanya menghemat tenaga kerja, tetapi juga meningkatkan efektivitas pengendalian gulma. Pada beberapa kasus, baris kosong dalam sistem Jajar Legowo juga dimanfaatkan untuk sistem mina-padi (budidaya padi-ikan terpadu), yang dapat memberikan tambahan pendapatan bagi petani dari hasil produksi ikan (Distan, 2020).

1.10.2 Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT)

Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT) merupakan pendekatan dalam budidaya tanaman pangan yang mengintegrasikan berbagai komponen teknologi secara sinergis dan harmonis. PTT bukan merupakan paket teknologi yang kaku, melainkan sebuah metodologi yang mengkombinasikan teknologi dasar (seperti penggunaan benih bermutu, varietas unggul baru, pemupukan berimbang, dan pengendalian OPT) dengan teknologi pilihan yang disesuaikan dengan kondisi agroekologi setempat (Las *et al.*, 2006).

Komponen teknologi dalam PTT padi, misalnya, mencakup penggunaan varietas unggul baru berdaya hasil tinggi, penggunaan benih bermutu dengan daya kecambah lebih dari 90%, pengolahan tanah yang baik, pengaturan jarak tanam (termasuk sistem Jajar Legowo), pemupukan berdasarkan kebutuhan tanaman dan kondisi tanah menggunakan Bagan Warna Daun (BWD) dan Petak Omisi, pengelolaan air dengan irigasi berselang, pengendalian gulma dengan gasrok, serta penerapan PHT untuk mengendalikan hama dan penyakit. Hasil implementasi PTT di berbagai wilayah di Indonesia menunjukkan peningkatan produktivitas rata-rata sebesar 10-20% dan penurunan biaya produksi hingga 15% dibandingkan sistem budidaya konvensional (Las *et al.*, 2006).

1.10.3 Pertanian Organik dalam Budidaya Tanaman Pangan

Pertanian organik merupakan sistem pertanian yang mengandalkan bahan-bahan alami dan menghindari penggunaan pupuk sintetis, pestisida kimia sintetis, dan organisme hasil rekayasa genetika. Prinsip-prinsip pertanian organik meliputi pemeliharaan dan peningkatan kesehatan tanah melalui penambahan bahan organik, daur ulang unsur hara, meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, serta mempertahankan dan meningkatkan keanekaragaman hayati (IFOAM, 2012).

Dalam konteks budidaya tanaman pangan, pertanian organik mencakup penggunaan pupuk hijau, kompos, pupuk kandang, dan pupuk hayati sebagai pengganti pupuk kimia sintetis. Pupuk hayati (biofertilizer) yang mengandung mikroorganisme bermanfaat, seperti bakteri penambat nitrogen, bakteri pelarut fosfat, dan

mikoriza, semakin banyak digunakan untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman secara alami. Pengendalian hama dan penyakit dalam pertanian organik mengandalkan metode biologi, kultural, dan fisik, serta penggunaan pestisida nabati (botanical pesticides) yang bersumber dari bahan-bahan alami (Lopez-Ridaura, 2022).

Salah satu tantangan utama dalam pengembangan pertanian organik untuk tanaman pangan adalah produktivitas yang pada umumnya lebih rendah dibandingkan pertanian konvensional, terutama pada tahun-tahun pertama masa transisi. Meta-analisis yang dilakukan oleh Seufert et al. (2012) menunjukkan bahwa rata-rata hasil panen pertanian organik adalah 25% lebih rendah dibandingkan pertanian konvensional, meskipun selisih ini bervariasi tergantung jenis tanaman, kondisi tanah, dan praktik pengelolaan yang diterapkan. Namun, produk pertanian organik umumnya memiliki nilai jual yang lebih tinggi di pasar sehingga dapat meningkatkan pendapatan petani secara keseluruhan.

1.11 Aspek Ekonomi, Sosial, Dan Kelembagaan Budidaya Tanaman Pangan

1.11.1 Analisis Usahatani Tanaman Pangan

Analisis usahatani merupakan kegiatan untuk menilai kelayakan finansial dan ekonomi dari suatu sistem budidaya tanaman pangan. Komponen utama dalam analisis usahatani meliputi biaya produksi (*input cost*), penerimaan (*revenue*), dan pendapatan (*income*) petani. Biaya produksi terdiri dari biaya tetap (*fixed cost*) seperti biaya penyusutan alat dan sewa lahan, serta biaya variabel (*variable cost*) seperti biaya benih, pupuk, pestisida, tenaga kerja, dan pengairan (Soekartawi, 2002).

Indikator kelayakan usahatani yang umum digunakan meliputi R/C ratio (*Revenue to Cost ratio*), B/C ratio (*Benefit to Cost ratio*), *Break Even Point* (BEP), dan *Net Present Value* (NPV). R/C ratio yang lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa usahatani tersebut menguntungkan. Data empiris menunjukkan bahwa budidaya padi sawah dengan teknologi yang baik dapat mencapai R/C ratio antara 1,5-2,5, tergantung pada harga gabah, biaya produksi, dan produktivitas yang dicapai. Budidaya jagung hibrida umumnya

memiliki R/C ratio yang lebih tinggi (1,8-3,0) dibandingkan padi, sementara budidaya kedelai memiliki prospek yang baik namun masih menghadapi tantangan dalam hal kepastian harga dan pemasaran (Sudaryanto and Swastika, 2007).

Struktur biaya produksi tanaman pangan di Indonesia masih didominasi oleh biaya tenaga kerja, yang dapat mencapai 40-60% dari total biaya produksi. Hal ini menjadikan mekanisasi pertanian sebagai salah satu kunci untuk meningkatkan efisiensi usahatani, terutama di tengah semakin langkanya tenaga kerja pertanian akibat urbanisasi dan pergeseran preferensi tenaga kerja ke sektor non-pertanian. Penggunaan traktor tangan, transplanter, combine harvester, dan mesin pengering dapat secara signifikan mengurangi biaya tenaga kerja dan meningkatkan ketepatan waktu dalam operasi budidaya (Khan and Rehman, 2019).

1.11.2 Rantai Nilai dan Pemasaran Tanaman Pangan

Rantai nilai tanaman pangan mencakup semua kegiatan yang diperlukan untuk membawa produk dari produsen (petani) ke konsumen akhir, termasuk produksi, pengolahan, transportasi, distribusi, dan perdagangan. Analisis rantai nilai bertujuan untuk mengidentifikasi peluang peningkatan efisiensi dan nilai tambah di setiap tahap rantai, serta mengidentifikasi hambatan yang mengurangi keuntungan petani dan meningkatkan harga bagi konsumen (Kaplinsky and Morris, 2000).

Salah satu permasalahan utama dalam pemasaran produk tanaman pangan di Indonesia adalah panjangnya rantai pemasaran yang menyebabkan margin yang diterima petani menjadi relatif kecil. Petani sering kali menjual hasil panen kepada tengkulak atau pedagang pengumpul di tingkat desa dengan harga yang jauh di bawah harga pasar, sementara konsumen akhir membayar harga yang jauh lebih tinggi. Penguatan kelembagaan petani melalui koperasi dan kelompok tani, pengembangan pasar tani (*farmers' market*), serta pemanfaatan platform digital untuk pemasaran langsung (e-commerce pertanian) merupakan strategi yang dapat mempersingkat rantai pemasaran dan meningkatkan bagian harga yang diterima petani (Shepherd, 2006).

Kebijakan harga dasar gabah (HDG) dan harga pembelian pemerintah (HPP) merupakan instrumen kebijakan yang digunakan pemerintah Indonesia untuk melindungi petani padi dari jatuhnya harga pada saat panen raya. Namun, efektivitas kebijakan ini sering kali terhambat oleh lemahnya kapasitas Bulog dalam menyerap gabah petani pada tingkat harga yang ditetapkan, terutama pada kondisi panen raya ketika stok sudah sangat besar. Pengembangan sistem resi gudang (warehouse receipt system) yang memungkinkan petani menyimpan hasil panen dan mendapatkan pembiayaan dari lembaga keuangan dengan jaminan komoditas merupakan alternatif kebijakan yang dapat meningkatkan posisi tawar petani dalam pemasaran (Larson, Anderson and Varangis, 2004).

1.11.3 Peran Penyuluhan Pertanian dalam Diseminasi Teknologi

Penyuluhan pertanian merupakan proses pendidikan non-formal yang bertujuan untuk meningkatkan kemampuan petani dalam mengambil keputusan budidaya yang lebih baik melalui diseminasi informasi dan teknologi pertanian. Penyuluh pertanian lapang (PPL) berperan sebagai jembatan antara lembaga penelitian dan petani, membantu mengadaptasi dan mengimplementasikan teknologi baru di tingkat lapangan (Amghani *et al.*, 2025).

Sekolah Lapang Pengelolaan Tanaman Terpadu (SLPTT) merupakan salah satu pendekatan penyuluhan yang terbukti efektif dalam meningkatkan adopsi teknologi budidaya oleh petani di Indonesia. Dalam SLPTT, sekelompok petani (biasanya 20-25 orang) belajar bersama di lahan percobaan selama satu musim tanam, melakukan pengamatan, analisis, dan pengambilan keputusan bersama terkait aspek-aspek budidaya tanaman pangan. Pendekatan ini menggabungkan pembelajaran berbasis pengalaman (*experiential learning*) dengan diskusi kelompok, sehingga pengetahuan yang diperoleh lebih mudah dipahami dan diterapkan oleh petani (Muto and Yamano, 2009).

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) membuka peluang baru dalam penyuluhan pertanian. Penggunaan media sosial, aplikasi smartphone, dan platform digital memungkinkan penyampaian informasi pertanian secara lebih

cepat, luas, dan interaktif. Program-program seperti Petani Milenial dan pengembangan ekosistem agritech di Indonesia menunjukkan tren positif dalam mengintegrasikan teknologi digital dengan sektor pertanian. Namun, tantangan dalam hal keterbatasan infrastruktur digital di daerah pedesaan, rendahnya literasi digital petani, dan kebutuhan akan konten yang relevan dan mudah dipahami masih perlu diatasi (Klerkx, Jakku and Labarthe, 2019).

1.12 Kebijakan Pertanian Dan Program Swasembada Pangan Indonesia

1.12.1 Kebijakan Pertanian Pangan di Indonesia

Kebijakan pertanian pangan di Indonesia diarahkan untuk mencapai tiga tujuan utama, yaitu ketahanan pangan (*food security*), kedaulatan pangan (*food sovereignty*), dan keterjangkauan pangan (*food affordability*). Landasan hukum kebijakan pangan Indonesia mencakup Undang-Undang No. 18 Tahun 2012 tentang Pangan yang mengatur berbagai aspek sistem pangan nasional, mulai dari produksi, distribusi, perdagangan, konsumsi, hingga keamanan pangan (Kementerian Pertanian, 2021).

Program Peningkatan Produksi, Produktivitas, dan Mutu Tanaman Pangan untuk Mencapai Swasembada dan Swasembada Berkelanjutan merupakan salah satu program prioritas Kementerian Pertanian. Program ini mencakup berbagai kegiatan seperti pengembangan kawasan pertanaman padi, jagung, kedelai (Pajale), perluasan areal tanam melalui optimasi lahan dan cetak sawah, pengembangan infrastruktur pertanian, distribusi benih subsidi dan pupuk bersubsidi, serta penguatan kapasitas petani dan kelembagaan pertanian (Kementerian Pertanian, 2021).

Kebijakan subsidi pupuk merupakan salah satu instrumen kebijakan pertanian yang paling kontroversial di Indonesia. Di satu sisi, subsidi pupuk dianggap penting untuk menjaga keterjangkauan input produksi bagi petani kecil dan mendukung pencapaian swasembada pangan. Di sisi lain, subsidi pupuk dianggap tidak efisien karena tidak selalu tepat sasaran, mendistorsi penggunaan pupuk (mendorong overuse nitrogen dan underuse pupuk lainnya), serta membebani anggaran negara secara signifikan. Reformasi kebijakan subsidi pupuk menuju pemberian subsidi langsung berbasis kartu

tani atau mekanisme voucher tengah dikaji sebagai alternatif yang lebih efisien dan tepat sasaran (Rahman, 2023).

1.12.2 Swasembada Beras dan Ketahanan Pangan Nasional

Indonesia memiliki sejarah panjang dalam upaya mencapai swasembada beras. Swasembada beras pertama kali dicapai pada tahun 1984, yang merupakan buah dari program Revolusi Hijau yang intensif selama dekade 1960-an hingga 1980-an. Namun, swasembada tersebut tidak bertahan lama, dan Indonesia kembali menjadi importir beras pada decade-dekade berikutnya. Fluktuasi status swasembada beras Indonesia mencerminkan kompleksitas tantangan yang dihadapi dalam mempertahankan produksi padi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan populasi yang terus bertumbuh (Timmer, 2004).

Tantangan utama dalam mempertahankan swasembada beras Indonesia meliputi:

1. Laju alih fungsi lahan sawah yang terus berlanjut akibat urbanisasi dan pembangunan infrastruktur
2. Stagnasi produktivitas (*yield stagnation*) yang disebabkan oleh tercapainya batas genetik varietas yang ada dan degradasi kesuburan lahan
3. Perubahan iklim yang menyebabkan peningkatan risiko kekeringan, banjir, dan serangan hama penyakit
4. Kelangkaan dan mahalnya tenaga kerja pertanian
5. Kurangnya minat generasi muda untuk terlibat dalam usaha pertanian pangan (Suryana, 2014).

Untuk menghadapi tantangan tersebut, diperlukan pendekatan yang komprehensif yang mencakup:

1. Perlindungan dan rehabilitasi lahan pertanian produktif melalui regulasi yang ketat dan pemberian insentif bagi petani untuk mempertahankan lahan sawahnya
2. Peningkatan investasi dalam penelitian dan pengembangan untuk menghasilkan varietas padi baru dengan potensi hasil lebih tinggi dan toleran terhadap cekaman lingkungan
3. Modernisasi pertanian melalui mekanisasi, digitalisasi, dan pengembangan agritech

4. Penguatan sistem perlindungan sosial bagi petani dan perbaikan struktur insentif untuk menarik minat generasi muda ke sektor pertanian
5. Diversifikasi pangan untuk mengurangi ketergantungan berlebih pada beras sebagai sumber kalori utama (Suryana, 2014).

1.12.3 Diversifikasi Pangan dan Pengurangan Ketergantungan pada Beras

Diversifikasi pangan merupakan strategi penting untuk mengurangi ketergantungan berlebih pada satu jenis pangan pokok dan meningkatkan kualitas gizi masyarakat. Indonesia memiliki potensi yang sangat besar untuk diversifikasi pangan berbasis pangan lokal, mengingat kekayaan ragam hayati dan keanekaragaman pangan tradisional yang dimiliki. Tanaman pangan lokal seperti sorgum, ubi jalar, talas, sagu, jewawut, dan berbagai jenis kacang-kacangan memiliki nilai gizi yang tinggi dan potensi untuk dikembangkan sebagai pangan alternatif maupun komplementer beras (Soblia and Tsania, 2009).

Sorgum (*Sorghum bicolor (L.) Moench*) merupakan tanaman serealia yang sangat toleran terhadap kekeringan dan lahan marjinal, menjadikannya kandidat ideal untuk pengembangan di daerah-daerah dengan curah hujan rendah di Indonesia bagian timur. Kandungan gizinya yang tinggi, termasuk protein, serat, dan berbagai mineral, serta sifatnya yang bebas gluten menjadikan sorgum semakin populer sebagai pangan fungsional. Pengembangan teknologi pengolahan sorgum menjadi berbagai produk makanan, seperti tepung sorgum, beras sorgum instan, dan produk snack berbasis sorgum, merupakan kunci untuk meningkatkan penerimaan konsumen terhadap sorgum sebagai pangan alternatif (Dicko *et al.*, 2006).

Sagu (*Metroxylon sagu Rottb.*) merupakan tanaman pangan strategis yang sangat penting di Papua dan beberapa wilayah Indonesia timur lainnya. Sagu memiliki produktivitas pati per satuan luas yang sangat tinggi dibandingkan tanaman pangan lainnya, dan dapat tumbuh di lahan rawa yang tidak suitable untuk tanaman pangan lainnya. Pengembangan budidaya sagu secara intensif dan

pengembangan teknologi pengolahan sagu menjadi berbagai produk pangan modern merupakan peluang besar untuk meningkatkan kontribusi sagu dalam sistem pangan Indonesia (Flach, 1997). Program revitalisasi sagu yang terintegrasi dengan pengembangan industri pengolahan dan pemasaran merupakan kebutuhan mendesak untuk mengoptimalkan potensi sagu sebagai pangan lokal yang bernilai tinggi.

1.13 Studi Kasus Keberhasilan Budidaya Tanaman Pangan Di Indonesia

1.13.1 Pengembangan Kawasan Pertanian Pangan di Sumatera Selatan

Sumatera Selatan merupakan salah satu lumbung padi terpenting di luar Pulau Jawa, dengan luas lahan sawah lebih dari 500.000 hektar yang sebagian besar merupakan lahan rawa pasang surut dan lebak. Pengembangan pertanian di lahan rawa di Sumatera Selatan menghadapi tantangan spesifik berupa kemasaman tanah yang tinggi, fluktuasi muka air yang ekstrem, dan keberadaan senyawa toksik (seperti besi dan sulfat) yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman.

Inovasi teknologi budidaya padi di lahan rawa mencakup pengembangan varietas padi toleran kemasaman dan genangan, teknik pengelolaan air melalui sistem tata air mikro (JITUT/JIDES), penggunaan amelioran untuk mengatasi kemasaman tanah dan toksisitas besi, serta penyesuaian kalender tanam dengan pola curah hujan dan fluktuasi muka air. Penerapan teknologi pengelolaan tanaman terpadu untuk lahan rawa (PTT Rawa) di Kabupaten Banyuasin dan Ogan Komering Ilir (OKI) telah berhasil meningkatkan produktivitas padi dari rata-rata 2,5-3,0 ton/ha menjadi 4,0-5,0 ton/ha, sekaligus meningkatkan pendapatan petani secara signifikan (Murjani, 2025).

1.13.2 Pengembangan Jagung di Nusa Tenggara Timur

Nusa Tenggara Timur (NTT) merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang memiliki ketergantungan tinggi pada jagung sebagai pangan pokok di samping beras. Kondisi iklim NTT yang semi-arid dengan musim kering yang panjang (7-8 bulan per tahun)

sangat membatasi pilihan tanaman pangan yang dapat dibudidayakan, dan jagung merupakan salah satu tanaman yang paling adaptif terhadap kondisi tersebut. Namun, produktivitas jagung di NTT masih sangat rendah, berkisar antara 1,5-2,5 ton/ha, jauh di bawah rata-rata nasional dan potensi varietas yang ada.

Program peningkatan produksi jagung di NTT mencakup introduksi varietas jagung hibrida toleran kekeringan, pengembangan teknik pemanenan air hujan (water harvesting) dan irigasi tetes untuk memaksimalkan pemanfaatan air yang terbatas, pelatihan petani dalam teknik budidaya jagung yang lebih baik, serta pengembangan infrastruktur pemasaran untuk meningkatkan akses petani ke pasar. Salah satu inovasi yang menarik adalah pengembangan sistem pertanaman jagung-legum tumpangsari, dimana jagung ditanam bersama dengan kacang-kacangan (seperti kacang hijau atau kacang tanah) yang dapat membantu meningkatkan kesuburan tanah dan memberikan sumber pendapatan tambahan bagi petani.

1.13.3 Agribisnis Ubi Kayu Berbasis Industri di Lampung

Provinsi Lampung merupakan sentra produksi ubi kayu terbesar di Indonesia, dengan kontribusi sekitar 30-35% dari total produksi nasional. Keberhasilan pengembangan agribisnis ubi kayu di Lampung tidak terlepas dari terbentuknya keterkaitan yang erat antara hulu (produksi) dan hilir (pengolahan industri). Keberadaan industri tapioka skala besar yang membutuhkan pasokan ubi kayu dalam jumlah yang stabil dan berkualitas mendorong petani untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas produksi ubi kayu mereka (Nweke, 2004).

Model kemitraan antara petani dengan industri pengolah ubi kayu di Lampung telah terbukti memberikan manfaat bagi kedua belah pihak. Petani mendapatkan kepastian pasar dan akses terhadap benih unggul, pupuk, dan kredit produksi, sementara industri mendapatkan pasokan bahan baku yang stabil dan berkualitas. Pengembangan varietas ubi kayu unggul dengan kandungan pati tinggi (seperti varietas Kasetsart dan UJ-5) telah secara signifikan meningkatkan nilai bahan baku bagi industri tapioka. Selain tapioka, pengembangan produk olahan berbasis ubi

kayu bernilai tinggi, seperti Modified Cassava Flour (MOCAF), bioetanol, dan berbagai produk pangan olahan, membuka peluang baru untuk meningkatkan nilai tambah dan daya saing agribisnis ubi kayu Lampung di pasar global (Howeler, R., Lutaladio, N., & Thomas, 2013).

1.14 Evaluasi Konsep Dasar Budidaya Tanaman Pangan Dan Relevansinya Bagi Ketahanan Pangan Indonesia

Konsep dasar budidaya tanaman pangan yang telah diuraikan dalam bab ini mencakup spektrum yang sangat luas, mulai dari agronomi sebagai ilmu dan seni pengelolaan tanaman hingga berbagai faktor yang mempengaruhi produktivitas. Pembahasan mengenai konsep-konsep ini penting untuk diperdalam karena pemahaman yang komprehensif terhadap aspek-aspek tersebut menjadi fondasi bagi penerapan teknologi budidaya yang efektif dan berkelanjutan di lapangan.

Faktor iklim sebagai determinan utama produksi tanaman pangan mendapat sorotan yang sangat relevan dalam konteks perubahan iklim global yang sedang terjadi. Suhu optimal yang dibutuhkan oleh masing-masing tanaman pangan utama padi pada kisaran 25–35°C dan jagung pada 20–30°C menunjukkan betapa sensitifnya sistem produksi pangan terhadap perubahan suhu bahkan dalam skala kecil. Proyeksi IPCC (2023) menyebutkan bahwa kenaikan suhu rata-rata global sebesar 1,5°C sudah cukup untuk menurunkan produktivitas padi sebesar 3–10% di kawasan tropis Asia. Ini berarti bahwa sistem budidaya yang saat ini diterapkan perlu diadaptasi secara mendasar dalam dua dekade ke depan.

Faktor tanah sebagai media tumbuh tanaman juga memiliki peran yang tidak kalah kritis. Penurunan kualitas tanah akibat degradasi fisik, kimia, dan biologi merupakan ancaman nyata bagi keberlanjutan produksi pangan di Indonesia. Data Kementerian Pertanian (2022) menunjukkan bahwa sekitar 65% lahan pertanian di Indonesia mengalami berbagai tingkat degradasi, mulai dari penurunan kandungan bahan organik tanah, erosi, hingga pemadatan tanah akibat penggunaan alat pertanian berat. Hal ini mencerminkan urgensi penerapan praktik-praktik konservasi tanah

secara luas dan konsisten, sebagaimana yang telah diuraikan dalam bab melalui konsep pertanian berkelanjutan.

Konsep sistem pertanaman dan intensifikasi yang dibahas dalam bab ini sangat relevan dengan kondisi pertanian Indonesia yang dihadapkan pada paradoks: tekanan untuk meningkatkan produksi di satu sisi, sementara lahan pertanian semakin berkurang akibat konversi lahan di sisi lain. Menurut data BPS, konversi lahan sawah di Indonesia mencapai sekitar 100.000 hektar per tahun dalam satu dekade terakhir. Situasi ini menjadikan intensifikasi pertanian bukan sekadar pilihan, melainkan keharusan strategis. Namun, seperti yang ditekankan dalam bab, intensifikasi harus dilakukan dengan memperhatikan kaidah-kaidah keberlanjutan agar tidak mengorbankan kualitas lahan jangka panjang demi keuntungan produksi jangka pendek.

Pendekatan *System of Rice Intensification* (SRI) yang disebutkan dalam bab merupakan contoh yang menarik untuk dibahas lebih mendalam. Meskipun SRI telah terbukti meningkatkan produktivitas padi hingga 20–30% di berbagai negara, adopsinya di Indonesia masih relatif terbatas. Studi yang dilakukan oleh Sato dan Uphoff (2007) mengidentifikasi beberapa hambatan utama adopsi SRI di Asia, yaitu: kebutuhan tenaga kerja yang lebih tinggi pada tahap awal, perubahan praktik yang dipersepsikan sebagai risiko oleh petani, serta kurangnya dukungan penyuluhan pertanian yang memadai. Temuan ini menunjukkan bahwa keberhasilan intensifikasi pertanian tidak hanya ditentukan oleh keunggulan teknisnya, tetapi juga oleh faktor sosial-ekonomi dan kelembagaan yang melingkupinya.

1.15 Analisis Kritis Teknik Budidaya Komoditas Tanaman Pangan Utama

1.15.1 Budidaya Padi: Antara Tradisi, Inovasi, dan Keberlanjutan

Padi sebagai komoditas pangan strategis nasional telah mendapatkan perhatian yang paling intensif dalam upaya-upaya peningkatan produktivitas pertanian Indonesia. Teknik budidaya padi yang diuraikan dalam bab ini mulai dari persiapan lahan, persemaian, penanaman, pemupukan, pengairan, hingga pemanenan

mencerminkan kemajuan teknologi yang substansial dibandingkan praktik tradisional yang masih banyak diterapkan oleh petani di pedesaan.

Salah satu aspek yang perlu mendapat perhatian lebih mendalam adalah masalah kesenjangan antara produktivitas potensial varietas unggul dengan produktivitas aktual yang dicapai petani (*yield gap*). Data IRRI (2022) menunjukkan bahwa yield gap untuk padi di Indonesia masih cukup besar, yakni sekitar 30–40% antara potensi varietas di lahan percobaan dengan hasil panen riil petani. Faktor utama penyebab yield gap ini meliputi: ketidaktepatan waktu dan dosis pemupukan, pengelolaan air yang belum optimal, serta adopsi varietas unggul baru yang masih rendah karena preferensi petani terhadap varietas yang sudah dikenal dan kepercayaan terhadap kualitas rasa beras yang dihasilkan.

Pengelolaan air dalam budidaya padi sawah merupakan isu yang semakin kritis seiring dengan berkurangnya ketersediaan air irigasi di berbagai wilayah sentra produksi padi. Teknik pengairan berselang yang dibahas dalam bab merupakan solusi yang sangat tepat untuk merespons tantangan ini. Namun, implementasinya memerlukan pemahaman mendalam dari petani mengenai fenologi tanaman padi serta ketersediaan sarana pengukuran dan pengendalian air di tingkat petak sawah. Penelitian yang dilakukan oleh Bouman et al. (2007) menunjukkan bahwa pengairan berselang dapat menghemat air hingga 30–50% tanpa menurunkan hasil secara signifikan, bahkan berpotensi meningkatkan kualitas tanah dengan mengurangi emisi gas metana (CH4) yang merupakan salah satu gas rumah kaca utama dari lahan sawah.

Dari perspektif keberlanjutan lingkungan, budidaya padi sawah konvensional menghadapi tantangan serius terkait emisi gas rumah kaca. Lahan sawah tergenang merupakan sumber emisi metana yang signifikan karena dekomposisi bahan organik dalam kondisi anaerob. Estimasi FAO (2022) menunjukkan bahwa sektor pertanian padi menyumbang sekitar 10–12% dari total emisi gas rumah kaca sektor pertanian global. Teknologi irigasi berselang dan penggunaan varietas padi dengan potensi emisi metana rendah (low-methane varieties) yang sedang dikembangkan oleh IRRI dan BB

Padi merupakan solusi yang menjanjikan untuk mengurangi jejak karbon dari produksi padi tanpa mengorbankan produktivitas.

Aspek pemupukan padi sawah juga memerlukan pembahasan yang lebih kritis. Penggunaan pupuk nitrogen sintetis yang masif dan tidak efisien merupakan salah satu masalah terbesar dalam budidaya padi di Indonesia. Efisiensi penggunaan nitrogen (*Nitrogen Use Efficiency*/NUE) pada budidaya padi konvensional di Indonesia umumnya hanya berkisar 30–40%, artinya 60–70% nitrogen yang diberikan terbuang ke lingkungan melalui volatilisasi amonia, denitrifikasi, dan pencucian nitrat. Penggunaan Bagan Warna Daun (BWD), *Leaf Color Chart*, atau teknologi sensor berbasis *canopy reflectance* untuk menentukan kebutuhan nitrogen tanaman secara lebih presisi merupakan langkah penting untuk meningkatkan NUE dan mengurangi dampak lingkungan dari pemupukan nitrogen.

1.15.2 Budidaya Jagung: Potensi dan Hambatan Menuju Swasembada

Jagung merupakan komoditas dengan dinamika perkembangan yang sangat pesat dalam dua dekade terakhir. Kebutuhan jagung Indonesia yang terus meningkat, terutama untuk pakan ternak dan bahan baku industri pangan, menjadikan jagung sebagai komoditas strategis yang perlu mendapat perhatian serius. Teknik budidaya jagung yang dibahas dalam bab mencerminkan teknologi yang cukup mutakhir, namun beberapa aspek perlu dianalisis lebih mendalam dari sisi praktis dan kontekstual.

Pemilihan varietas hibrida sebagai strategi utama peningkatan produktivitas jagung memiliki implikasi yang kompleks bagi petani kecil. Di satu sisi, varietas hibrida memiliki potensi hasil yang jauh lebih tinggi dapat mencapai 8–12 ton/ha pipilan kering dibandingkan varietas bersari bebas yang umumnya hanya menghasilkan 4–6 ton/ha. Di sisi lain, ketergantungan pada benih hibrida yang harus dibeli setiap musim menciptakan ketergantungan struktural petani pada perusahaan benih multinasional dan meningkatkan biaya produksi secara signifikan. Biaya benih hibrida dapat mencapai 15–25% dari total biaya produksi jagung, yang merupakan beban yang cukup berat bagi petani dengan modal terbatas.

Pengelolaan gulma pada jagung sebagaimana diuraikan dalam bab merupakan aspek yang sangat penting karena kompetisi gulma pada periode kritis 3–6 minggu setelah tanam dapat menyebabkan kehilangan hasil yang sangat besar. Namun, penggunaan herbisida seperti atrazine yang disebutkan dalam bab juga menimbulkan kekhawatiran lingkungan yang signifikan. Atrazine merupakan herbisida yang telah dilarang penggunaannya di Uni Eropa sejak tahun 2004 karena kontaminasinya terhadap air tanah dan sumber air minum serta dampak negatifnya terhadap endokrin sistem vertebrata. Di Indonesia, atrazine masih digunakan secara luas, sehingga perlu ada evaluasi kebijakan penggunaan bahan kimia pertanian ini dengan mempertimbangkan risiko jangka panjang terhadap kesehatan lingkungan dan manusia.

Pengembangan budidaya jagung di lahan kering (*dryland corn*) perlu mendapat perhatian yang lebih besar mengingat potensi lahan kering yang sangat luas di Indonesia, khususnya di kawasan Indonesia Timur. Teknologi konservasi air seperti mulsa organik, sistem tanpa olah tanah (*no-till),* dan pembuatan rorak (*microwatershed*) sangat relevan untuk dikembangkan guna meningkatkan efisiensi pemanfaatan air hujan pada lahan kering. Beberapa daerah di Nusa Tenggara Timur dan Sulawesi Selatan telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dengan penerapan teknologi-teknologi konservasi ini, di mana produktivitas jagung dapat ditingkatkan 20–35% dibandingkan praktik konvensional pada kondisi curah hujan terbatas.

1.15.3 Budidaya Kedelai: Tantangan Struktural Menuju Kemandirian Pangan

Kedelai merupakan komoditas yang paling problematis dalam konteks ketahanan pangan Indonesia. Kesenjangan antara kebutuhan sekitar 2–2,5 juta ton per tahun dan produksi dalam negeri yang hanya sekitar 800.000–900.000 ton per tahun mencerminkan kegagalan struktural yang perlu dianalisis secara komprehensif. Bab ini telah memberikan gambaran teknis budidaya kedelai yang memadai, namun akar masalah kedelai Indonesia lebih bersifat multidimensional, melibatkan aspek teknis, ekonomi, kebijakan, dan sosial.

Dari sisi teknis, salah satu tantangan utama budidaya kedelai di Indonesia adalah rendahnya produktivitas yang dicapai petani, rata-rata hanya 1,2–1,5 ton/ha, jauh di bawah potensi varietas unggul yang dapat mencapai 2,5–3,5 ton/ha. Rendahnya produktivitas ini disebabkan oleh beberapa faktor teknis yang saling berkaitan: penggunaan benih bermutu rendah, ketidaktepatan waktu tanam, pengelolaan hama dan penyakit yang kurang optimal, serta masalah drainase yang sering mengakibatkan stres genangan pada tanaman kedelai yang sangat sensitif terhadap kelebihan air.

Inokulasi benih dengan Bradyrhizobium japonicum yang disebutkan dalam bab merupakan praktik yang sangat penting namun masih sangat jarang dilakukan oleh petani kedelai di Indonesia. Survei yang dilakukan oleh BALITKABI (2019) menunjukkan bahwa kurang dari 5% petani kedelai di Jawa yang menerapkan inokulasi benih sebelum tanam. Padahal, inokulasi yang berhasil dapat meningkatkan fiksasi nitrogen biologis sehingga mengurangi kebutuhan pupuk nitrogen sintetis hingga 50% dan meningkatkan hasil hingga 15–25%. Rendahnya tingkat adopsi inokulasi ini mencerminkan kesenjangan antara rekomendasi teknologi dengan praktik pertanian di lapangan, yang memerlukan strategi komunikasi dan diseminasi teknologi yang lebih efektif.

Dari perspektif ekonomi, harga kedelai impor yang lebih murah dibandingkan kedelai lokal menjadi hambatan utama bagi daya saing kedelai dalam negeri. Harga kedelai impor dari Amerika Serikat dan Brasil yang rendah akibat skala produksi yang sangat besar dan subsidi pertanian di negara-negara produsen utama menjadikan kedelai lokal sulit bersaing di pasar. Untuk mengatasi masalah ini, diperlukan kebijakan yang komprehensif, mulai dari penetapan harga pembelian pemerintah (HPP) yang remuneratif, pengembangan rantai nilai kedelai lokal dengan menghubungkan petani langsung dengan industri pengolah (tempe dan tahu), hingga program subsidi benih dan sarana produksi yang tepat sasaran.

1.15.4 Budidaya Ubi Kayu dan Ubi Jalar: Komoditas Lokal yang Perlu Direvitalisasi

Ubi kayu dan ubi jalar merupakan tanaman pangan yang sering dipandang sebelah mata dalam diskursus ketahanan pangan

Indonesia, padahal keduanya memiliki potensi yang luar biasa sebagai sumber pangan alternatif yang bergizi dan adaptif. Bab ini telah memberikan gambaran teknis budidaya yang cukup komprehensif, namun pembahasan mengenai posisi strategis kedua komoditas ini dalam sistem pangan nasional perlu diperdalam.

Ubi kayu sebagai tanaman yang toleran terhadap kondisi lahan marginal memiliki potensi besar untuk dikembangkan di wilayah-wilayah yang tidak sesuai untuk padi atau jagung. Namun, budidaya ubi kayu secara intensif tanpa pengelolaan tanah yang tepat dapat menyebabkan degradasi lahan yang serius. Penelitian jangka panjang di Thailand dan Brasil menunjukkan bahwa monokultur ubi kayu selama lebih dari 3 musim berturut-turut tanpa rotasi dapat menurunkan kandungan bahan organik tanah hingga 40% dan meningkatkan risiko erosi secara signifikan. Oleh karena itu, sistem rotasi ubi kayu dengan legum misalnya rotasi ubi kayu dengan kacang tanah atau kedelai sangat direkomendasikan untuk menjaga kesuburan tanah dalam jangka panjang.

Ubi jalar oranye dengan kandungan beta-karotennya yang tinggi merupakan solusi yang sangat menjanjikan untuk mengatasi masalah defisiensi vitamin A yang masih menjadi masalah gizi serius di beberapa wilayah Indonesia, terutama di Papua dan Nusa Tenggara Timur. Program biofortifikasi ubi jalar oranye yang telah berhasil diimplementasikan di beberapa negara Afrika Timur dengan peningkatan konsumsi vitamin A pada anak balita sebesar 40–60% memberikan pelajaran berharga yang dapat diadaptasi untuk konteks Indonesia. Kunci keberhasilan program biofortifikasi ini bukan hanya pada ketersediaan varietas yang kaya nutrisi, tetapi juga pada strategi promosi yang efektif untuk mengubah preferensi konsumen terhadap ubi jalar oranye yang memiliki warna daging berbeda dari ubi jalar putih yang selama ini lebih umum dikonsumsi.

1.16 Pengelolaan Opt Terpadu Dan Teknologi Pascapanen: Kunci Efisiensi Sistem Produksi

Pengelolaan Hama Terpadu (PHT) sebagaimana dibahas dalam bab merupakan pendekatan yang secara konseptual sangat kuat dan berbasis sains ekologi yang solid. Namun, implementasi PHT di tingkat petani masih menghadapi berbagai tantangan yang

perlu dibahas secara kritis untuk memahami mengapa adopsi PHT masih rendah meskipun telah dipromosikan selama lebih dari tiga dekade di Indonesia.

Salah satu hambatan utama adopsi PHT adalah sikap risk-aversion (penghindaran risiko) yang lazim di kalangan petani kecil. Petani yang hidup dekat dengan garis kemiskinan cenderung memilih tindakan pengendalian hama yang memberikan kepastian segera (yaitu penyemprotan pestisida) daripada pendekatan PHT yang memerlukan pemantauan berkelanjutan dan pemahaman ekosistem yang lebih kompleks. Tindakan penyemprotan pestisida memberi petani rasa kontrol dan kepastian psikologis yang sulit ditawarkan oleh PHT dalam jangka pendek. Oleh karena itu, program Sekolah Lapang Pengendalian Hama Terpadu (SL-PHT) yang menggunakan pendekatan pembelajaran berbasis pengalaman (*experiential learning*) di lapangan merupakan metode yang lebih efektif untuk mengubah perilaku petani dibandingkan pelatihan di kelas.

Masalah resistensi hama terhadap pestisida merupakan ancaman yang semakin serius dalam budidaya tanaman pangan di Indonesia. Wereng batang coklat (Nilaparvata lugens), yang merupakan hama paling merusak pada padi, telah mengembangkan resistensi terhadap berbagai insektisida yang pernah efektif mengendalikannya. Resistensi wereng batang coklat terhadap imidakloprid dan beberapa insektisida neonikotinoid lainnya telah dilaporkan dari berbagai sentra produksi padi di Jawa. Pola penggunaan pestisida yang tidak mengikuti prinsip-prinsip manajemen resistensi — seperti rotasi bahan aktif, penggunaan campuran insektisida, dan mempertahankan populasi musuh alami — akan terus memperburuk masalah resistensi ini.

Dalam konteks pengelolaan gulma, tren global yang perlu diantisipasi adalah peningkatan kasus resistensi gulma terhadap herbisida. Di beberapa negara produsen padi dan jagung, gulma yang resisten terhadap glifosfat (Roundup) telah menjadi masalah yang sangat serius akibat penggunaan herbisida ini secara berlebihan dan monoton selama bertahun-tahun. Diversifikasi metode pengendalian gulma — mengkombinasikan pengendalian mekanis, kultural, dan kimiawi dengan rotasi bahan aktif herbisida — merupakan strategi

yang harus mulai diterapkan secara konsisten untuk mencegah masalah resistensi gulma meluas di Indonesia.

Penanganan pascapanen merupakan mata rantai yang sering diabaikan dalam sistem produksi tanaman pangan Indonesia, padahal data menunjukkan bahwa kehilangan pascapanen yang masih sangat tinggi — mencapai 10–20% untuk padi dan jagung — setara dengan hilangnya jutaan ton produksi pangan setiap tahun. Dari perspektif ekonomi, mengurangi kehilangan pascapanen sebesar 5% saja pada komoditas padi secara nasional setara dengan peningkatan produksi beras lebih dari 1,5 juta ton, atau setara dengan membuka lebih dari 400.000 hektar sawah baru. Ini menunjukkan bahwa investasi dalam teknologi dan infrastruktur pascapanen memiliki return on investment yang sangat tinggi.

Penggunaan wadah penyimpanan hermetic (kedap udara) seperti Super Grain Bag dan PICS Bag yang disebut dalam bab merupakan teknologi pascapanen yang sangat menjanjikan untuk negara berkembang karena harganya yang relatif terjangkau, tidak memerlukan energi untuk operasionalnya, dan efektif mengendalikan serangga hama gudang dan jamur tanpa penggunaan fumigan kimia. Studi yang dilakukan di beberapa negara Afrika menunjukkan bahwa penggunaan hermetic bags dapat mengurangi kehilangan pasca panen biji-bijian hingga 95% dibandingkan karung konvensional. Diseminasi teknologi ini ke petani Indonesia, terutama di daerah terpencil yang jauh dari fasilitas penyimpanan modern, merupakan langkah konkret yang dapat segera dilakukan untuk meningkatkan ketahanan pangan di tingkat rumah tangga.

1.17 Inovasi Teknologi Pertanian Dan Implikasinya Bagi Masa Depan Budidaya Tanaman Pangan

1.17.1 Bioteknologi dan Pemuliaan Tanaman: Peluang dan Kontroversi

Perkembangan bioteknologi pertanian, khususnya teknologi CRISPR-Cas9 yang dibahas dalam bab, membuka dimensi baru yang revolusioner dalam pengembangan varietas tanaman pangan. Kemampuan untuk memodifikasi urutan DNA tanaman dengan presisi yang belum pernah ada sebelumnya menawarkan solusi untuk berbagai tantangan pertanian yang selama ini sulit dipecahkan

melalui pemuliaan konvensional. Beberapa aplikasi CRISPR yang sedang atau telah berhasil dikembangkan pada tanaman pangan meliputi: peningkatan ketahanan terhadap penyakit blast pada padi, peningkatan toleransi kekeringan pada jagung dan kedelai, peningkatan kandungan nutrisi (protein dan vitamin) pada beras dan jagung, serta perpendek masa vegetatif yang memungkinkan penanaman dengan musim tanam yang lebih pendek.

Namun, penerapan teknologi pengeditan gen di negara berkembang seperti Indonesia masih menghadapi berbagai hambatan regulasi, infrastruktur, dan kapasitas sumber daya manusia. Saat ini, Indonesia belum memiliki regulasi yang jelas dan komprehensif mengenai tanaman hasil pengeditan gen, sehingga terjadi ketidakpastian bagi para peneliti dan investor yang ingin mengembangkan teknologi ini. Penyusunan regulasi yang berbasis sains, proporsional terhadap risiko nyata, dan mendukung inovasi sambil melindungi kepentingan publik dan lingkungan merupakan tantangan kebijakan yang mendesak untuk diselbabkan.

Pendekatan *Genomic Selection* (GS) dalam program pemuliaan tanaman sebagaimana dibahas dalam bab merupakan lompatan revolusioner yang memungkinkan prediksi nilai pemuliaan suatu individu tanaman berdasarkan profil genomiknya tanpa perlu menunggu fenotipe muncul di lapangan. Teknologi ini dapat mempersingkat siklus seleksi dari 10–15 tahun menjadi 3–5 tahun, yang merupakan percepatan yang sangat signifikan dalam menghadirkan varietas-varietas baru yang adaptif terhadap perubahan iklim. Lembaga pemuliaan tanaman nasional seperti BB Padi, BALITKABI, dan Balitsereal perlu mendapatkan dukungan anggaran dan kapasitas yang memadai untuk mengadopsi teknologi pemuliaan berbasis genomik ini agar tidak tertinggal jauh dari lembaga-lembaga pemuliaan internasional.

1.17.2 Pertanian Presisi dan Digitalisasi: Mewujudkan Pertanian Cerdas di Indonesia

Pertanian presisi (*precision agriculture*) dan digitalisasi pertanian yang dibahas dalam bab merupakan topik yang semakin relevan di Indonesia seiring dengan meningkatnya penetrasi internet dan kepemilikan smartphone di kalangan petani. Namun, terdapat

tantangan besar dalam penerapan teknologi pertanian presisi di Indonesia yang perlu dianalisis secara kritis: sebagian besar teknologi pertanian presisi dikembangkan untuk kondisi pertanian skala besar (large-scale farming) di negara maju, sementara struktur pertanian Indonesia didominasi oleh petani kecil dengan luas lahan rata-rata 0,5–1,5 hektar.

Penggunaan drone pertanian untuk pemantauan kondisi tanaman dan aplikasi input secara presisi merupakan salah satu teknologi pertanian presisi yang paling cepat berkembang dan mulai diterapkan di Indonesia. Penurunan harga drone yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir menjadikan teknologi ini semakin terjangkau. Model bisnis penyewaan layanan drone pertanian (drone as a service) yang telah berkembang di Jawa dan Kalimantan merupakan inovasi yang memungkinkan petani kecil mengakses teknologi ini tanpa harus membelinya sendiri. Penggunaan drone untuk penyemprotan pestisida dapat meningkatkan efisiensi penyemprotan, mengurangi paparan petani terhadap bahan kimia berbahaya, dan meningkatkan ketepatan aplikasi.

Platform digital pertanian seperti TaniHub, iGrow, dan berbagai aplikasi pertanian lainnya yang berkembang di Indonesia merupakan manifestasi nyata dari digitalisasi rantai nilai pertanian. Platform-platform ini menghubungkan petani dengan pembeli, investor, dan penyedia sarana produksi secara langsung, mengurangi peran perantara yang selama ini menekan margin keuntungan petani. Namun, keberhasilan platform digital pertanian sangat bergantung pada kualitas dan keandalan koneksi internet, literasi digital petani, serta kepercayaan *(trust*) dalam ekosistem digital. Investasi dalam infrastruktur telekomunikasi di pedesaan dan program literasi digital bagi petani merupakan prasyarat yang harus dipenuhi agar manfaat digitalisasi pertanian dapat dirasakan secara merata oleh seluruh lapisan petani di Indonesia.

Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*/AI) dalam pertanian menghadirkan potensi yang belum pernah ada sebelumnya dalam pengambilan keputusan agronomis. Model prediksi berbasis AI yang dilatih dengan data dari ribuan lahan pertanian dapat memberikan rekomendasi pemupukan, pengendalian hama, dan waktu panen yang jauh lebih akurat dan

tersegmentasi berdasarkan kondisi spesifik masing-masing lahan dibandingkan rekomendasi umum dari penyuluh pertanian. Aplikasi identifikasi penyakit tanaman berbasis computer vision yang memungkinkan petani mendiagnosis penyakit tanaman hanya dengan memotret gejala menggunakan smartphone merupakan contoh nyata bagaimana AI dapat memdemokratisasi akses terhadap pengetahuan pertanian yang canggih bagi petani kecil di pelosok.

1.17.3 Adaptasi Pertanian terhadap Perubahan Iklim: Urgensi dan Strategi

Perubahan iklim yang dibahas dalam bab merupakan ancaman eksistensial bagi ketahanan pangan yang dampaknya semakin nyata dan terasa di sektor pertanian Indonesia. Pergeseran musim hujan, kenaikan suhu udara rata-rata, meningkatnya frekuensi kejadian El Niño dan La Niña yang lebih intens, serta naiknya permukaan laut yang mengancam sawah-sawah di dataran rendah pesisir merupakan manifestasi perubahan iklim yang sudah mulai berdampak nyata pada produksi pangan nasional.

Pengembangan varietas tanaman yang toleran terhadap cekaman abiotik — khususnya kekeringan, suhu tinggi, dan genangan — merupakan strategi adaptasi yang paling mendasar dan berdampak jangka panjang. Program pemuliaan tanaman untuk ketahanan terhadap cekaman abiotik di Indonesia telah menghasilkan beberapa varietas yang menjanjikan, seperti padi varietas Inpara (Inbrida Padi Rawa) yang toleran terhadap genangan, padi varietas Inpago (Inbrida Padi Gogo) yang toleran kekeringan, serta beberapa galur jagung dan kedelai toleran kekeringan yang sedang dalam tahap uji daya hasil. Namun, kecepatan pengembangan dan distribusi varietas-varietas adaptif ini perlu ditingkatkan secara signifikan mengingat laju perubahan iklim yang semakin cepat.

Penyesuaian kalender tanam berdasarkan prediksi iklim musiman merupakan strategi adaptasi yang dapat diimplementasikan dalam jangka pendek tanpa biaya yang besar. Sistem peringatan dini iklim untuk sektor pertanian yang dikembangkan oleh BMKG (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika) bekerja sama dengan Kementerian Pertanian merupakan langkah yang sangat penting untuk membantu petani membuat

keputusan tanam yang lebih tepat. Namun, tantangan terbesar adalah bagaimana menterjemahkan informasi prakiraan iklim yang bersifat probabilistik menjadi rekomendasi kalender tanam yang actionable dan dapat dipahami oleh petani di lapangan.

Sistem agroforestri sebagai salah satu strategi adaptasi perubahan iklim yang disebutkan dalam bab perlu mendapat pembahasan yang lebih mendalam. Agroforestri menggabungkan tanaman pangan dengan tanaman pohon dalam satu sistem pertanian, menciptakan mikroklimat yang lebih stabil, menyediakan sumber pendapatan yang lebih beragam bagi petani, dan meningkatkan resiliensi sistem pertanian terhadap kejadian cuaca ekstrem. Di Sulawesi dan Kalimantan, beberapa sistem agroforestri tradisional yang mengintegrasikan tanaman pangan (padi, jagung) dengan tanaman perkebunan (kakao, kopi) dan kayu telah terbukti lebih tahan terhadap dampak kekeringan El Niño dibandingkan sistem monokultur. Dukungan kebijakan yang lebih kuat untuk pengembangan sistem agroforestri di Indonesia merupakan rekomendasi penting yang perlu ditindaklanjuti.

1.18 Dimensi Sosial-Ekonomi Dan Kelembagaan: Membangun Ekosistem Pertanian Yang Tangguh

Keberhasilan teknik-teknik budidaya tanaman pangan yang dibahas dalam bab ini tidak dapat dilepaskan dari konteks sosial-ekonomi dan kelembagaan yang melingkupinya. Bahkan teknologi budidaya yang paling mutakhir sekalipun tidak akan memberikan dampak yang diharapkan jika petani tidak memiliki akses terhadap modal, pasar, informasi, dan dukungan kelembagaan yang memadai. Oleh karena itu, pembahasan mengenai dimensi sosial-ekonomi pertanian menjadi sangat penting sebagai pelengkap dari aspek teknis budidaya.

1.18.1 Profil Petani Indonesia dan Tantangan Regenerasi Pertanian

Salah satu masalah struktural paling mendasar dalam pertanian Indonesia yang jarang mendapat perhatian yang memadai adalah krisis regenerasi petani. Data Sensus Pertanian 2023 menunjukkan bahwa rata-rata usia petani di Indonesia mencapai 45–50 tahun, dengan proporsi petani berusia di atas 55 tahun yang terus

meningkat. Pemuda pedesaan semakin enggan untuk mengambil profesi sebagai petani karena rendahnya pendapatan, ketidakpastian, kerja fisik yang berat, dan stigma sosial yang masih melekat. Jika tren ini terus berlanjut, maka dalam dua dekade ke depan Indonesia akan menghadapi krisis tenaga kerja pertanian yang serius.

Mekanisasi pertanian yang disebutkan dalam bab tidak hanya berperan dalam meningkatkan efisiensi usahatani, tetapi juga dalam memuat profesi petani menjadi lebih menarik bagi generasi muda. Pertanian berbasis teknologi modern dengan penggunaan traktor GPS, drone pertanian, sensor IoT, dan platform digital memiliki daya tarik yang jauh lebih besar bagi generasi muda yang tumbuh bersama teknologi digital dibandingkan pertanian tradisional yang padat karya fisik. Program-program inkubasi agribisnis untuk pemuda tani, seperti program Petani Milenial yang digagas oleh beberapa pemerintah daerah, merupakan langkah yang sangat positif dalam upaya regenerasi pertanian.

Fragmentasi lahan pertanian merupakan masalah struktural lain yang membatasi adopsi teknologi budidaya modern. Dengan rata-rata kepemilikan lahan yang sangat kecil (0,5–1,5 hektar per keluarga petani di Jawa), skala usaha yang tidak ekonomis menyebabkan petani tidak dapat memaksimalkan manfaat dari mekanisasi dan teknologi modern. Konsolidasi lahan melalui berbagai mekanisme seperti korporasi petani, kawasan usaha pertanian terpadu, atau model farming berbasis kontrak merupakan solusi yang sedang dikembangkan pemerintah untuk mengatasi masalah fragmentasi lahan ini. Namun, implementasinya memerlukan kehati-hatian agar tidak mengorbankan hak-hak petani kecil dan keanekaragaman sistem pangan lokal.

1.18.2 Akses Pembiayaan dan Asuransi Pertanian

Akses terhadap pembiayaan yang terjangkau merupakan prasyarat penting bagi petani untuk dapat mengadopsi teknologi budidaya yang lebih baik. Keterbatasan modal menyebabkan banyak petani terjebak dalam lingkaran kemiskinan teknologi: tidak mampu membeli input berkualitas tinggi (benih unggul, pupuk yang cukup, pestisida yang tepat), sehingga produktivitas rendah, pendapatan

rendah, dan pada musim berikutnya masih tidak mampu membeli input berkualitas. Program Kredit Usaha Rakyat (KUR) Pertanian yang disediakan pemerintah merupakan instrumen pembiayaan yang tepat, namun realisasinya masih belum optimal karena berbagai hambatan administratif dan persepsi risiko yang tinggi dari pihak perbankan.

Asuransi pertanian merupakan instrumen manajemen risiko yang sangat penting bagi petani, terutama dalam konteks ketidakpastian iklim yang semakin meningkat. Program Asuransi Usaha Tani Padi (AUTP) yang telah diimplementasikan pemerintah Indonesia merupakan langkah yang sangat positif, namun tingkat partisipasi petani masih sangat rendah karena premi yang masih dianggap mahal, prosedur klaim yang rumit, dan kurangnya kepercayaan petani terhadap sistem asuransi. Inovasi dalam dbabn produk asuransi pertanian seperti asuransi berbasis indeks curah hujan (*rainfall index insurance*) yang pembayaran klaimnya didasarkan pada data curah hujan dari stasiun cuaca terdekat tanpa memerlukan verifikasi lapangan yang memakan waktu dapat meningkatkan aksesibilitas dan kepercayaan petani terhadap produk asuransi pertanian.

1.18.3 Pengembangan Rantai Nilai dan Nilai Tambah Tanaman Pangan

Pengembangan rantai nilai tanaman pangan yang menguntungkan petani merupakan kunci untuk meningkatkan pendapatan dan kesejahteraan petani secara berkelanjutan. Permasalahan klasik yang dihadapi petani dalam rantai nilai adalah posisi tawar yang lemah karena mereka menjual produk dalam bentuk curah (*bulk*) pada saat yang bersamaan (pasca panen), sehingga harga cenderung jatuh. Membangun kapasitas petani untuk melakukan pengolahan dan penambahan nilai di tingkat kelompok tani atau koperasi merupakan strategi yang terbukti efektif untuk meningkatkan margin keuntungan yang diterima petani.

Diversifikasi produk olahan tanaman pangan yang disebutkan dalam bab merupakan peluang bisnis yang sangat besar namun belum dimanfaatkan secara optimal. Tepung mocaf (*Modified Cassava Flour*) yang dihasilkan dari fermentasi ubi kayu merupakan

contoh sukses bagaimana inovasi pengolahan dapat meningkatkan nilai tambah komoditas pangan lokal secara dramatis. Mocaf dapat digunakan sebagai substitusi parsial atau penuh tepung terigu dalam berbagai produk olahan roti dan kue, membuka peluang untuk mengurangi ketergantungan Indonesia pada impor gandum yang saat ini mencapai lebih dari 10 juta ton per tahun. Pengembangan ekosistem industri mocaf yang kuat — dari tingkat petani ubi kayu, unit pengolahan, hingga industri hilir yang menggunakannya — merupakan contoh model pengembangan rantai nilai yang terintegrasi dan berdampak luas.

Model kemitraan antara petani dengan perusahaan agribisnis besar (*contract farming*) merupakan salah satu mekanisme yang dapat membantu petani mengakses pasar yang lebih luas dan mendapatkan kepastian harga. Dalam model ini, perusahaan mitra menyediakan benih, pupuk, dan pendampingan teknis kepada petani dengan sistem pembayaran yang dipotong dari hasil penjualan, sementara petani berkomitmen untuk menjual hasil produksinya kepada perusahaan tersebut dengan harga yang telah disepakati di awal. Keberhasilan model kemitraan sangat bergantung pada kejujuran dan komitmen kedua belah pihak serta adanya regulasi yang melindungi kepentingan petani dari praktik-praktik yang merugikan.

1.19 Pertanian Berkelanjutan Dan Kerangka Kebijakan Nasional

1.19.1 Pertanian Organik: Prospek dan Tantangan di Indonesia

Pertanian organik yang dibahas dalam bab merupakan salah satu pendekatan pertanian berkelanjutan yang mendapat perhatian global yang semakin besar. Permintaan global terhadap produk pangan organik terus meningkat dengan laju pertumbuhan rata-rata 5–10% per tahun, membuka peluang ekspor yang sangat besar bagi Indonesia. Beberapa produk pertanian organik Indonesia seperti beras organik, kopi organik, dan rempah-rempah organik telah berhasil menembus pasar ekspor premium di Eropa, Amerika Utara, dan Jepang dengan harga yang 30–100% lebih tinggi dibandingkan produk konvensional.

Namun, tantangan pengembangan pertanian organik untuk tanaman pangan utama (padi, jagung, kedelai) di Indonesia sangat kompleks. Produktivitas yang lebih rendah pada pertanian organik rata-rata 20–30% di bawah pertanian konvensional sebagaimana disebutkan dalam bab memerlukan kompensasi melalui harga premium di pasar. Sementara itu, pasar produk pangan organik di Indonesia masih sangat terbatas karena daya beli konsumen yang mayoritas masih sensitif terhadap harga. Strategi yang lebih realistis mungkin adalah pendekatan "pertanian berkelanjutan" yang tidak harus 100% organik, tetapi secara bertahap mengurangi ketergantungan pada input sintetis dan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan pestisida melalui pendekatan Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT).

Pertanian regeneratif (*regenerative agriculture*) merupakan konsep yang lebih komprehensif dari sekadar pertanian organik, yang berfokus pada pemulihan dan peningkatan kesehatan tanah, keanekaragaman hayati, dan fungsi ekosistem pertanian. Konsep ini mencakup praktik-praktik seperti minimum tillage, cover cropping, rotasi tanaman yang beragam, integrasi ternak dengan tanaman, dan kompos. Meskipun belum banyak dikenal secara luas di Indonesia, prinsip-prinsip pertanian regeneratif sesungguhnya sudah diterapkan dalam berbagai sistem pertanian tradisional lokal, seperti sistem subak di Bali dan sistem pertanian berbasis kearifan lokal lainnya. Mendokumentasikan dan mengintegrasikan pengetahuan lokal ini dengan sains pertanian modern merupakan pendekatan yang sangat berharga.

1.19.2 Kebijakan Pangan Nasional dan Implikasinya bagi Budidaya Tanaman Pangan

Kebijakan pangan nasional memiliki pengaruh yang sangat besar terhadap insentif dan disinsentif bagi petani dalam mengadopsi teknologi budidaya tertentu. Kebijakan subsidi pupuk yang telah berlangsung selama puluhan tahun di Indonesia merupakan contoh yang menarik untuk dianalisis dari perspektif kritis. Di satu sisi, subsidi pupuk bertujuan untuk meningkatkan produktivitas tanaman pangan dan menjaga daya beli petani. Di sisi lain, subsidi pupuk yang tidak tepat sasaran sering kali tidak sampai

ke petani yang benar-benar membutuhkan atau datang terlambat dari jadwal tanam telah mendistorsi penggunaan pupuk dan menciptakan ketidakefisienan yang besar. Evaluasi komprehensif terhadap skema subsidi pupuk dan transformasinya menjadi bantuan yang lebih tepat sasaran (misalnya melalui kartu tani digital) merupakan reformasi kebijakan yang sangat penting.

Kebijakan diversifikasi pangan yang menjadi mandat Undang-Undang No. 18 Tahun 2012 tentang Pangan merupakan kebijakan yang sangat strategis namun implementasinya masih belum optimal. Ketergantungan konsumsi pangan masyarakat Indonesia pada beras yang sangat tinggi sekitar 114 kg per kapita per tahun, jauh di atas rata-rata global menciptakan tekanan yang besar terhadap produksi padi dan mengabaikan potensi komoditas pangan lokal seperti sorgum, jewawut, talas, dan berbagai umbi-umbian lainnya. Promosi diversifikasi pangan perlu dilakukan tidak hanya melalui kampanye konsumsi, tetapi juga melalui pengembangan industri pengolahan pangan berbasis bahan baku lokal dan penetrasi produk-produk pangan alternatif ke pasar modern.

Kebijakan perlindungan lahan pertanian pangan berkelanjutan (LP2B) yang diamanatkan oleh Undang-Undang No. 41 Tahun 2009 tentang Perlindungan Lahan Pertanian Pangan Berkelanjutan merupakan kebijakan yang sangat kritis untuk menjamin ketersediaan lahan sawah yang cukup bagi produksi padi nasional. Namun, implementasi kebijakan ini masih lemah di tingkat daerah, terbukti dari masih maraknya konversi lahan sawah produktif untuk kepentingan pembangunan perumahan, industri, dan infrastruktur. Penegakan kebijakan LP2B yang lebih tegas, disertai dengan mekanisme kompensasi yang adil bagi daerah-daerah yang mau menjaga lahan sawahnya, merupakan kebutuhan mendesak yang harus segera ditangani.

1.22 Ketahanan Pangan, Gizi, Dan Transformasi Sistem Pangan Berkelanjutan

Ketahanan pangan merupakan konsep yang jauh lebih luas dari sekadar produksi pangan yang cukup. Definisi FAO yang dikutip dalam bab yang mencakup empat pilar yaitu ketersediaan, akses, pemanfaatan, dan stabilitas mencerminkan kompleksitas tantangan

ketahanan pangan yang sesungguhnya. Produksi tanaman pangan yang tinggi tidak dengan sendirinya menjamin ketahanan pangan, jika tidak didukung oleh sistem distribusi yang efisien, harga yang terjangkau bagi konsumen berpenghasilan rendah, pengetahuan gizi yang cukup untuk memanfaatkan pangan secara optimal, serta ketahanan sistem pangan terhadap berbagai guncangan dan tekanan.

Masalah "beban ganda malnutrisi" (*double burden of malnutrition*) yang disebutkan dalam bab sangat relevan dengan kondisi Indonesia. Indonesia saat ini menghadapi tantangan ganda: di satu sisi masih tingginya angka stunting (sekitar 21% pada tahun 2023, meskipun sudah menurun dari 30% pada tahun 2019) yang mencerminkan defisiensi gizi kronis pada anak balita; di sisi lain semakin meningkatnya prevalensi obesitas dan penyakit tidak menular terkait pola makan yang tidak sehat. Paradoks ini menunjukkan bahwa masalah ketahanan pangan dan gizi di Indonesia bukan hanya tentang kuantitas pangan yang tersedia, tetapi juga tentang kualitas pangan, keanekaragaman pangan, dan pola konsumsi masyarakat.

Konsep "diet sehat dari sistem pangan berkelanjutan" yang dikembangkan oleh Komisi EAT-Lancet sebagaimana disebutkan dalam bab menawarkan kerangka yang menarik namun juga menimbulkan pertanyaan tentang kontekstualisasinya untuk negara-negara berkembang seperti Indonesia. Rekomendasi diet "planetary health diet" dari EAT-Lancet yang mengurangi konsumsi protein hewani dan meningkatkan konsumsi legum dan biji-bijian secara substansial memerlukan adaptasi yang cermat terhadap konteks budaya, sosial-ekonomi, dan agroekologi spesifik Indonesia. Keterlibatan masyarakat lokal, pelaku usaha pangan lokal, dan pembuat kebijakan dalam proses adaptasi ini sangat penting untuk memastikan bahwa rekomendasi diet yang dihasilkan adalah relevan, achievable, dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Peran tanaman pangan lokal dalam mendukung ketahanan pangan dan gizi yang berkelanjutan perlu mendapat penekanan yang lebih besar. Indonesia memiliki kekayaan plasma nutfah tanaman pangan yang luar biasa, dengan lebih dari 400 jenis tanaman yang diketahui dapat dikonsumsi sebagai pangan. Namun, dalam dua hingga tiga generasi terakhir, keanekaragaman pangan konsumsi

masyarakat Indonesia telah menyempit secara dramatis akibat homogenisasi sistem pangan dan dominasi beras sebagai pangan pokok tunggal. Revitalisasi tanaman pangan lokal seperti sorgum, jewawut, talas, sukun, dan berbagai jenis umbi-umbian khas daerah tidak hanya penting untuk keragaman pangan dan gizi, tetapi juga untuk ketahanan ekologis sistem pertanian karena tanaman-tanaman ini umumnya lebih adaptif terhadap kondisi lahan marginal dan perubahan iklim dibandingkan tanaman pangan utama yang telah termodernisasi.

1.20 Sintesis Pembahasan: Menuju Sistem Budidaya Tanaman Pangan Yang Produktif, Berkelanjutan, Dan Inklusif

Berdasarkan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disintesiskan bahwa tantangan budidaya tanaman pangan di Indonesia bersifat multidimensional dan memerlukan pendekatan yang holistik, yang mengintegrasikan aspek teknis, sosial-ekonomi, kelembagaan, dan lingkungan secara sinergis. Tidak ada solusi tunggal yang dapat mengatasi semua masalah sekaligus; yang diperlukan adalah portofolio solusi yang saling melengkapi dan diimplementasikan secara terkoordinasi oleh berbagai pemangku kepentingan.

Dari sisi teknis budidaya, peningkatan produktivitas tanaman pangan di Indonesia masih memiliki ruang yang sangat besar melalui penutupan yield gap. Strategi utama untuk menutup yield gap ini meliputi:

1. Percepatan distribusi dan adopsi varietas unggul baru yang adaptif terhadap kondisi agroekologi spesifik dan tantangan perubahan iklim
2. Perbaikan teknik pemupukan berimbang berbasis analisis tanah dan kebutuhan tanaman
3. Penerapan teknik irigasi yang hemat air seperti pengairan berselang untuk mengatasi kelangkaan air
4. Implementasi sistem PHT yang lebih efektif untuk mengurangi kehilangan hasil akibat serangan hama dan penyakit

5. Investasi dalam teknologi dan infrastruktur pascapanen untuk mengurangi kehilangan pascapanen yang masih sangat besar.

Dari sisi inovasi teknologi, tiga bidang yang paling menjanjikan untuk masa depan budidaya tanaman pangan Indonesia adalah: pertama, bioteknologi khususnya genomic selection dan pengeditan gen yang memungkinkan pengembangan varietas tanaman yang lebih cepat dan lebih presisi; kedua, pertanian presisi dan digitalisasi yang memungkinkan pengelolaan sumber daya pertanian yang lebih efisien dan berbasis data; dan ketiga, pengembangan sistem pertanian terpadu yang mengintegrasikan tanaman pangan dengan komponen lain seperti tanaman perkebunan, ternak, dan perikanan untuk menciptakan sistem yang lebih resilien dan produktif secara keseluruhan.

Dari sisi sosial-ekonomi dan kelembagaan, penguatan kapasitas petani melalui pendidikan, pelatihan, dan pendampingan teknis yang berkelanjutan merupakan investasi jangka panjang yang tidak dapat ditawar. Pengembangan kelembagaan petani yang kuat baik melalui kelompok tani, koperasi, maupun asosiasi komoditas sangat penting untuk meningkatkan posisi tawar petani dalam rantai nilai, memfasilitasi akses terhadap teknologi dan pasar, serta mewakili kepentingan petani dalam proses perumusan kebijakan. Regenerasi petani melalui program-program yang menarik bagi generasi muda dan memosisikan pertanian sebagai profesi yang modern, teknologis, dan menguntungkan juga merupakan prioritas jangka panjang yang tidak boleh diabaikan.

Dari sisi kebijakan, diperlukan reformasi kebijakan pangan yang komprehensif dan berbasis bukti, yang mencakup: evaluasi dan reformasi subsidi pertanian agar lebih tepat sasaran dan mendorong efisiensi; penegakan kebijakan perlindungan lahan pertanian yang lebih tegas; pengembangan infrastruktur pertanian (irigasi, jalan pertanian, sarana penyimpanan) yang memadai; dukungan untuk penelitian dan pengembangan teknologi pertanian yang lebih besar; serta kebijakan yang mendukung diversifikasi pangan dan pengembangan sistem pangan lokal yang kuat.

Dari sisi lingkungan dan keberlanjutan, transformasi menuju sistem budidaya tanaman pangan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan bukan lagi sekadar pilihan moral, melainkan keharusan pragmatis untuk menjamin ketersediaan pangan bagi generasi mendatang. Sistem pertanian yang merusak modal alam tanah, air, keanekaragaman hayati pada akhirnya akan mengancam kemampuan produksi pangan itu sendiri. Oleh karena itu, paradigma "intensifikasi berkelanjutan" yang meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga kualitas lingkungan harus menjadi acuan dalam setiap kebijakan dan praktik budidaya tanaman pangan di Indonesia.

Peran penelitian dan pengembangan (litbang) pertanian yang kuat dan didukung anggaran yang memadai merupakan fondasi bagi semua kemajuan yang diharapkan dalam sistem budidaya tanaman pangan. Rasio investasi litbang pertanian terhadap nilai produksi pertanian di Indonesia masih sangat rendah dibandingkan dengan negara-negara yang telah berhasil dalam pembangunan pertaniannya. Peningkatan alokasi anggaran untuk litbang pertanian, disertai dengan penguatan sistem inovasi pertanian yang menghubungkan lembaga penelitian dengan petani dan industri, merupakan investasi strategis yang akan memberikan manfaat jangka panjang yang berlipat ganda.

Kolaborasi lintas sektor dan lintas disiplin ilmu merupakan kunci untuk mengatasi kompleksitas tantangan ketahanan pangan dan budidaya tanaman pangan di Indonesia. Masalah ketahanan pangan tidak dapat diselbabkan oleh sektor pertanian saja, tetapi memerlukan kontribusi dari sektor pendidikan, kesehatan, infrastruktur, keuangan, perdagangan, dan lingkungan hidup. Demikian pula, solusi bagi tantangan budidaya tanaman pangan memerlukan kolaborasi antara ahli agronomi, pemulia tanaman, ilmuwan tanah, ekonom pertanian, sosiolog pedesaan, ahli gizi, dan informatika. Pendekatan multidisiplin dan lintas sektoral yang terintegrasi inilah yang akan mampu menghasilkan terobosan-terobosan yang berarti dalam mewujudkan sistem budidaya tanaman pangan yang produktif, berkelanjutan, dan inklusif di Indonesia.

Sebagai penutup pembahasan, perlu ditekankan bahwa meskipun tantangan yang dihadapi sangat besar dan kompleks,

Indonesia sesungguhnya memiliki modal dasar yang sangat kuat untuk mewujudkan sistem budidaya tanaman pangan yang lebih baik: kekayaan agroekologi yang luar biasa beragam dengan berbagai zona iklim dan jenis tanah yang mendukung budidaya berbagai komoditas pangan; kekayaan plasma nutfah tanaman pangan yang sangat besar dan belum sepenuhnya dimanfaatkan; tradisi pertanian yang panjang dengan kearifan lokal yang kaya; sumber daya manusia pertanian yang besar meskipun masih perlu ditingkatkan kualitasnya; serta komitmen pemerintah dan masyarakat terhadap ketahanan pangan nasional. Dengan memanfaatkan modal dasar ini secara optimal melalui kebijakan yang tepat, inovasi teknologi yang relevan, dan pemberdayaan petani yang efektif, Indonesia memiliki potensi untuk tidak hanya mencapai ketahanan pangan mandiri, tetapi juga menjadi kontributor penting bagi ketahanan pangan global di masa depan.

1.21 Penutup

Budidaya tanaman pangan merupakan tulang punggung ketahanan pangan nasional yang mencakup sistem pertanian kompleks dan multidimensional. Bab ini membahas lima komoditas utama padi, jagung, kedelai, ubi kayu, dan ubi jalar beserta seluruh aspek teknis dan non-teknis yang melingkupinya.

Dari sisi teknis, masing-masing komoditas memiliki kebutuhan agro-ekologi dan teknik budidaya yang spesifik. Produktivitas aktual petani Indonesia masih jauh di bawah potensi varietas unggul yang tersedia (yield gap 30–40% untuk padi), yang mengindikasikan masih besarnya ruang untuk peningkatan melalui perbaikan praktik pemupukan, pengelolaan air, pengendalian OPT, dan penanganan pascapanen.

Dari sisi inovasi, tiga bidang yang paling menjanjikan adalah bioteknologi (pengeditan gen CRISPR dan genomic selection), pertanian presisi berbasis AI dan drone, serta pengembangan sistem pertanian terpadu yang resilien terhadap perubahan iklim.

Dari sisi lingkungan, intensifikasi pertanian harus diiringi dengan prinsip keberlanjutan agar tidak mengorbankan kualitas tanah, ketersediaan air, dan keanekaragaman hayati demi keuntungan produksi jangka pendek. Pendekatan pertanian

regeneratif dan PHT (Pengelolaan Hama Terpadu) menjadi sangat relevan dalam konteks ini.

Dari sisi sosial-ekonomi, tantangan struktural seperti fragmentasi lahan, krisis regenerasi petani, panjangnya rantai pemasaran, dan keterbatasan akses pembiayaan menjadi penghambat utama adopsi teknologi. Penguatan kelembagaan petani melalui koperasi, kelompok tani, dan platform digital merupakan kunci untuk meningkatkan posisi tawar petani.

Dari sisi kebijakan, diperlukan reformasi yang komprehensif mencakup subsidi pupuk yang lebih tepat sasaran, perlindungan lahan sawah dari alih fungsi, penguatan penelitian dan pengembangan pertanian, serta promosi diversifikasi pangan untuk mengurangi ketergantungan berlebih pada beras.

Secara keseluruhan, mewujudkan sistem budidaya tanaman pangan yang produktif, berkelanjutan, dan inklusif di Indonesia memerlukan sinergi antara inovasi teknologi, kebijakan yang berpihak pada petani kecil, penguatan kelembagaan, serta perubahan paradigma konsumsi masyarakat. Indonesia memiliki modal dasar yang kuat kekayaan agroekologi, plasma nutfah, dan tradisi pertanian yang jika dimanfaatkan secara optimal dapat menjadikan Indonesia tidak hanya swasembada pangan, tetapi juga kontributor penting bagi ketahanan pangan global.

DAFTAR PUSTAKA

Amghani, M.S. *et al.* (2025) 'Factors influencing the agricultural extension model sites in Iran', *Scientific Reports* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1038/s41598-025-94151-6.

BALITKABI, M. (2011) *Deskripsi Varietas Unggul Kacang-kacangan dan Umbiumbian*, *Agro inovasi Malang*.

Bao, J. (2018) *Rice: Chemistry and technology*, *Rice: Chemistry and Technology*. Available at: https://doi.org/10.1016/C2016-0-01526-7.

Bedjo and Marwoto (2019) 'Identifikasi Hama dan Pengendaliannya Secara Terpadu Pada Tanaman Kedelai', *Jurnal Penelitian Tanaman* [Preprint].

Bouman, B.A.M. *et al.* (2007) 'Rice and Water', *Advances in Agronomy* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1016/S0065-2113(04)92004-4.

BPS (2023) 'Statistik Tanaman Pangan 2022.', *Badan Pusat Statistik. https://www.bps.go.id/publication* [Preprint].

Carena, M.J., Hallauer, A.R. and Miranda Filho, J.B. (2010) *Quantitative Genetics in Maize Breeding*, *Quantitative Genetics in Maize Breeding*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0766-0.

Collard, B.C.Y. and Mackill, D.J. (2008) 'Marker-assisted selection: An approach for precision plant breeding in the twenty-first century', *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2170.

Compendium of Soybean Diseases and Pests, Fifth Edition (2016) *Compendium of Soybean Diseases and Pests, Fifth Edition*. Available at: https://doi.org/10.1094/9780890544754.

Dicko, M.H. *et al.* (2006) 'Sorghum grain as human food in Africa: Relevance of content of starch and amylase activities', *African Journal of Biotechnology* [Preprint].

Direktorat Jenderal Tanaman Pangan (2023) *Laporan Kinerja Direktorat Tanaman Pangan Kementerian Pertanian Tahun 2022*, *Laporan Kinerja Ditjen Tanaman Pangan 2022*.

Distan (2020) 'Sistem Tanam Jajar Legowo',

https://pertanian.bimakota.go.id/web/kontent/44/tanaman_pangan, diakses tanggal 4 Maret 2022 [Preprint].

Dobermann, A. and Cassman, K.G. (2004) 'Environmental Dimensions of Fertilizer Nitrogen: What Can Be Done to Increase Nitrogen Use Efficiency and Ensure Global Food Security?', *Agriculture and the Nitrogen Cycle: Assessing the Impacts of Fertilizer Use on Food Production and the Environment* [Preprint].

Dobermann, A. and Fairhurst, T. (2000) *Rice: nutrient disorders & nutrient management*, *Handbook Series*.

Dr. Kadarmanto, M.A. (2023) 'Luas Panen dan Produksi Padi di Indonesia 2023 (Angka Tetap) - No. 2003Th. XXVII, 1 Maret 2024', *Luas Panen dan Produksi Padi di Indonesia 2023 (Angka Tetap) - No. 2003Th. XXVII, 1 Maret 2024*, 2023(1 Maret 2024), pp. 1–345. Available at: https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2024/03/01/2375/pada-2023-luas-panen-padi-mencapai-sekitar-10-21-juta-hektare-dengan-produksi-padi-sebesar-53-98-juta-ton-gabah-kering-giling-gkg-.html.

Edmeades, G.O. *et al.* (2004) 'Genomics and the physiologist: Bridging the gap between genes and crop response', in *Field Crops Research*. Available at: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2004.07.002.

El-Sharkawy, M.A. (2004) 'Cassava biology and physiology.', *Plant molecular biology* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1007/s11103-005-2270-7.

Fageria, N.K., Baligar, V.C. and Clark, R. (2006) *Physiology of Crop Production*, *Physiology of Crop Production*. Available at: https://doi.org/10.1201/9781482277807.

Flach, M. (1997) *Sago palm. Metroxylon sagu Rottb. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. 13*, *International Plant Genetic Resources Institute*.

Gao, C. (2021) 'Genome engineering for crop improvement and future agriculture', *Cell* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.01.005.

Giller, K.E. *et al.* (2009) 'Conservation agriculture and smallholder farming in Africa: The heretics' view', *Field Crops Research*

[Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.06.017.
Graham, P.H. and Vance, C.P. (2003) 'Legumes: Importance and constraints to greater use', *Plant Physiology* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1104/pp.017004.
Gummert, M. *et al.* (2019) *Sustainable Rice Straw Management*, *Sustainable Rice Straw Management*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32373-8.
Hayes, R.C. *et al.* (2022) 'The nature of spatial variability of four soil chemical properties and the implications for soil sampling', *Journal of Soils and Sediments* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1007/s11368-022-03285-x.
Howeler, R., Lutaladio, N., & Thomas, G. (2013) *Save and Grow: Cassava. A Guide to Sustainable Production Intensification. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.*, *Save and grow: cassava, a guide to sustainable production intensification*.
IFOAM (2012) 'The IFOAM Norms for Organic Production and Processing', *International Federation of Organic Agriculture Movements* [Preprint].
Johan Swinnen, S.F. (2020) *IFPRI Global Food Policy Report 2020: Building Inclusive Food Systems*, *Journal of Chemical Information and Modeling*.
Kaplinsky, R. and Morris, M. (2000) 'A handbook for value chain research. Prepared for the IDRC.', *Institute for Development Studies: Brighton, UK* [Preprint].
Kementerian Pertanian (2021) 'Rencana Strategis Kementerian Pertanian Tahun 2020-2024', *Salinan Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia* [Preprint].
Khan, M.U. and Rehman, T.U. (2019) 'Early trends, current status and future prospects of farm mechanization in Asia', *Agricultural Engineering International: CIGR Journal* [Preprint].
Khush, G.S. (1997) 'Origin, dispersal, cultivation and variation of rice', *Plant Molecular Biology* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1007/978-94-011-5794-0_3.
Klerkx, L., Jakku, E. and Labarthe, P. (2019) 'A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New

contributions and a future research agenda', *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1016/j.njas.2019.100315.

Larson, D.F., Anderson, J.R. and Varangis, P. (2004) 'Policies on managing risk in agricultural markets', *World Bank Research Observer* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1093/wbro/lkh022.

Las, I. *et al.* (2006) 'Isu Dan Pengelolaan Lingkungan Dalam Revitalisasi Pertanian', *Jurnal Litbang Pertanian* [Preprint].

Lobell, D.B., Schlenker, W. and Costa-Roberts, J. (2011) 'Climate trends and global crop production since 1980', *Science* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1126/science.1204531.

Lopez-Ridaura, S. (2022) 'Agroecology and Systems Analysis for Sustainable Agriculture', *Journal of Rural Problems* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.7310/arfe.58.31.

Low, J.W. *et al.* (2007) 'A food-based approach introducing orange-fleshed sweet potatoes increased vitamin A intake and serum retinol concentrations in young children in rural Mozambique', *Journal of Nutrition* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1093/jn/137.5.1320.

Mejaya, M.J., Azrai, M. and Iriany, R.N. (2007) 'Pembentukan Varietas Unggul Jagung Bersari Bebas', *Jagung , Teknik Produksi dan Pengembangannya* [Preprint].

Mew, T.W. *et al.* (2004) 'Looking ahead in rice disease research and management', *Critical Reviews in Plant Sciences* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1080/07352680490433231.

Moechnig, M.J. *et al.* (2003) 'Empirical corn yield loss estimation from common lambsquarters (Chenopodium album) and giant foxtail (Setaria faberi) in mixed communities', *Weed Science* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1614/0043-1745(2003)051[0386:ecylef]2.0.co;2.

Murjani (2025) 'Pengelolaan Lahan Rawa untuk Pertanian Berkelanjutan di Tengah Tantangan Perubahan Iklim Global', *Journal Scientific of Mandalika (JSM)* [Preprint].

Muto, M. and Yamano, T. (2009) 'The Impact of Mobile Phone Coverage Expansion on Market Participation: Panel Data

Evidence from Uganda', *World Development* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2009.05.004.
Nweke, F. (2004) 'New Challenges In The Cassava Transformation In Nigeria Nad Ghana', *Environment and Production Technology Division International Food Policy Research Institute* [Preprint].
Paoletti, M.G. (2005) 'Ecological Engineering for Pest Management—Advances in Habitat Manipulation for Arthropods', *Economic Botany* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1663/0013-0001(2005)059[0299:dfabre]2.0.co;2.
Pingali, P.L. (2012) 'Green revolution: Impacts, limits, andthe path ahead', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1073/pnas.0912953109.
Pixley, K. V. *et al.* (2022) 'Genome-edited crops for improved food security of smallholder farmers', *Nature Genetics* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1038/s41588-022-01046-7.
Pretty, J. *et al.* (2018) 'Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification', *Nature Sustainability* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1038/s41893-018-0114-0.
Pretty, J. and Bharucha, Z.P. (2015) 'Integrated pest management for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa', *Insects* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.3390/insects6010152.
Rahman, A. (2023) 'Implementing Agricultural Policies: Driving Sustainable Growth in the Farming Sector in Indonesia', *Jurnal Ilmiah Ilmu Administrasi Publik* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.26858/jiap.v13i1.50352.
Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, I.I.J. (2024) 'UPAYA FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO) TERKAIT KETAHANAN PANGAN DI WILAYAH SUB-SAHARA AFRIKA 2019-2024', 2, pp. 306–312.
Schloemer, C.M., Graham, S.H. and Lawrence, K.S. (2025) 'Sweetpotato pest challenges and management options',

Journal of Integrated Pest Management [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1093/jipm/pmaf003.

Sembiring, H. (2008) 'Kebijakan penelitian dan rangkuman hasil penelitian BB Padi dalam mendukung peningkatan produksi beras nasional', *… hasil penelitian padi menunjang P2BN. Balai …* [Preprint].

Shepherd, A.W. (2006) 'Approaches to Linking Producers to Markets: a review of experiences to date', *Agricultural Management, Marketing and Finance Occasional Paper* [Preprint].

Singh, B., Jasrotia, P. and Crespo-Herreraa, L. (2022) 'Breeding for Aphid Resistance in Wheat: Status and Future Prospects', in *New Horizons in Wheat and Barley Research: Global Trends, Breeding and Quality Enhancement*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-16-4449-8_16.

Soblia and Tsania, E. (2009) 'Tingkat Ketahanan Pangan Rumah Tangga, Kondisi Lingkungan, Morbiditas, dan Hubungannya dengan Status Gizi Anak Balita Pada Rumah tangga di Daerah Rawan Pangan Banjarnegara, Jawa Tengah.', *Scientific Repository* [Preprint].

Soekartawi (2002) 'Prinsip Dasar Ekonomi Pertanian : Teori dan Aplikasinya', *Agribisnis* [Preprint].

Stoop, W.A., Uphoff, N. and Kassam, A. (2002) 'A review of agricultural research issues raised by the system of rice intensification (SRI) from Madagascar: Opportunities for improving farming systems for resource-poor farmers', *Agricultural Systems* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1016/S0308-521X(01)00070-1.

Subhan, S., Kusmiah, N. and Siadina, S. (2023) 'EFEKTIVITAS SISTEM TANAM JAJAR LEGOWO 2 : 1 TERHADAP PENDAPATAN PETANI PADI SAWAH DI KELOMPOK TANI SIRANNUANG DESA BOTTO KECAMATAN CAMPALAGIAN', *Jurnal Agroterpadu* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.35329/ja.v2i3.4441.

Sudaryanto, T. and Swastika, D. (2007) 'Ekonomi Kedelai di Indonesia', *Pusat Analisis Sosial Ekonomi dan Kebijakan Pertanian* [Preprint].

Suprihatno, B. (2009) *Deskripsi varietas padi*, *Badan Penelitian dan*

Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian.
Surajit K. De Datta (1981) 'Principles and practices of rice production', *The International Rice Research Institute Los Baños, The Philippines* [Preprint].
Surmaini, E., Runtunuwu, E. and Las, I. (2015) 'Upaya sektor pertanian dalam menghadapi perubahan iklim', *Jurnal Penelitian* [Preprint].
Suryana, A. (2014) 'Menuju Ketahanan Pangan Indonesia Berkelanjutan 2025: Tantangan dan Penanganannya', *Forum penelitian Agro Ekonomi* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.21082/fae.v32n2.2014.123-135.
'Sweet potato: an untapped food resource' (1992) *Choice Reviews Online* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.5860/choice.30-2081.
The State of Food Security and Nutrition in the World 2022 (2022) *The State of Food Security and Nutrition in the World 2022*. Available at: https://doi.org/10.4060/cc0639en.
The State of Food Security and Nutrition in the World 2023 (2023) *The State of Food Security and Nutrition in the World 2023*. Available at: https://doi.org/10.4060/cc3017en.
Tilman, D. *et al.* (2011) 'Global food demand and the sustainable intensification of agriculture', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108.
Timmer, C.P. (2004) 'The road to pro-poor growth: The Indonesian experience in regional perspective', *Bulletin of Indonesian Economic Studies* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1080/0007491042000205277.
Tollenaar, M. and Lee, E.A. (2002) 'Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize', in *Field Crops Research*. Available at: https://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00024-2.
Troyer, A.F. (2004) 'Background of U.S. hybrid corn II: Breeding, climate, and food', *Crop Science* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.2135/cropsci2004.3700.
Uphoff, N., Kassam, A. and Harwood, R. (2011) 'SRI as a methodology for raising crop and water productivity: Productive adaptations in rice agronomy and irrigation water

management', *Paddy and Water Environment* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1007/s10333-010-0224-4.
Willett, W. *et al.* (2019) 'Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems', *The Lancet* [Preprint]. Available at: https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4.
Willey R W (1979) 'Intercropping-its importance and research needs: Part 1. Competition and yield advantages', *Field crop abstracts* [Preprint].
Yoshida, S. (1981) 'Fundamentals of Rice Crop Science', *Fundamentals of rice crop science* [Preprint].
Zhang, N., Wang, M. and Wang, N. (2002) 'Precision agriculture - A worldwide overview', in *Computers and Electronics in Agriculture*. Available at: https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00096-0.
Zimdahl, R.L. and Basinger, N.T. (2024) *Fundamentals of Weed Science, Sixth Edition*, *Fundamentals of Weed Science, Sixth Edition* . Available at: https://doi.org/10.1016/C2022-0-00489-X.

BAB 2
PRINSIP DASAR BUDIDAYA TANAMAN PANGAN DENGAN PENDEKATAN SUSTAINABLE AGRICULTURE

Tanaman pangan merupakan komponen strategis dalam pembangunan pertanian karena berperan sebagai sumber utama pemenuhan kebutuhan pangan masyarakat. Komoditas seperti padi, jagung, kedelai, ubi kayu, dan berbagai jenis kacang-kacangan memiliki kontribusi besar terhadap ketahanan pangan, stabilitas ekonomi, serta kesejahteraan petani. Seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk, perubahan iklim, degradasi lahan, dan keterbatasan sumber daya alam, sistem budidaya tanaman pangan dituntut untuk tidak hanya mampu meningkatkan produktivitas, tetapi juga menjaga keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan sosial ekonomi masyarakat.

Selama beberapa dekade terakhir, praktik budidaya yang berorientasi pada peningkatan hasil produksi sering kali mengandalkan penggunaan input eksternal secara intensif, seperti pupuk kimia (Emmerson *et al.*, 2016), pestisida sintetis, dan eksploitasi sumber daya lahan yang berlebihan. Meskipun pendekatan tersebut berhasil meningkatkan produksi dalam jangka pendek, namun berbagai dampak negatif karena penggunaan jangka panjang mulai muncul, antara lain penurunan kesuburan tanah, pencemaran lingkungan (Pereira *et al.*, 2023), hilangnya keanekaragaman hayati, serta meningkatnya kerentanan sistem pertanian terhadap perubahan iklim (Pereira *et al.*, 2025). Kondisi ini mendorong perlunya transformasi menuju sistem pertanian yang lebih berkelanjutan.

Pendekatan *Sustainable Agriculture* atau pertanian berkelanjutan hadir sebagai solusi untuk menjawab tantangan tersebut. Pertanian berkelanjutan merupakan sistem produksi yang mampu memenuhi kebutuhan pangan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya. Konsep ini menekankan keseimbangan antara aspek ekonomi melalui produktivitas tanaman, kelestarian lingkungan, dan keberlanjutan sosial ekonomi petani. Dalam perspektif global, pendekatan ini sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan (*Sustainable Development Goals* / SDGs), khususnya pada aspek ketahanan pangan, pengelolaan sumber daya alam, dan adaptasi terhadap perubahan iklim (Mrabet, 2023)

Menurut pendekatan yang dikembangkan oleh Food and Agriculture Organization, pertanian berkelanjutan didasarkan pada lima prinsip utama. Prinsip-prinsip tersebut menjadi landasan penting dalam pengelolaan budidaya tanaman pangan yang efisien, ramah lingkungan, dan berorientasi jangka panjang. 5 Prinsip tersebut sebagai berikut yaitu:

1. Meningkatkan produktivitas, lapangan kerja, dan nilai tambah dalam sistem pangan.
2. Melindungi dan meningkatkan sumber daya alam.
3. Meningkatkan taraf hidup dan mendorong pertumbuhan ekonomi inklusif.
4. Meningkatkan ketahanan masyarakat, komunitas, dan ekosistem.
5. Menyesuaikan tata kelola dengan tantangan baru

Bab ini disusun untuk memberikan pemahaman mendasar mengenai prinsip-prinsip budidaya tanaman pangan dengan perspektif pertanian berkelanjutan. Pembahasan dimulai dari konsep dasar tanaman pangan, pengelolaan sumber daya lahan dan air, penggunaan benih unggul, pemupukan berimbang, pengendalian organisme pengganggu tanaman secara terpadu, hingga penerapan teknologi dan inovasi yang mendukung keberlanjutan sistem produksi.

2.1 Konsep *Sustainable Agriculture*

Sustainable Agriculture atau pertanian berkelanjutan merupakan sistem pertanian yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan pangan, pakan, dan bahan baku saat ini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya. Keberhasilan penerapan *Sustainable Agriculture* didasarkan pada keseimbangan tiga pilar utama, yaitu lingkungan, ekonomi, dan sosial. Ketiga pilar tersebut merupakan sistem holistik yang saling berkaitan dan harus diterapkan secara terpadu dalam setiap kegiatan budidaya tanaman pangan (Kamakaula, 2024).

2.1.1 Aspek Lingkungan (*Environmental Sustainability*)

Aspek lingkungan bertujuan menjaga kualitas dan keberlanjutan sumber daya alam yang digunakan dalam proses produksi pertanian. Tanah, air, udara, dan keanekaragaman hayati merupakan sumber daya utama yang harus dikelola secara bijaksana agar tetap produktif dalam jangka panjang. Praktik pertanian berkelanjutan mendorong penggunaan pupuk dan pestisida secara tepat, konservasi tanah dan air, pemanfaatan bahan organik, serta pelestarian organisme yang berperan penting dalam ekosistem pertanian. Pengelolaan lingkungan yang baik dapat mencegah degradasi lahan, erosi, pencemaran air, serta hilangnya biodiversitas yang menjadi penopang produktivitas pertanian. Dalam budidaya tanaman pangan, penerapan rotasi tanaman (Wulandari, Dewi & Hidayat, 2023), penggunaan mulsa (Khose *et al.*, 2023), penanaman tanaman penutup tanah (Salisu *et al.*, 2025), dan pengendalian hama terpadu (Thakur, 2025) merupakan contoh upaya menjaga keseimbangan ekosistem pertanian.

2.1.2 Aspek Ekonomi (*Economic Sustainability*)

Keberlanjutan ekonomi menekankan bahwa sistem pertanian harus mampu memberikan keuntungan yang layak bagi petani dan pelaku usaha pertanian (Munshi *et al.*, 2025). Produksi yang tinggi tidak akan berkelanjutan apabila biaya produksi terus meningkat atau pendapatan petani tidak mampu memenuhi kebutuhan hidupnya. Melalui pendekatan *Sustainable Agriculture*, petani didorong untuk meningkatkan efisiensi penggunaan input produksi,

mengoptimalkan sumber daya lokal, peningkatan peluang pasar, dan integrasi dengan agrowisata (Raj *et al.*, 2025), menerapkan inovasi yang dapat meningkatkan produktivitas serta nilai tambah hasil pertanian. Pertanian yang berkelanjutan juga harus mampu menciptakan peluang usaha, meningkatkan daya saing produk, serta memperkuat akses petani terhadap teknologi dan sumber pembiayaan. Dengan demikian, keberlanjutan ekonomi menjadi faktor penting dalam menjaga motivasi petani untuk terus berproduksi.

2.1.3 Aspek Sosial (*Social Sustainability*)

Keberlanjutan sosial berkaitan dengan peningkatan kualitas hidup petani dan masyarakat pedesaan secara adil dan inklusif. Sistem pertanian yang berkelanjutan harus mampu memberikan manfaat yang merata, memperhatikan hak-hak petani, menciptakan kesempatan kerja, serta memperkuat kelembagaan masyarakat. Partisipasi aktif petani dalam pengambilan keputusan, akses terhadap pendidikan dan penyuluhan, kesetaraan gender (Bhandari, Paudel, & Upadhaya, 2026) , serta perlindungan terhadap kesehatan dan keselamatan kerja merupakan bagian penting dari aspek sosial pertanian berkelanjutan. Dalam budidaya tanaman pangan, keberlanjutan sosial dapat diwujudkan melalui penguatan kelompok tani, pengembangan kemitraan usaha, pemberdayaan masyarakat lokal, dan pelestarian kearifan lokal (Gamage *et al.*, 2024).

2.2 Karakteristik Tanaman Pangan

Tanaman pangan merupakan kelompok tanaman yang dibudidayakan untuk menghasilkan bahan makanan sebagai sumber utama energi, protein, vitamin, mineral, dan zat gizi lainnya bagi manusia. Tanaman pangan memiliki peran strategis dalam mendukung ketahanan pangan nasional karena menjadi sumber bahan pangan pokok bagi sebagian besar masyarakat. Dalam sistem pertanian berkelanjutan, tanaman pangan tidak hanya dipandang sebagai komoditas ekonomi, tetapi juga sebagai bagian dari agroekosistem yang harus dikelola secara bijaksana agar mampu memberikan manfaat jangka panjang bagi lingkungan dan

masyarakat. Berdasarkan karakteristik dan pemanfaatannya, tanaman pangan dapat diklasifikasikan sebagai berikut.

2.2.1 Tanaman Serealia

Serealia merupakan kelompok tanaman penghasil biji yang menjadi sumber utama karbohidrat bagi manusia. Kelompok ini umumnya berasal dari famili Poaceae (Gramineae). Contoh tanaman pangan yang masuk kedalam kelompok serealia, antara lain Padi (*Oryza sativa* L.), Jagung (*Zea mays* L.), Gandum (*Triticum aestivum* L.), Sorgum (*Sorghum bicolor* L.).

2.2.2 Tanaman Kacang-kacangan (Legum)

Kelompok legum merupakan tanaman yang menghasilkan biji dengan kandungan protein tinggi. Akar tanaman ini memiliki kemampuan bersimbiosis dengan bakteri penambat nitrogen sehingga berperan penting dalam meningkatkan kesuburan tanah. Contoh tanaman legum yang masuk ke dalam komoditas pangan, yaitu Kedelai (*Glycine max* L.), Kacang tanah (*Arachis hypogaea* L.), Kacang hijau (*Vigna radiata* L.), dan Kacang tunggak (*Vigna unguiculata* L.).

2.2.3 Tanaman Umbi-umbian

Umbi-umbian merupakan tanaman yang menyimpan cadangan makanan pada bagian akar, batang, atau daunnya. Kandungan utama cadangan makanan yang disimpan adalah karbohidrat dalam bentuk pati. Oleh karena itu, umbi-umbian berperan penting sebagai sumber karbohidrat alternatif dan memiliki daya adaptasi yang tinggi terhadap berbagai kondisi lingkungan. Contoh tanaman yang termasuk ke dalam umbi-umbian adalah Ubi kayu / singkong (*Manihot esculenta* Crantz), Ubi jalar (*Ipomoea batatas* L.), Talas (*Colocasia esculenta* L.), dan Garut (*Maranta arundinacea* L.)

2.3 Pengelolaan Lahan Berkelanjutan

Tanah merupakan lapisan permukaan bumi yang terbentuk melalui proses pelapukan batuan dan aktivitas organisme dalam jangka waktu yang panjang. Tanah berfungsi sebagai media tumbuh tanaman sekaligus tempat berlangsungnya berbagai proses fisik,

kimia, dan biologis yang mendukung pertumbuhan tanaman. Dalam budidaya tanaman pangan, tanah memiliki fungsi utama sebagai:

1. Penyangga dan tempat berkembangnya akar tanaman.
2. Tempat penyimpan unsur hara dan air (Abdul Khalil *et al.*, 2015)
3. Habitat organisme tanah (Chen *et al.*, 2024)
4. Tempat berlangsungnya siklus unsur hara (Hatfield, Sauer, & Cruse, 2017)

2.3.1 Krakteristik dan Kesuburan Tanah

Dalam pendekatan *Sustainable Agriculture* atau pertanian berkelanjutan, tanah dipandang sebagai ekosistem hidup yang harus dijaga kualitas dan produktivitasnya agar mampu mendukung produksi pangan secara berkelanjutan. Karakteristik tanah mencakup sifat fisik, kimia, dan biologi yang memengaruhi kemampuan tanah dalam mendukung pertumbuhan tanaman (Abdul Khalil *et al.*, 2015). Pemahaman terhadap karakteristik tanah sangat penting dalam penerapan budidaya tanaman pangan berkelanjutan karena menentukan produktivitas lahan, efisiensi penggunaan input, serta keberlanjutan ekosistem pertanian.

Dari aspek fisik, karakteristik tanah dapat diamati melalui tekstur, stabilitas agregat, porositas, kapsitas menahan air, kedalaman efektif tanah (Crop Nutrition Laboratory Services, 2026), dan struktur tanah. Tekstur tanah menunjukkan perbandingan kandungan pasir, debu, dan liat yang memengaruhi kemampuan tanah dalam menyimpan air dan unsur hara. Tanah yang didominasi oleh pasir umumnya memiliki drainase yang baik, tetapi kurang mampu menahan air dan nutrisi. Sebaliknya, tanah berliat memiliki kapasitas penyimpanan air yang tinggi, namun sering kali memiliki aerasi yang kurang baik. Struktur tanah yang remah dan gembur sangat diharapkan dalam budidaya tanaman karena mampu menyediakan ruang yang cukup bagi pergerakan air, udara, dan perkembangan akar tanaman. Selain itu, tanah dengan porositas yang baik akan mendukung keseimbangan antara ketersediaan air dan oksigen yang diperlukan dalam proses fisiologis tanaman (Queensland Government, 2026)

Dari sisi kimia, karakteristik tanah berkaitan dengan kandungan unsur hara, tingkat keasaman (pH), kapasitas tukar

kation, serta kandungan bahan organik. Unsur hara merupakan komponen penting yang dibutuhkan tanaman untuk melaksanakan berbagai proses metabolisme dan pertumbuhan. Ketersediaan unsur hara dalam tanah sangat dipengaruhi oleh pH tanah. Sebagian besar tanaman pangan dapat tumbuh optimal pada kondisi tanah yang memiliki pH mendekati netral. pH memfasilitasi dekomposisi bahan organik yang menyebabkan peningkatan keberadaan fosfor, mangan, dan kalsium dalam tanah, juga memengaruhi sifat fisik tanah (Diaz-Gonzalez *et al.*, 2022). Selain itu, kapasitas tukar kation merupakan indikator kemampuan tanah dalam menyimpan dan menyediakan unsur hara bagi tanaman. Tanah dengan kapasitas tukar kation yang tinggi umumnya lebih mampu mempertahankan ketersediaan nutrisi sehingga lebih produktif untuk kegiatan budidaya (Patra *et al.*, 2024)

Karakteristik biologis tanah tidak kalah penting dibandingkan sifat fisik dan kimianya. Karakter ini memainkan peran kunci dalam keberlanjutan tanah dengan menjaga fungsi-fungsi penting kesehatan tanah, seperti dekomposisi bahan organik, siklus nutrisi, degradasi polutan tanah, dan pembentukan stabilitas struktur tanah (Diaz-Gonzalez *et al.*, 2022). Tanah yang sehat mengandung beragam organisme hidup, mulai dari mikroorganisme seperti bakteri, fungi, dan aktinomisetes hingga fauna tanah seperti cacing dan serangga. Organisme-organisme tersebut berperan dalam proses dekomposisi bahan organik, daur ulang unsur hara, pembentukan agregat tanah, serta pengendalian alami terhadap beberapa patogen tanah. Keberadaan mikroorganisme yang aktif menunjukkan bahwa tanah memiliki kehidupan biologis yang baik dan mampu mendukung proses-proses ekologis yang penting bagi pertumbuhan tanaman.

Karakteristik tanah yang baik akan berkontribusi terhadap tingkat kesuburan tanah. Kesuburan tanah dapat diartikan sebagai kemampuan tanah dalam menyediakan unsur hara, air, udara, dan kondisi lingkungan yang sesuai bagi pertumbuhan tanaman secara optimal. Kesuburan tanah tidak hanya ditentukan oleh jumlah unsur hara yang terkandung di dalamnya, tetapi juga oleh kemampuan tanah dalam menyediakan unsur hara tersebut dalam bentuk yang dapat diserap tanaman. Dengan kata lain, tanah yang kaya akan unsur

hara belum tentu subur apabila unsur-unsur tersebut tidak tersedia atau tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Oleh karena itu, kesuburan tanah merupakan hasil interaksi yang kompleks antara faktor fisik, kimia, dan biologi tanah (Abbott, 2024).

Tingkat kesuburan tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor, di antaranya kandungan bahan organik, ketersediaan unsur hara, reaksi tanah, aktivitas organisme tanah, serta praktik pengelolaan lahan yang diterapkan. Bahan organik memiliki peran yang sangat strategis karena mampu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air, menyediakan unsur hara secara bertahap, serta menjadi sumber energi bagi mikroorganisme. Semakin tinggi kandungan bahan organik dalam tanah, umumnya semakin baik pula kualitas dan kesuburan tanah tersebut. Di sisi lain, penggunaan lahan secara intensif tanpa diimbangi dengan upaya pengembalian bahan organik dapat menyebabkan penurunan kesuburan tanah secara bertahap. Kondisi ini sering ditemukan pada lahan pertanian yang terlalu bergantung pada pupuk kimia dan kurang memperhatikan pengelolaan residu tanaman maupun bahan organik lainnya.

Dalam konteks pertanian berkelanjutan, pengelolaan kesuburan tanah tidak hanya berorientasi pada peningkatan hasil panen dalam jangka pendek, tetapi juga pada pemeliharaan kualitas tanah untuk jangka panjang. Pendekatan ini menekankan pentingnya pemanfaatan sumber daya lokal, penggunaan pupuk organik, penerapan rotasi tanaman, penanaman tanaman penutup tanah, serta konservasi tanah dan air. Berbagai praktik tersebut bertujuan untuk menjaga keseimbangan ekosistem tanah sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan unsur hara. Dengan menjaga kesuburan tanah secara berkelanjutan, produktivitas tanaman pangan dapat dipertahankan bahkan ditingkatkan tanpa menimbulkan kerusakan lingkungan yang dapat mengancam keberlanjutan sistem pertanian di masa depan.

Karakteristik dan kesuburan tanah merupakan dua aspek yang tidak dapat dipisahkan dalam budidaya tanaman pangan. Karakteristik fisik, kimia, dan biologi tanah menentukan kemampuan tanah dalam mendukung pertumbuhan tanaman, sedangkan kesuburan tanah mencerminkan kapasitas tanah dalam

menyediakan kebutuhan dasar bagi tanaman secara optimal. Pengelolaan tanah yang tepat melalui prinsip-prinsip pertanian berkelanjutan akan menjaga kualitas tanah sebagai sumber daya utama produksi pangan, sekaligus memastikan bahwa lahan pertanian tetap produktif dan lestari bagi generasi yang akan datang.

2.3.2 Pengolohan Tanah yang Ramah Lingkungan

Pengolahan tanah merupakan salah satu tahapan penting dalam budidaya tanaman pangan karena berfungsi untuk menciptakan kondisi lahan yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Melalui pengolahan tanah, lapisan tanah menjadi lebih gembur sehingga memudahkan penetrasi akar, meningkatkan infiltrasi air, memperbaiki aerasi, serta membantu pengendalian gulma pada fase awal pertumbuhan tanaman. Namun demikian, praktik pengolahan tanah yang dilakukan secara berlebihan dan tidak mempertimbangkan aspek konservasi lingkungan dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti kerusakan struktur tanah, meningkatnya laju erosi, penurunan kandungan bahan organik, serta berkurangnya aktivitas organisme tanah yang berperan dalam menjaga kesuburan lahan. Oleh karena itu, dalam sistem pertanian berkelanjutan diperlukan pendekatan pengolahan tanah yang ramah lingkungan guna menjaga produktivitas lahan tanpa mengorbankan kualitas sumber daya tanah untuk jangka panjang.

Pengolahan tanah yang ramah lingkungan merupakan suatu pendekatan pengelolaan lahan yang bertujuan menciptakan kondisi tanah yang optimal bagi pertumbuhan tanaman dengan gangguan seminimal mungkin terhadap ekosistem tanah. Pendekatan ini didasarkan pada prinsip bahwa tanah merupakan sumber daya yang harus dilindungi dan dipelihara, bukan sekadar media tanam yang dapat dieksploitasi secara terus-menerus. Dalam praktiknya, pengolahan tanah yang ramah lingkungan mengutamakan upaya menjaga struktur tanah, mempertahankan kandungan bahan organik, meningkatkan aktivitas biologi tanah, serta mengurangi kehilangan lapisan tanah akibat erosi.

Salah satu konsep utama dalam pengolahan tanah ramah lingkungan adalah pengolahan tanah minimum (*minimum tillage*).

Sistem ini dilakukan dengan mengurangi intensitas dan frekuensi pengolahan tanah dibandingkan metode konvensional. Pada sistem pengolahan tanah minimum, tanah hanya diolah pada bagian tertentu yang diperlukan untuk penanaman, sementara sebagian besar permukaan tanah tetap dipertahankan dalam kondisi alami. Dengan berkurangnya gangguan mekanis terhadap tanah, struktur tanah dapat terjaga lebih baik sehingga kemampuan tanah dalam menyimpan air dan unsur hara tetap optimal. Selain itu, aktivitas mikroorganisme dan fauna tanah juga dapat berlangsung secara lebih stabil karena habitatnya tidak mengalami kerusakan akibat pembalikan tanah yang berlebihan.

Selain pengolahan tanah minimum, konsep tanpa olah tanah (*zero tillage* atau *no tillage*) juga semakin banyak diterapkan dalam sistem pertanian berkelanjutan. Pada metode ini, tanah tidak mengalami pengolahan mekanis sebelum penanaman. Benih ditanam secara langsung pada lahan yang masih tertutup sisa-sisa tanaman dari musim sebelumnya. Residu tanaman yang dibiarkan menutupi permukaan tanah berfungsi sebagai mulsa alami yang mampu melindungi tanah dari pukulan langsung air hujan, mengurangi penguapan air, menekan pertumbuhan gulma, serta meningkatkan kandungan bahan organik seiring proses dekomposisinya. Sistem tanpa olah tanah terbukti efektif dalam mengurangi erosi dan mempertahankan kualitas tanah pada berbagai kondisi agroekosistem.

Penggunaan bahan organik juga menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari pengolahan tanah yang ramah lingkungan. Penambahan kompos, pupuk kandang, pupuk hijau, maupun sisa tanaman ke dalam tanah dapat memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah secara bersamaan. Bahan organik membantu meningkatkan agregasi tanah sehingga struktur tanah menjadi lebih stabil dan tidak mudah mengalami pemadatan. Selain itu, bahan organik berfungsi sebagai sumber energi bagi mikroorganisme tanah yang berperan dalam proses dekomposisi dan penyediaan unsur hara bagi tanaman. Dengan meningkatnya kandungan bahan organik, kemampuan tanah dalam menyimpan air dan unsur hara juga akan semakin baik sehingga kebutuhan tanaman dapat terpenuhi secara lebih efisien.

Pengolahan tanah yang ramah lingkungan juga memperhatikan aspek konservasi tanah dan air. Pada lahan yang memiliki kemiringan tertentu, pengolahan tanah sebaiknya dilakukan mengikuti garis kontur untuk mengurangi kecepatan aliran permukaan dan meminimalkan kehilangan tanah akibat erosi. Pembuatan guludan, terasering, saluran drainase yang tepat, serta penggunaan tanaman penutup tanah merupakan beberapa teknik konservasi yang dapat diterapkan untuk menjaga stabilitas lahan. Upaya ini tidak hanya bermanfaat dalam mempertahankan lapisan tanah yang subur, tetapi juga membantu meningkatkan efisiensi pemanfaatan air hujan dan mengurangi risiko banjir maupun sedimentasi pada wilayah di sekitarnya.

Keberhasilan pengolahan tanah yang ramah lingkungan juga sangat dipengaruhi oleh pemilihan alat dan mesin pertanian yang sesuai. Penggunaan alat berat secara berlebihan dapat menyebabkan pemadatan tanah, terutama pada kondisi tanah yang basah. Tanah yang padat memiliki porositas rendah sehingga menghambat pergerakan air, udara, dan akar tanaman. Oleh karena itu, penggunaan alat pengolahan tanah harus disesuaikan dengan kondisi lahan dan kebutuhan budidaya agar tidak menimbulkan kerusakan fisik pada tanah. Pengelolaan lalu lintas alat dan mesin pertanian secara terkendali juga dapat membantu mengurangi risiko pemadatan tanah dalam jangka panjang.

Dalam perspektif pertanian berkelanjutan, pengolahan tanah yang ramah lingkungan bukan hanya bertujuan untuk meningkatkan hasil panen pada satu musim tanam, tetapi juga menjaga fungsi ekologis tanah agar tetap produktif dari waktu ke waktu. Tanah yang dikelola secara bijaksana akan memiliki struktur yang lebih baik, kandungan bahan organik yang tinggi, aktivitas biologi yang sehat, serta kemampuan yang lebih besar dalam menyediakan air dan unsur hara bagi tanaman. Dengan demikian, penerapan pengolahan tanah yang ramah lingkungan menjadi salah satu strategi penting dalam mewujudkan sistem produksi tanaman pangan yang produktif, efisien, dan berkelanjutan, sekaligus mendukung pelestarian sumber daya alam bagi generasi mendatang.

2.4 Pengelolaan Benih dan Varietas Unggul

Benih merupakan titik awal keberhasilan budidaya tanaman pangan (Altuner, 2018). Seluruh proses budidaya, mulai dari pengolahan lahan, pemupukan, pengairan, hingga pengendalian organisme pengganggu tanaman, tidak akan memberikan hasil optimal apabila benih yang digunakan memiliki mutu yang rendah. Benih merupakan embrio tanaman yang masih hidup dan memiliki kemampuan untuk tumbuh menjadi individu baru apabila berada pada kondisi lingkungan yang sesuai. Di dalam benih terkandung informasi genetik yang menentukan berbagai karakter tanaman, seperti potensi hasil, umur panen, ukuran dan kualitas produk, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta toleransi terhadap cekaman lingkungan. Oleh karena itu, benih sering disebut sebagai pembawa potensi genetik yang menentukan kemampuan tanaman untuk tumbuh, berkembang, dan menghasilkan panen yang maksimal (Maalouf, Ahmed, & Bishaw, 2021)

Dalam sistem pertanian modern, benih tidak hanya berfungsi sebagai bahan tanam, tetapi juga sebagai teknologi yang mampu meningkatkan produktivitas, efisiensi penggunaan sumber daya, dan ketahanan tanaman terhadap berbagai cekaman lingkungan. Pada pendekatan *Sustainable Agriculture*, penggunaan benih bermutu menjadi salah satu strategi utama untuk meningkatkan produksi pangan secara berkelanjutan tanpa harus bergantung pada peningkatan input yang berlebihan. Penggunaan benih bermutu mampu meningkatkan keseragaman pertumbuhan tanaman di lapangan. Keseragaman ini penting karena memudahkan pengelolaan budidaya, mulai dari pemupukan, pengairan, hingga penentuan waktu panen (Ali *et al.*, 2022). Tanaman yang tumbuh seragam juga lebih mampu bersaing dengan gulma dan memiliki respons yang lebih baik terhadap perlakuan budidaya. Benih yang memiliki daya tumbuh tinggi, vigor yang baik, serta adaptif terhadap kondisi lingkungan setempat akan mampu memanfaatkan unsur hara, air, dan cahaya secara lebih efisien sehingga mendukung terciptanya sistem budidaya yang produktif sekaligus ramah lingkungan (Singh, 2016).

2.4.1 Karakteristik Benih Bermutu

Pemilihan benih bermutu dan varietas unggul yang tepat juga menjadi langkah penting dalam menghadapi tantangan pertanian masa depan. Perubahan iklim, munculnya organisme pengganggu tanaman baru, degradasi lahan, serta meningkatnya kebutuhan pangan menuntut petani untuk menggunakan varietas yang memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik. Mutu benih merupakan kombinasi dari kualitas genetik, fisik, fisiologis, dan kesehatan benih (Rajesh, Mrudhula, & Chandra, 2025). Keempat aspek tersebut menentukan kemampuan benih untuk berkecambah, tumbuh, dan menghasilkan tanaman yang produktif.

Mutu genetik berkaitan dengan kemurnian varietas yang digunakan. Benih harus berasal dari varietas yang jelas identitasnya dan sesuai dengan karakter yang diharapkan. Kemurnian genetik sangat penting karena akan menentukan keseragaman tanaman dan konsistensi hasil panen (Smith & Register, 1998). Mutu fisik mencerminkan kondisi fisik benih yang meliputi ukuran, bentuk, warna, kebersihan, dan tingkat kerusakan. Benih yang baik umumnya memiliki ukuran seragam, tidak tercampur dengan varietas lain, bebas dari kotoran, serta tidak mengalami kerusakan akibat serangan hama atau perlakuan pascapanen yang kurang tepat. Mutu fisiologis berhubungan dengan kemampuan benih untuk berkecambah dan tumbuh secara normal. Benih yang memiliki daya kecambah tinggi akan menghasilkan populasi tanaman yang optimal di lapangan. Selain itu, vigor benih yang tinggi juga memungkinkan tanaman tumbuh lebih cepat dan lebih tahan terhadap kondisi lingkungan yang kurang menguntungkan (Costa *et al.*, 2021). Mutu kesehatan berkaitan dengan keberadaan patogen yang dapat terbawa melalui benih. Benih yang sehat harus bebas dari infeksi penyakit yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman maupun menjadi sumber penyebaran penyakit di lapangan. Dalam praktik budidaya tanaman, petani perlu memperhatikan sumber benih yang digunakan. Benih yang berasal dari produsen resmi dan telah melalui proses sertifikasi umumnya memiliki jaminan mutu yang lebih baik dibandingkan benih yang asal-usulnya tidak jelas.

2.4.2 Varietas Unggul dan Perannya dalam Pertanian Berkelanjutan

Varietas unggul adalah varietas yang memiliki satu atau lebih kelebihan dibandingkan varietas lain, baik dari segi produktivitas, kualitas hasil, ketahanan terhadap hama dan penyakit, maupun kemampuan beradaptasi terhadap kondisi lingkungan tertentu. Pengembangan varietas unggul merupakan hasil dari kegiatan pemuliaan tanaman yang bertujuan memperbaiki sifat-sifat tanaman sesuai kebutuhan pengguna. Dalam sistem budidaya tanaman pangan, penggunaan varietas unggul telah terbukti menjadi salah satu faktor utama peningkatan produksi, namun pada pendekatan *Sustainable Agriculture*, keberhasilan varietas unggul tidak hanya diukur dari tingginya hasil panen, tetapi juga dari kemampuannya mendukung efisiensi penggunaan sumber daya dan ketahanan agroekosistem.

Varietas yang tahan terhadap serangan penyakit, misalnya, dapat mengurangi ketergantungan petani terhadap pestisida kimia. Demikian pula varietas yang toleran terhadap kekeringan mampu mempertahankan produktivitas pada kondisi ketersediaan air yang terbatas. Karakter-karakter tersebut menjadi semakin penting di tengah meningkatnya tekanan perubahan iklim dan degradasi sumber daya alam. Selain produktivitas, pemilihan varietas juga harus mempertimbangkan kesesuaian dengan kondisi agroekologi setempat. Varietas yang memberikan hasil tinggi di suatu wilayah belum tentu menunjukkan performa yang sama di wilayah lain. Oleh karena itu, pemilihan varietas perlu disesuaikan dengan kondisi iklim, jenis tanah, ketersediaan air, serta sistem budidaya yang diterapkan.

2.4.3 Benih Lokal dan Pelestarian Sumber Daya Genetik

Di tengah pesatnya pengembangan varietas unggul modern, keberadaan benih lokal tetap memiliki nilai penting dalam pembangunan pertanian berkelanjutan. Benih lokal merupakan varietas yang telah dibudidayakan dan beradaptasi secara alami pada suatu wilayah dalam jangka waktu yang panjang. Melalui proses adaptasi tersebut, varietas lokal sering kali memiliki toleransi yang baik terhadap kondisi lingkungan setempat dan mampu bertahan

pada kondisi cekaman tertentu. Keanekaragaman varietas lokal merupakan bagian dari sumber daya genetik yang sangat berharga. Sumber daya genetik tanaman menjadi bahan dasar dalam program pemuliaan untuk menghasilkan varietas baru yang lebih unggul. Hilangnya varietas lokal dapat menyebabkan berkurangnya keragaman genetik yang dibutuhkan untuk menghadapi tantangan pertanian di masa depan.

Dalam perspektif *Sustainable Agriculture*, pelestarian plasma nutfah tanaman pangan memiliki peran strategis untuk menjaga ketahanan sistem pangan. Diversitas genetik yang tinggi memungkinkan petani memiliki lebih banyak pilihan varietas yang sesuai dengan kondisi lingkungan yang terus berubah. Selain itu, banyak varietas lokal yang memiliki nilai budaya, ekonomi, dan kuliner yang penting bagi masyarakat setempat. Oleh karena itu, pengembangan varietas unggul modern sebaiknya tidak mengabaikan upaya konservasi varietas lokal. Keduanya perlu berjalan secara seimbang sehingga peningkatan produktivitas dapat dicapai tanpa kehilangan kekayaan sumber daya genetik yang dimiliki.

2.5 Pengelolaan Nutrisi Tanaman Secara Berkelanjutan

Selama beberapa dekade, peningkatan produksi pertanian banyak ditopang oleh penggunaan pupuk anorganik. Meskipun mampu meningkatkan hasil panen secara signifikan, penggunaan pupuk yang tidak terkendali sering menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti penurunan kesuburan tanah, pencemaran air, ketidakseimbangan unsur hara, dan menurunnya efisiensi pemupukan. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberhasilan budidaya tidak hanya bergantung pada jumlah pupuk yang diberikan, tetapi juga pada bagaimana unsur hara tersebut dikelola secara tepat dan berkelanjutan. Dalam konsep *Sustainable Agriculture*, pengelolaan nutrisi tanaman tidak sekadar bertujuan memenuhi kebutuhan hara tanaman, tetapi juga menjaga kesehatan tanah, meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, serta meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Pendekatan ini menempatkan tanah sebagai sistem hidup yang harus dipelihara agar tetap mampu menyediakan

unsur hara bagi tanaman dalam jangka panjang. Dengan demikian, pengelolaan nutrisi yang berkelanjutan menjadi kunci untuk mencapai produktivitas tinggi sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya alam.

2.5.1 Peran Unsur Hara Bagi Tanaman

Unsur hara dapat diibaratkan sebagai "makanan" bagi tanaman yang diperlukan untuk menjalankan berbagai proses kehidupan, mulai dari pembentukan akar, batang, daun, bunga, hingga pengisian biji dan buah. Secara umum, unsur hara tanaman dibedakan menjadi unsur hara makro dan unsur hara mikro berdasarkan jumlah yang dibutuhkan oleh tanaman. Unsur hara makro diperlukan dalam jumlah relatif besar karena berperan sebagai komponen utama pembentuk jaringan tanaman dan berbagai proses metabolisme. Sebaliknya, unsur hara mikro dibutuhkan dalam jumlah yang jauh lebih sedikit, namun keberadaannya tetap sangat penting karena berfungsi sebagai pengatur dan katalis berbagai reaksi biokimia di dalam tanaman. Kekurangan salah satu unsur hara, baik makro maupun mikro, dapat mengganggu pertumbuhan tanaman dan menurunkan hasil produksi.

Unsur Hara	**Peran Utama dalam Tanaman**	**Gejala Umum Kekurangan**
Nitrogen (N)	Membentuk klorofil, protein, asam amino, dan merangsang pertumbuhan vegetatif	Kerontokan daun, pertumbuhan tanaman kerdil, penebalan dinding sel akr, dan penurunan hasil panen (Lu *et al.*, 2021)
Fosfor (P)	Mendukung perkembangan akar, pembentukan bunga dan biji, serta transfer energi	Pertumbuhan lambat, daun keunguan (Aziz *et al.*, 2013), pembentukan akar kurang optimal
Kalium (K)	Mengatur keseimbangan air, meningkatkan ketahanan terhadap cekaman dan penyakit,	Penurunan pertumbuhan daun, penurunan produksi biomassa akar, penghambatan pemanjangan akar (Attia *et al.*, 2022)

Unsur Hara	Peran Utama dalam Tanaman	Gejala Umum Kekurangan
	serta membantu pembentukan hasil	
Kalsium (Ca)	Membentuk dinding sel, mendukung pertumbuhan akar dan titik tumbuh	Daun berbentuk parasut, kematian pada bagian meristem, berkas pembuluh gelap (Departement of Plant Science, 2026)
Magnesium (Mg)	Komponen utama klorofil dan berperan dalam fotosintesis	Klorosis dimulai pada bagian antar vena daun tua (Chaudhry *et al.*, 2021)
Sulfur (S)	Membentuk protein dan enzim serta meningkatkan kualitas hasil	Daun muda menguning, pertumbuhan lambat (Burke, Holloway, & Dalling, 1986)

2.5.2 Konsep Pemupukan Berimbang

Pemupukan berimbang merupakan pendekatan yang menekankan pemberian unsur hara sesuai dengan kebutuhan tanaman, kondisi tanah, dan target produksi yang ingin dicapai. Konsep ini berkembang sebagai respons terhadap praktik pemupukan yang sering kali hanya berfokus pada satu atau dua unsur hara tertentu tanpa mempertimbangkan keseimbangan nutrisi secara keseluruhan. Pada prinsipnya, tanaman membutuhkan berbagai unsur hara dalam proporsi yang tepat. Kekurangan satu unsur dapat membatasi pertumbuhan tanaman meskipun unsur lainnya tersedia dalam jumlah berlimpah. Sebaliknya, pemberian pupuk secara berlebihan tidak selalu meningkatkan hasil panen dan bahkan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan serta pemborosan biaya produksi.

Pemupukan berimbang dilakukan dengan mempertimbangkan hasil analisis tanah, kebutuhan spesifik tanaman, serta potensi ketersediaan hara dari lingkungan sekitar. Pendekatan ini memungkinkan penggunaan pupuk yang lebih efisien sehingga produktivitas tanaman dapat ditingkatkan tanpa menimbulkan kerusakan lingkungan. Dalam praktiknya, pemupukan berimbang juga memperhatikan prinsip 5T "tepat jenis, tepat dosis,

tepat waktu, tepat cara, dan tepat tempat". Prinsip ini bertujuan memastikan bahwa unsur hara dapat dimanfaatkan secara optimal oleh tanaman dan meminimalkan kehilangan hara akibat pencucian, penguapan, atau fiksasi di dalam tanah.

2.5.3 Peran Bahan Organik sebagai Nutrisi Tanaman

Salah satu karakteristik utama pertanian berkelanjutan adalah pemanfaatan bahan organik sebagai bagian dari strategi pengelolaan nutrisi tanaman. Bahan organik tidak hanya berfungsi sebagai sumber unsur hara, tetapi juga berperan dalam memperbaiki kualitas tanah secara menyeluruh. Penambahan bahan organik dapat meningkatkan struktur tanah sehingga menjadi lebih gembur dan memiliki porositas yang baik. Kondisi ini mendukung perkembangan akar tanaman dan meningkatkan kemampuan tanah dalam menyimpan air. Selain itu, bahan organik juga berfungsi sebagai sumber energi bagi mikroorganisme tanah yang berperan dalam proses dekomposisi dan siklus hara.

Ketika bahan organik mengalami penguraian, berbagai unsur hara dilepaskan secara bertahap sehingga dapat dimanfaatkan oleh tanaman dalam waktu yang lebih lama. Mekanisme ini berbeda dengan sebagian besar pupuk anorganik yang cenderung tersedia secara cepat dan berpotensi hilang melalui pencucian apabila tidak diserap oleh tanaman. Dalam budidaya tanaman pangan, sumber bahan organik dapat berasal dari kompos, pupuk kandang, pupuk hijau, sisa tanaman, maupun limbah pertanian lainnya. Pemanfaatan sumber daya lokal tersebut tidak hanya membantu mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dalam sistem pertanian.

2.5.4 Integrasi Pupuk Organik dan Anorganik

Pengelolaan nutrisi tanaman yang berkelanjutan tidak berarti menghilangkan penggunaan pupuk anorganik sepenuhnya. Sebaliknya, pendekatan yang lebih realistis adalah mengintegrasikan penggunaan pupuk organik dan anorganik secara harmonis sehingga masing-masing dapat saling melengkapi. Pupuk anorganik memiliki keunggulan dalam menyediakan unsur hara secara cepat dan terukur, namun, penggunaan yang terus-menerus tanpa diimbangi

dengan penambahan bahan organik dapat menyebabkan penurunan kualitas tanah.

Di sisi lain, pupuk organik mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah, tetapi umumnya memiliki kandungan hara yang lebih rendah dan pelepasannya berlangsung lebih lambat. Melalui pendekatan integratif, pupuk organik digunakan untuk menjaga kesehatan dan kesuburan tanah, sementara pupuk anorganik diberikan untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman yang tidak dapat dipenuhi secara optimal oleh bahan organik. Kombinasi tersebut memungkinkan peningkatan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan fungsi tanah sebagai media tumbuh tanaman. Pendekatan integrasi ini juga memberikan manfaat ekonomi karena dapat menekan biaya produksi dalam jangka panjang melalui peningkatan efisiensi penggunaan pupuk dan pengurangan kebutuhan input eksternal.

2.6 Pengelolaan Air

Air merupakan salah satu faktor produksi yang paling menentukan keberhasilan budidaya tanaman pangan. Tidak ada proses kehidupan tanaman yang dapat berlangsung tanpa keberadaan air. Air berperan dalam hampir seluruh proses fisiologis tanaman, mulai dari perkecambahan benih hingga pembentukan hasil panen. Air berfungsi sebagai penyusun utama jaringan tanaman, pelarut dan pengangkut unsur hara, media berbagai reaksi biokimia, serta bahan baku dalam proses fotosintesis. Selain itu, air juga berperan dalam menjaga tekanan turgor sel yang memungkinkan tanaman tetap tegak dan tumbuh secara normal. Air juga berfungsi mengatur suhu tanaman melalui proses transpirasi. Ketika suhu lingkungan meningkat, stomata akan menutup sehingga tanaman akan terhindar dari kehilangan air dari dalam tubuhnya. Ketersediaan air yang cukup akan mendorong pertumbuhan akar yang sehat, pembentukan daun yang luas, serta perkembangan bunga dan biji yang optimal. Sebaliknya, kekurangan air dapat menyebabkan penurunan laju fotosintesis, terhambatnya pertumbuhan tanaman, gugurnya bunga, serta berkurangnya hasil panen.

Dalam praktik budidaya, ketersediaan air sering menjadi faktor pembatas utama produktivitas tanaman pangan. Di banyak wilayah pertanian, petani menghadapi tantangan berupa ketidakpastian curah hujan, kekeringan berkepanjangan, maupun kelebihan air akibat banjir dan genangan. Kondisi tersebut semakin diperparah oleh perubahan iklim yang menyebabkan pola musim menjadi semakin sulit diprediksi. Oleh karena itu, pengelolaan air yang efektif dan berkelanjutan menjadi salah satu kunci utama dalam menjaga produktivitas tanaman pangan sekaligus mempertahankan kelestarian sumber daya alam. Pendekatan *Sustainable Agriculture* memandang air bukan sekadar input produksi, melainkan sumber daya yang harus dikelola secara efisien dan bertanggung jawab. Pengelolaan air yang baik tidak hanya bertujuan memenuhi kebutuhan tanaman, tetapi juga menjaga keseimbangan hidrologi, mengurangi pemborosan, serta meningkatkan ketahanan sistem pertanian terhadap perubahan lingkungan.

Setiap jenis tanaman pangan memiliki kebutuhan air yang berbeda sesuai karakteristik fisiologis dan fase pertumbuhannya. Padi, misalnya, membutuhkan air dalam jumlah relatif besar dibandingkan jagung atau kedelai, namun demikian, kebutuhan air tanaman tidak hanya ditentukan oleh jenis tanaman, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi iklim, jenis tanah, umur tanaman, dan teknik budidaya yang diterapkan. Pada fase perkecambahan dan pertumbuhan awal, ketersediaan air sangat penting untuk mendukung pembentukan akar dan perkembangan jaringan muda. Memasuki fase vegetatif, kebutuhan air meningkat seiring bertambahnya ukuran tanaman dan aktivitas fotosintesis. Kebutuhan air biasanya mencapai puncaknya pada fase pembungaan dan pengisian biji karena pada tahap ini tanaman memerlukan energi dan nutrisi dalam jumlah besar untuk membentuk hasil panen. Kekurangan air pada fase-fase kritis tersebut sering kali menyebabkan penurunan produktivitas yang signifikan. Pemahaman mengenai kebutuhan air tanaman menjadi dasar penting dalam penyusunan jadwal irigasi yang efisien. Pemberian air yang tepat waktu dan sesuai kebutuhan tidak hanya meningkatkan hasil panen, tetapi juga menghemat penggunaan sumber daya air yang semakin terbatas.

Pendekatan pertanian berkelanjutan mendorong pengelolaan air yang adaptif melalui kombinasi teknologi, konservasi sumber daya, dan pemanfaatan informasi iklim. Pengelolaan air yang efisien dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan, mulai dari penyesuaian waktu tanam dengan pola musim, penggunaan varietas yang toleran terhadap kekeringan, hingga penerapan teknologi irigasi yang lebih hemat air. Selain itu, kondisi tanah juga memiliki peran penting dalam menentukan efisiensi penggunaan air. Tanah yang kaya bahan organik memiliki kemampuan menahan air lebih baik sehingga dapat menyediakan cadangan air bagi tanaman dalam waktu yang lebih lama. Penggunaan mulsa, baik berupa sisa tanaman maupun bahan organik lainnya, dapat membantu mengurangi penguapan dari permukaan tanah dan mempertahankan kelembapan tanah. Praktik ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan air, tetapi juga mendukung konservasi tanah dan pengendalian gulma. Diversifikasi sistem produksi juga menjadi strategi penting untuk mengurangi risiko kegagalan panen akibat gangguan iklim. Sistem pertanian yang memiliki keragaman tanaman umumnya lebih mampu beradaptasi terhadap perubahan ketersediaan air dibandingkan sistem monokultur yang sangat bergantung pada satu komoditas. Dalam konteks pertanian berkelanjutan, berbagai teknik tersebut saling melengkapi untuk menciptakan sistem budidaya yang lebih tangguh dan hemat sumber daya.

2.7 Pengelolaan OPT Secara Berkelanjutan

Keberhasilan budidaya tanaman pangan tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan benih bermutu, unsur hara yang cukup, dan pengelolaan air yang baik, tetapi juga oleh kemampuan petani dalam mengendalikan berbagai Organisme Pengganggu Tanaman (OPT). OPT mencakup hama, penyakit, dan gulma yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman, menurunkan kualitas hasil, bahkan menyebabkan kegagalan panen apabila tidak dikelola dengan baik. Kehilangan hasil akibat serangan OPT masih menjadi salah satu tantangan utama dalam produksi tanaman pangan di berbagai wilayah pertanian.

Selama bertahun-tahun, pengendalian OPT sering dilakukan dengan mengandalkan pestisida kimia sebagai solusi utama. Penggunaan pestisida memang mampu memberikan hasil yang cepat dan efektif dalam menekan populasi organisme pengganggu, namun, penggunaan yang berlebihan dan tidak bijaksana dapat menimbulkan berbagai dampak negatif, seperti pencemaran lingkungan, resistensi hama, kematian organisme non-target, serta gangguan kesehatan manusia. Kondisi tersebut mendorong berkembangnya konsep pengelolaan OPT yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Dalam pendekatan *Sustainable Agriculture*, pengendalian OPT tidak bertujuan untuk memusnahkan seluruh organisme pengganggu, melainkan menjaga populasinya tetap berada di bawah ambang yang dapat menyebabkan kerugian ekonomi. Pendekatan ini memadukan berbagai teknik pengendalian yang mempertimbangkan keseimbangan ekosistem, efisiensi produksi, dan keamanan lingkungan. Dengan demikian, pengelolaan OPT menjadi bagian penting dalam menciptakan sistem budidaya tanaman pangan yang produktif sekaligus berkelanjutan.

2.7.1 OPT dalam Budidaya Tanaman Pangan

Agroekosistem pertanian merupakan lingkungan yang dihuni oleh berbagai organisme yang saling berinteraksi. Sebagian organisme memberikan manfaat bagi tanaman, sementara sebagian lainnya berpotensi menimbulkan kerugian. Organisme yang menyebabkan gangguan terhadap pertumbuhan, perkembangan, dan hasil tanaman dikenal sebagai organisme pengganggu tanaman.

Hama merupakan kelompok organisme yang merusak tanaman dengan cara memakan, mengisap, atau merusak bagian tanaman tertentu. Pada tanaman pangan, serangan hama dapat terjadi sejak fase perkecambahan hingga menjelang panen. Dampak serangan hama tidak hanya berupa berkurangnya hasil panen, tetapi juga menurunkan kualitas produk yang dihasilkan. **Penyakit** tanaman juga menjadi faktor penting yang dapat menghambat produksi. Penyakit umumnya disebabkan oleh mikroorganisme patogen seperti jamur, bakteri, virus, maupun nematoda. Keberadaan patogen sering kali dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama suhu dan kelembapan. Pada kondisi yang mendukung

perkembangan patogen, penyakit dapat menyebar dengan cepat dan menyebabkan kerusakan yang luas. **Gulma** merupakan tumbuhan yang tumbuh pada tempat yang tidak diinginkan dan bersaing dengan tanaman budidaya dalam memanfaatkan cahaya, air, ruang tumbuh, dan unsur hara. Persaingan tersebut dapat mengurangi pertumbuhan tanaman utama dan menyebabkan penurunan produktivitas apabila tidak dikendalikan sejak awal pertumbuhan. Dalam sistem pertanian berkelanjutan, pemahaman terhadap karakteristik dan dinamika populasi organisme pengganggu menjadi langkah awal yang penting dalam menentukan strategi pengelolaan yang tepat.

2.7.2 Konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT)

Perubahan paradigma pengendalian organisme pengganggu tanaman melahirkan konsep Pengendalian Hama Terpadu (PHT), yaitu suatu pendekatan yang mengintegrasikan berbagai teknik pengendalian secara harmonis untuk menjaga populasi OPT pada tingkat yang tidak merugikan secara ekonomi. Konsep ini berkembang sebagai respons terhadap berbagai permasalahan yang muncul akibat ketergantungan yang tinggi terhadap pestisida kimia. PHT menempatkan ekosistem pertanian sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan OPT. Oleh karena itu, setiap tindakan pengendalian harus mempertimbangkan kondisi lingkungan, populasi organisme pengganggu, keberadaan musuh alami, serta potensi dampak terhadap ekosistem. Melalui pendekatan ini, penggunaan pestisida tidak lagi menjadi pilihan utama, melainkan alternatif terakhir apabila metode pengendalian lain tidak mampu menjaga populasi OPT pada tingkat yang aman.

Prinsip utama PHT adalah pencegahan. Tanaman yang tumbuh sehat dan dikelola dengan baik umumnya memiliki kemampuan lebih tinggi untuk menghadapi serangan organisme pengganggu. Penggunaan varietas tahan, serta pemeliharaan kondisi lingkungan yang seimbang menjadi bagian penting dalam strategi pengendalian. Pendekatan ini tidak hanya mampu mengurangi risiko kerusakan tanaman, tetapi juga membantu menjaga keberlanjutan agroekosistem dengan meminimalkan gangguan terhadap

organisme yang berperan penting dalam menjaga keseimbangan lingkungan.

2.7.3 Pengendalian Hayati dan Pelestarian Musuh Alami

Salah satu karakteristik utama sistem pertanian berkelanjutan adalah pemanfaatan proses-proses alami dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Dalam konteks pengelolaan OPT, pendekatan tersebut diwujudkan melalui pengendalian hayati yang memanfaatkan organisme hidup untuk menekan populasi organisme pengganggu tanaman. Di alam, berbagai jenis serangga predator, parasitoid, jamur, bakteri, dan mikroorganisme lainnya berperan sebagai musuh alami yang membantu mengendalikan populasi hama. Keberadaan organisme-organisme tersebut merupakan bagian dari mekanisme keseimbangan alami yang telah berlangsung selama ribuan tahun, namun penggunaan pestisida yang tidak selektif sering kali menyebabkan populasi musuh alami ikut menurun sehingga keseimbangan ekosistem terganggu.

Pelestarian musuh alami dapat dilakukan dengan menciptakan lingkungan yang mendukung keberlangsungan hidupnya. Keanekaragaman vegetasi di sekitar lahan, penggunaan pestisida secara bijaksana, serta pemeliharaan habitat alami merupakan beberapa upaya yang dapat meningkatkan keberadaan musuh alami di agroekosistem. Ketika populasi musuh alami terjaga, tekanan serangan hama dapat berkurang secara alami tanpa harus mengandalkan penggunaan bahan kimia secara berlebihan. Pendekatan pengendalian hayati menjadi semakin penting dalam sistem pertanian berkelanjutan karena mampu memberikan manfaat jangka panjang, baik dari aspek ekonomi maupun lingkungan.

2.7.4 Penggunaan Pestisida secara Bijaksana

Meskipun pertanian berkelanjutan mendorong pengurangan penggunaan pestisida, keberadaan pestisida tetap memiliki peran dalam kondisi tertentu. Pada situasi ketika populasi organisme pengganggu telah mencapai tingkat yang berpotensi menimbulkan kerugian besar, penggunaan pestisida dapat menjadi salah satu pilihan pengendalian, namun penggunaannya harus dilakukan

secara bijaksana dan bertanggung jawab. Penggunaan pestisida yang tepat harus mempertimbangkan jenis organisme sasaran, dosis yang dianjurkan, waktu aplikasi, serta dampaknya terhadap organisme non-target. Pemilihan pestisida yang lebih selektif dan mudah terurai di lingkungan menjadi langkah penting untuk mengurangi risiko pencemaran dan gangguan terhadap keseimbangan ekosistem.

Selain itu, rotasi bahan aktif perlu dilakukan untuk mencegah munculnya resistensi pada organisme pengganggu. Resistensi merupakan kondisi ketika hama atau patogen menjadi kebal terhadap pestisida akibat penggunaan yang berulang dan tidak terkendali. Apabila resistensi terjadi, efektivitas pengendalian akan menurun dan petani cenderung meningkatkan dosis penggunaan pestisida yang pada akhirnya memperburuk dampak lingkungan. Oleh karena itu, pestisida seharusnya dipandang sebagai salah satu komponen dalam sistem pengelolaan terpadu, bukan sebagai satu-satunya solusi dalam pengendalian OPT.

2.8 Inovasi Teknologi dalam Budidaya Tanaman Pangan Berkelanjutan

Sektor pertanian merupakan salah satu sektor yang paling bergantung pada kondisi lingkungan. Perubahan suhu, pola curah hujan, intensitas penyinaran matahari, dan ketersediaan air secara langsung memengaruhi pertumbuhan serta produktivitas tanaman pangan. Dalam beberapa dekade terakhir, perubahan iklim telah menjadi tantangan global yang memberikan dampak nyata terhadap sistem produksi pertanian. Meningkatnya frekuensi kekeringan, banjir, serangan organisme pengganggu tanaman, serta ketidakpastian musim tanam menjadi indikator bahwa sektor pertanian harus mampu beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang terus berubah.

Di sisi lain, perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi telah membuka berbagai peluang untuk meningkatkan kemampuan sistem pertanian dalam menghadapi tantangan tersebut. Inovasi teknologi tidak hanya berperan dalam meningkatkan produktivitas, tetapi juga membantu petani menggunakan sumber daya secara lebih efisien, mengurangi risiko produksi, dan meningkatkan keberlanjutan usaha tani. Oleh karena itu, adaptasi perubahan iklim

dan pemanfaatan teknologi pertanian modern menjadi dua aspek yang saling berkaitan dalam mewujudkan budidaya tanaman pangan yang berkelanjutan.

2.8.1 Peran Teknologi dan Inovasi dalam Pertanian Berkelanjutan

Perkembangan teknologi telah membawa perubahan besar dalam praktik budidaya tanaman pangan. Jika pada masa lalu keputusan budidaya banyak didasarkan pada pengalaman dan pengamatan lapangan secara manual, saat ini petani memiliki akses terhadap berbagai teknologi yang mampu meningkatkan ketepatan dan efisiensi pengelolaan usaha tani. Teknologi pertanian modern memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat berdasarkan data yang diperoleh dari lapangan. Informasi mengenai kondisi cuaca, kelembapan tanah, kebutuhan air, hingga perkembangan tanaman dapat diperoleh secara lebih mudah sehingga pengelolaan budidaya menjadi lebih efektif. Teknologi juga membantu mengurangi penggunaan input yang berlebihan melalui aplikasi yang lebih tepat sasaran.

Salah satu inovasi yang berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir adalah pertanian presisi (*precision agriculture*). Pendekatan ini memanfaatkan teknologi informasi, sensor, sistem navigasi, dan analisis data untuk mengelola lahan pertanian secara lebih akurat. Melalui pertanian presisi, kebutuhan tanaman dapat dipenuhi sesuai kondisi spesifik setiap bagian lahan sehingga penggunaan pupuk, air, dan pestisida menjadi lebih efisien. Digitalisasi pertanian juga semakin berkembang melalui pemanfaatan perangkat lunak, aplikasi telepon pintar, dan sistem informasi berbasis internet. Teknologi ini memungkinkan petani memperoleh informasi pasar, prakiraan cuaca, rekomendasi budidaya, hingga peringatan dini terhadap potensi serangan hama dan penyakit. Dengan akses informasi yang lebih baik, petani dapat mengambil keputusan yang lebih tepat dan mengurangi risiko usaha tani. Meskipun penerapan teknologi digital masih menghadapi berbagai tantangan, terutama terkait akses dan kapasitas pengguna, perkembangan ini menunjukkan bahwa pertanian masa depan akan

semakin mengandalkan data dan informasi sebagai dasar pengelolaan produksi.

Selain teknologi modern berbasis digital, pengembangan teknologi tepat guna tetap memiliki peran yang sangat penting dalam sistem pertanian berkelanjutan. Teknologi tepat guna merupakan teknologi yang dirancang sesuai dengan kebutuhan, kemampuan, dan kondisi sosial ekonomi masyarakat setempat. Karakteristik utamanya adalah mudah diterapkan, terjangkau, dan memberikan manfaat nyata bagi petani. Berbagai inovasi sederhana seperti alat tanam yang lebih efisien, sistem irigasi hemat air, mesin pengolah kompos, dan teknologi pemanenan yang praktis dapat meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi beban kerja petani. Teknologi tepat guna juga memiliki keunggulan karena lebih mudah diadopsi oleh petani skala kecil yang masih mendominasi sektor pertanian di banyak negara berkembang.

DAFTAR PUSTAKA

Abbott, L. 2024. 'Soil health characteristics', *Open Access Government*, 41, pp. 398–399. Available at: https://doi.org/10.56367/OAG-041-11193.

Abdul Khalil, H.P.S., Hossain, M.S., Rosamah, E., Azli, N.A., Davaudpoura, S.Y., Islam, M.N., & Dungani, R. 2015. The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp. 1006–1015. Available at: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.099.

Ali, A., Naeem, M., Idrees, M., Aftab, T., Khan, M.M.A., Dantu, P.K. 2022 'Effect of presowing treatment of Co-60 gamma-irradiated chitosan on seed germination and seedling vigor in Eucalyptus citriodora Hook', *Radiation-Processed Polysaccharides: Emerging Roles in Agriculture*, pp. 321–337. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85672-0.00008-8.

Altuner, E.M. 2018. 'Potential of High Hydrostatic Pressure to Improve the Production of Plants Used as Food', *Advances in Biotechnology for Food Industry*, 14, pp. 213–241. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811443-8.00008-6.

Attia, H., Rebah, F., Ouhibi, C., Saleh, M.A., Althobaiti, A.T., Alamer, K.H., Nasri, M.B., & Lachaal, M. 2022. 'Effect of Potassium Deficiency on Physiological Responses and Anatomical Structure of Basil, Ocimum basilicum L.', *Biology*, 11(11). Available at: https://doi.org/10.3390/biology11111557.

Aziz, T., Sabir, M., Farooq, M., Maqsood, M.A., Ahmad, H.R.A., & Warraich, E.A. 2013. 'Phosphorus Deficiency in Plants: Responses, Adaptive Mechanisms, and Signaling', in *Plant Signaling: Understanding the Molecular Crosstalk*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-81-322-1542-4-7.

Bhandari, S., Paudel, S. and Upadhaya, S. 2026. 'Socio-Economic and Environmental Benefits of Agroforestry and Its Multilevel Barriers to Adoption: A Systematic Review', *Sustainability (Switzerland)*, 18(1). Available at: https://doi.org/10.3390/su18010005.

Burke, J.J., Holloway, P. and Dalling, M.J. 1986. 'The Effect of Sulfur Deficiency on the Organisation and Photosynthetic Capability of Wheat Leaves', *Journal of Plant Physiology*, 125(3–4), pp. 371–375. Available at: https://doi.org/10.1016/S0176-1617(86)80160-2.

Chaudhry, A.H., Nayab, S., Hussain, S.B., Ali, M., & Pan, Z. 2021. 'Current Understandings on Magnesium Deficiency and Future Outlooks for Sustainable Agriculture.', *International journal of molecular sciences*, 22(4). Available at: https://doi.org/10.3390/ijms22041819.

Chen, Q., Yingjie, L., An, Y., Lu, Y., Zhong, G. 'Soil Microorganisms: Their Role in Enhancing Crop Nutrition and Health', *Diversity*, 16(12), pp. 1–26. Available at: https://doi.org/10.3390/d16120734.

Costa, C., Meneghello, G.E., Jorge, M.H.A., & Costa, E. 2021. 'The importance of physiological quality of seeds for agriculture', *COLLOQUIUM AGRARIAE*, 17, pp. 102–119. Available at: https://doi.org/10.5747/ca.2021.v17.n4.a452.

Crop Nutrition Laboratory Services. 2026. *Physical Aspects of Soil Health*. Available at: https://cropnuts.com/physical-soil-health/ (Accessed: 9 June 2026).

Diaz-Gonzalez, F.A., Vuelvas, J., Correa, C.A., Vallejo, V.E., Patino, D. 2022. 'Machine learning and remote sensing techniques applied to estimate soil indicators – Review', *Ecological Indicators*, 135, p. 108517. Available at: https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.108517.

Emmerson, M., Morales, M.B., Onate, J.J., Batary, P., Berendse, F., Liira, J., Aavik, T., Guerrero, I., Bommarco, R., Eggers, S., Part, T., Tscharntke, T., Weisser, W., Clement, L., & Bengtsson, J. 2016 'How Agricultural Intensification Affects Biodiversity and Ecosystem Services', *Advances in Ecological Research*, 55, pp. 43–97. Available at: https://doi.org/10.1016/bs.aecr.2016.08.005.

Gamage, A. *et al.* 2024. 'Advancing sustainability: The impact of emerging technologies in agriculture', *Current Plant Biology*, 40(November). Available at:

https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100420.
Queensland Government. 2026. *Soil properties*. Available at: https://www.qld.gov.au/environment/land/management/soil/soil-properties (Accessed: 9 June 2026).
Hatfield, J.L., Sauer, T.J. and Cruse, R.M. 2017. 'Soil: The Forgotten Piece of the Water, Food, Energy Nexus', *Advances in Agronomy*, 143, pp. 1–46. Available at: https://doi.org/10.1016/BS.AGRON.2017.02.001.
Kamakaula, Y. 2024. 'Sustainable Agriculture Practices: Economic, Ecological, and Social Approaches to Enhance Farmer Welfare and Environmental Sustainability', *West Science Nature and Technology*, 2(02), pp. 47–54. Available at: https://doi.org/10.58812/wsnt.v2i02.964.
Khose, S.B., Bhalekar, D.G., Pohshna, C., & Kamble, A. 2023. 'Mulching: A Key to Sustainable Agriculture Article', 5, pp. 312–317.
Lu, L., Zhang, Y., Li, L., Yi, N., Liu, Y., Qaseem, M.F., Li, H., Wu, A. 2021. 'Physiological and Transcriptomic Responses to Nitrogen Deficiency in Neolamarckia cadamba.', *Frontiers in plant science*, 12, p. 747121. Available at: https://doi.org/10.3389/fpls.2021.747121.
Maalouf, F., Ahmed, S. and Bishaw, Z. 2021. 'Faba bean', *The Beans and the Peas: From Orphan to Mainstream Crops*, pp. 105–131. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821450-3.00008-1.
Mrabet, R. 2023. 'Sustainable agriculture for food and nutritional security', *Sustainable Agriculture and the Environment*, pp. 25–90. Available at: https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90500-8.00013-0.
Munshi, S., Das, D.A., Mondal, I., Priya, S. 2025. 'The Economics of Sustainable Agriculture: Challenges and Opportunities', in, pp. 5–15.
Patra, H. Singh, H.S., Ashaq, M., Sahu, T.K. 2024. 'Chemical Properties of Soil', in, pp. 108–126.
Pereira, P., Bogunovic, I., Inacio, M., Zhao, W., Barcelo, D. 2023. 'Agriculture intensification impacts on soil and water ecosystem services', in *EGU General Assembly Conference Abstracts*. (EGU General Assembly Conference Abstracts), p.

EGU-1423. Available at: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1423.

Pereira, P., Inacio, M., Barcelo, D., & Zhao, W2025. 'Impacts of agriculture intensification on biodiversity loss, climate change and ecosystem services', *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 46, p. 100637. Available at: https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100637.

Raj, S., Tharunkumar, H., Srivastava, D.R.P., Singh, M.K. 2025 'Economic and Environmental Benefits of Green Cultivation', *Asian Journal of Environment & Ecology*, 24, pp. 1–11. Available at: https://doi.org/10.9734/ajee/2025/v24i8768.

Rajesh, J., Mrudhula, C. and Chandra, V. 2025. 'QUALITY SEED AND ITS' IMPORTANCE IN AGRICULTURE'.

Salisu, M.A., Ampim, P.A.Y., Oyebamiji, Y.O., Kotochi, A.B.A., Imoro, M.M. 2025. 'Cover Crops Enhance Soil Organic Carbon and Soil Quality for Sustainable Crop Yield: A Systematic Review', *Agronomy*, 15(12), pp. 1–26. Available at: https://doi.org/10.3390/agronomy15122865.

Departement of Plant Science. 2026. *Calcium Deficiency*. Available at: https://plantscience.psu.edu/research/labs/roots/methods/methods-info/nutritional-disorders-displayed/calcium-deficiency (Accessed: 9 June 2026).

Singh, C. 2016. 'Seed Quality Markers: A Review', *Botanical Sciences*, 5, pp. 24–28.

Smith, J. & Register, J. 1998. 'Genetic purity and testing technologies for seed quality: A company perspective', *Seed Science Research*, 8, pp. 285–294. Available at: https://doi.org/10.1017/S0960258500004189.

Thakur, V. 2025. 'Integrated Pest Management for Sustainable Agriculture', in, pp. 365–386.

Wulandari, D., Dewi, V., & Hidayat, M. 2023. 'Smart Crop Rotation For Sustainable Agriculture Against Climate Change Based On Local Wisdom', *E3S Web of Conferences*, 448. Available at: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344801015.

BAB 3
BUDIDAYA PADI

3.1 Syarat Tumbuh dan Persiapan Benih

3.1.1 Karakteristik Botani dan Fase Pertumbuhan Padi

Padi (*Oryza sativa* L.) merupakan tanaman semusim yang termasuk dalam famili Gramineae (*Poaceae*) dan genus *Oryza*. Secara taksonomi, padi budidaya terbagi atas dua subspesies utama, yaitu *indica* yang umum ditanam di daerah tropis termasuk Indonesia, dan *japonica* yang banyak diusahakan di kawasan subtropis. Sebagai komoditas pangan strategis, padi menjadi sumber kalori utama bagi lebih dari tiga miliar penduduk dunia, termasuk mayoritas masyarakat Indonesia (Seck et al., 2021).



Gambar 3.1. Morfologi Tanaman Padi
(Sumber : https://id.wikipedia.org)

Morfologi tanaman padi terdiri atas beberapa organ utama. Akar padi bersifat serabut (fibrous), berwarna putih saat muda dan berubah menjadi kecokelatan seiring perkembangan tanaman. Akar

berfungsi menyerap air dan unsur hara dari dalam tanah serta memberikan jangkar mekanis pada tanaman. Batang padi tersusun dari ruas-ruas (internode) yang dipisahkan oleh buku (node); jumlah ruas biasanya berkisar antara 5 hingga 7 buah, tergantung varietas dan kondisi lingkungan (Widyastuti et al, 2023). Daun terdiri atas pelepah daun (*leaf sheath*) dan helaian daun (*leaf blade*) yang panjang dan sempit dengan pertulangan daun sejajar, khas tanaman monokotil.

Fase pertumbuhan padi secara umum dibagi menjadi tiga tahapan utama: (1) fase vegetatif, (2) fase reproduktif, dan (3) fase pematangan atau pengisian biji. Fase vegetatif berlangsung sejak perkecambahan benih hingga inisiasi malai, dengan durasi sekitar 55–65 hari pada varietas berumur sedang. Selama fase ini terjadi pertumbuhan anakan (*tillering*) yang sangat menentukan jumlah malai per rumpun dan pada akhirnya berdampak terhadap komponen hasil (Kartina et al., 2022). Fase reproduktif dimulai dari pembentukan primordia malai (*panicle initiation*) hingga keluarnya malai (heading), berlangsung sekitar 30–35 hari. Fase terakhir, yakni pengisian dan pematangan biji, berlangsung sekitar 25–30 hari hingga panen (Nasution et al., 2023).

Pemahaman terhadap karakteristik botani dan fase pertumbuhan ini sangat penting dalam menentukan jadwal aplikasi pupuk, pengairan, dan pengendalian organisme pengganggu tanaman (OPT) yang tepat waktu. Penelitian terkini menunjukkan bahwa ketepatan manajemen pada setiap fase pertumbuhan berpengaruh signifikan terhadap hasil gabah dan kualitas beras yang dihasilkan (Kartina et al., 2022; Widyastuti et al, 2023).

3.1.2 Syarat Tumbuh (Agroklimat dan Tanah)

Padi dapat tumbuh dan berproduksi optimal pada kondisi agroklimat dan tanah tertentu. Dari sisi iklim, suhu optimal untuk pertumbuhan padi berkisar antara 25–31°C pada siang hari dan tidak kurang dari 22°C pada malam hari. Suhu yang terlalu tinggi (di atas 35°C) saat anthesis dapat menyebabkan sterilitas serbuk sari sehingga menurunkan persentase gabah isi secara drastis (Tisarum et al., 2023). Sebaliknya, suhu rendah pada fase generatif dapat

memperpanjang periode pengisian biji dan meningkatkan risiko gagal panen, terutama pada lahan-lahan dataran tinggi.

Curah hujan yang ideal untuk budidaya padi sawah berkisar antara 1.500–2.000 mm per tahun dengan distribusi yang merata sepanjang musim tanam. Namun dengan sistem irigasi yang memadai, padi dapat dibudidayakan sepanjang tahun tanpa bergantung sepenuhnya pada curah hujan. Intensitas cahaya matahari juga berperan penting, di mana nilai radiasi surya yang tinggi (lebih dari 300 kalori/cm^2/hari) selama fase pengisian biji terbukti meningkatkan akumulasi pati dalam endosperma dan meningkatkan bobot gabah (Peng et al., 2022).

Persyaratan tanah untuk budidaya padi sawah mencakup beberapa aspek. Tanah dengan tekstur lempung berliat (*clay loam*) hingga liat (*clay*) merupakan yang paling ideal karena kemampuannya menahan air dalam waktu yang lama. Derajat keasaman (pH) tanah optimal berkisar antara 5,5–7,0; pH di bawah kisaran ini dapat menyebabkan keracunan besi (Fe) dan mangan (Mn), sedangkan pH yang terlalu tinggi dapat menghambat ketersediaan beberapa unsur hara mikro (Tirasum et al., 2023). Kapasitas tukar kation (KTK) tanah yang tinggi serta kandungan bahan organik yang mencukupi (minimal 2%) sangat mendukung efisiensi pemupukan dan ketersediaan hara bagi tanaman (Prasad et al., 2021).

Untuk budidaya padi gogo (padi lahan kering), persyaratan agroklimat lebih ketat mengingat tanaman mengandalkan curah hujan sebagai sumber air utama. Kemiringan lahan untuk padi gogo idealnya tidak lebih dari 15% untuk meminimalkan erosi. Padi lahan rawa, baik rawa lebak maupun pasang surut, memerlukan adaptasi khusus terhadap fluktuasi muka air dan potensi cekaman salinitas serta kemasaman tanah yang tinggi (Seck et al., 2021; Prasad et al., 2021).

3.1.3 Pemilihan Varietas Unggul

Pemilihan varietas merupakan salah satu keputusan teknis paling fundamental dalam usaha tani padi. Varietas unggul yang tepat dapat meningkatkan potensi hasil, ketahanan terhadap OPT, serta adaptasi terhadap kondisi lingkungan setempat. Badan Litbang

Pertanian melalui Balai Besar Penelitian Tanaman Padi (BB Padi) secara kontinyu melepas varietas unggul baru yang disesuaikan dengan kebutuhan petani dan kondisi agroekosistem Indonesia (Hairmansis et al., 2022).

Beberapa varietas unggul yang saat ini banyak digunakan antara lain:

1. Inpari (Inbrida Padi Sawah Irigasi), yang ditujukan untuk lahan sawah irigasi dengan potensi hasil 6–9 ton/ha GKG (Gabah Kering Giling);
2. Inpago (Inbrida Padi Gogo), yang dikhususkan untuk lahan kering atau tadah hujan; dan
3. Inpara (Inbrida Padi Rawa), yang didesain untuk lahan rawa lebak dan pasang surut dengan toleransi terhadap genangan dan salinitas.

Selain varietas inbrida, padi hibrida juga terus dikembangkan dengan potensi hasil lebih tinggi, yakni 10–12 ton/ha GKG, meskipun memerlukan biaya produksi yang lebih besar (Hairmansis et al., 2022).

Kriteria utama yang harus dipertimbangkan dalam pemilihan varietas meliputi:

1. Potensi dan stabilitas hasil di berbagai lingkungan;
2. Umur genjah (*early maturing*) yang memungkinkan intensitas tanam lebih tinggi;
3. Ketahanan terhadap hama utama seperti wereng batang coklat (WBC) dan penggerek batang;
4. Ketahanan terhadap penyakit blast dan hawar daun bakteri (HDB);
5. Kualitas beras (tingkat kepulenan, rendemen beras kepala, kadar amilosa); serta
6. Adaptasi terhadap cekaman abiotik seperti kekeringan, genangan, dan kemasaman tanah.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa varietas yang memiliki karakter akar yang dalam dan sistem perakaran yang luas memiliki

keunggulan dalam kondisi cekaman kekeringan ringan hingga sedang (Kumar et al., 2022).

3.1.4 Pematahan Dormansi dan Teknik Persemaian

Benih padi segar yang baru dipanen umumnya mengalami dormansi primer, yaitu kondisi di mana benih tidak dapat berkecambah meskipun berada dalam kondisi lingkungan yang mendukung. Dormansi ini terutama disebabkan oleh inhibitor kimia dalam sekam dan perikarp yang menghambat aktivitas enzim perkecambahan. Masa dormansi benih padi berlangsung antara 4–8 minggu tergantung varietas (Syahri et al., 2021). Untuk keperluan produksi yang mendesak, dormansi dapat dipatahkan melalui beberapa metode, yaitu:

1. Pemanasan benih pada suhu 50–55°C selama 3–5 hari;
2. Perendaman dalam larutan KNO_3 0,2%;
3. Skarifikasi mekanis ringan; atau
4. Pengupasan sekam (*hull removal*).

Metode pemanasan dengan menggunakan sinar matahari langsung selama 2–3 hari merupakan cara yang paling mudah dan ekonomis diterapkan di tingkat petani.

Sebelum disemai, benih perlu diseleksi untuk memastikan tingkat kemurnian dan vigor yang tinggi. Seleksi dapat dilakukan dengan cara merendam benih dalam larutan garam NaCl (1–2 kg garam per 10 liter air); benih yang mengapung atau kosong dibuang, sedangkan benih yang tenggelam dipilih untuk disemai. Kebutuhan benih per hektar untuk sistem tanam pindah (transplanting) berkisar antara 20–25 kg benih/ha, sedangkan untuk tanam benih langsung (tabela) membutuhkan sekitar 40–60 kg/ha (Sekhom et al., 2021).

Teknik persemaian dibagi menjadi dua jenis utama. Pertama, persemaian basah (*wet nursery*) yang dilakukan pada petakan berlumpur dengan ketebalan lapisan lumpur sekitar 5 cm, dan benih disebarkan dengan kerapatan 50–75 g/m^2. Persemaian basah menghasilkan bibit yang lebih seragam dan mudah dipindahkan, namun rentan terhadap serangan keong mas dan burung. Kedua, persemaian kering (*dapog/mat nursery*) yang menggunakan media campuran tanah dan kompos pada nampan plastik atau alas bambu.

Metode ini menghasilkan bibit dengan akar yang lebih kompak (*mat root*), sehingga memudahkan proses penanaman dengan mesin transplanter. Lama persemaian yang optimal untuk bibit padi berkisar antara 18–25 hari, dengan bibit siap tanam ketika telah memiliki 3–4 daun sejati dan tinggi 15–20 cm.

3.2 Persiapan Lahan dan Penanaman

3.2.1 Teknik Pengolahan Tanah

Pengolahan tanah merupakan serangkaian kegiatan mekanis yang bertujuan untuk menciptakan kondisi fisik tanah yang optimal bagi pertumbuhan tanaman padi. Pada lahan sawah irigasi, pengolahan tanah dilakukan dalam kondisi tanah jenuh air atau sedikit tergenang. Secara umum, tahapan pengolahan tanah sawah meliputi:

1. Pembajakan pertama sedalam 20–25 cm untuk membalik dan mencacah lapisan olah tanah;
2. Penggenangan selama 7–10 hari untuk melunakkan tanah dan memudahkan dekomposisi sisa tanaman;
3. Pembajakan atau penggaruan kedua untuk menghancurkan bongkahan tanah; dan
4. Perataan (*leveling*) untuk menciptakan kondisi permukaan yang rata dan sejajar sehingga distribusi air irigasi lebih merata (Shrivastava dan Kumar, 2022).

Pengolahan tanah yang baik memberikan beberapa manfaat agronomis penting, antara lain: meningkatkan aerasi tanah dan mendorong dekomposisi bahan organik, menghancurkan struktur gulma dan OPT yang tersembunyi dalam tanah, serta menciptakan lapisan kedap air (*hardpan*) pada kedalaman tertentu yang membantu mempertahankan genangan air. Kedalaman lapisan olah tanah yang ideal untuk padi sawah adalah 15–20 cm, dengan lapisan hardpan pada kedalaman 20–30 cm.

Pengolahan tanah minimum (*minimum tillage*) dan tanpa olah tanah (*zero tillage*) semakin banyak dikembangkan sebagai alternatif untuk menghemat biaya produksi, tenaga kerja, dan mengurangi emisi gas rumah kaca dari lahan pertanian. Pada sistem pengolahan tanah minimum, lahan hanya dibersihkan dari gulma

dan sisa tanaman dengan herbisida pra-tanam, kemudian dilakukan pembajakan ringan atau penggaruan satu kali. Pendekatan ini terbukti mengurangi biaya pengolahan tanah hingga 30–40% dibandingkan pengolahan konvensional. Namun demikian, penerapan sistem ini memerlukan manajemen gulma yang lebih ketat dan pemilihan varietas yang adaptif terhadap kondisi tanah yang kurang gembur.

Pada lahan kering atau padi gogo, pengolahan tanah umumnya dilakukan dalam kondisi tanah lembab (kapasitas lapang) menggunakan traktor atau cangkul. Pengolahan dilakukan sedalam 15–20 cm untuk menciptakan struktur tanah yang gembur dan poros, memudahkan perkembangan akar, serta meningkatkan kapasitas penyimpanan air tanah. Jika digunakan mulsa (jerami atau plastik), pengolahan dapat dikombinasikan dengan pemasangan mulsa untuk mengurangi evaporasi dan menekan pertumbuhan gulma (Peng et al., 2022).

3.2.2 Pola dan Metode Penanaman

Pola dan metode penanaman yang tepat secara signifikan menentukan produktivitas tanaman padi. Terdapat beberapa metode penanaman yang umum diterapkan di Indonesia, masing-masing dengan keunggulan dan keterbatasannya.

1. **Tanam Pindah (*Transplanting*)**

   Metode penanaman konvensional yang paling umum diterapkan di lahan sawah irigasi. Bibit padi yang telah berumur 18–25 hari dari persemaian dipindahkan ke lahan utama. Jarak tanam yang digunakan bervariasi, namun umumnya 25 cm × 25 cm atau 20 cm × 20 cm. Jumlah bibit per lubang tanam sebaiknya tidak lebih dari 2–3 batang untuk menghindari kompetisi antar tanaman dalam satu rumpun. Keuntungan metode ini adalah tanaman lebih seragam dan mudah dalam pengelolaan selanjutnya.

2. **Sistem Tanam Jajar Legowo (Jarwo)**

   Merupakan inovasi pola tanam yang dikembangkan oleh Kementerian Pertanian RI dan terbukti meningkatkan produksi padi hingga 10–15% dibandingkan tanam konvensional. Prinsip dasarnya adalah memberikan ruang yang lebih luas bagi

tanaman pinggir (*border effect*) sehingga setiap tanaman mendapatkan lebih banyak paparan cahaya matahari dan sirkulasi udara yang lebih baik. Beberapa tipe jarwo yang populer adalah Jarwo 2:1 (dua baris tanam, satu baris kosong dengan jarak 40 cm × 20 cm × 10 cm) dan Jarwo 4:1 (empat baris tanam, satu baris kosong). Penerapan Jarwo 2:1 terbukti meningkatkan anakan produktif hingga 20–25% dibandingkan tanam konvensional (Wopereis et al., 2023).



Gambar 3.2. Sistem Jajar Legowo
(Sumber : https://tabloidsinartani.com)

3. ***System of Rice Intensification*** **(SRI)**

Adalah metode budidaya intensif yang menekankan pada penggunaan bibit muda (7–14 hari setelah semai), tanam tunggal per lubang, jarak tanam lebar (25 cm × 25 cm atau 30 cm × 30 cm), pengelolaan air secara berselang (*intermittent irrigation*), dan penggunaan bahan organik. SRI terbukti dapat menghemat penggunaan benih hingga 80%, air irigasi 25–50%, dan pupuk kimia 20–30%, sekaligus meningkatkan hasil gabah 15–30% dibandingkan tanam konvensional. Tantangan utama penerapan SRI adalah ketersediaan tenaga kerja yang terampil dan kedisiplinan dalam manajemen air.

4. **Tanam Benih Langsung (Tabela)**

Merupakan metode penanaman yang menggunakan benih langsung tanpa melalui tahap persemaian dan pemindahan bibit. Tabela dibedakan atas tabela basah (*wet direct seeding*) dan tabela kering (*dry direct seeding*). Keunggulan tabela adalah menghemat waktu tanam 15–25 hari, mengurangi biaya tenaga kerja untuk persemaian dan tanam pindah, serta

mempercepat masa panen sehingga memungkinkan intensitas tanam yang lebih tinggi. Namun, tabela memerlukan pengendalian gulma yang lebih intensif pada 2–3 minggu pertama setelah tanam.

3.3 Pemeliharaan dan Perlindungan Tanaman

3.3.1 Manajemen Pengairan

Air merupakan faktor produksi yang paling kritis dalam budidaya padi sawah. Secara global, padi sawah irigasi mengonsumsi sekitar 50–70% dari total penggunaan air pertanian. Kebutuhan air tanaman padi bervariasi tergantung fase pertumbuhan: fase vegetatif membutuhkan genangan air setinggi 3–5 cm, fase reproduktif (dari inisiasi malai hingga heading) membutuhkan pasokan air yang paling kritis dan tidak boleh mengalami kekurangan, sedangkan fase pengisian biji dapat ditoleransi dengan kondisi air yang lebih sedikit sebelum panen terakhir.

Teknik pengairan berselang (*Alternate Wetting and Drying* / AWD) telah direkomendasikan oleh International *Rice Research Institute* (IRRI) sebagai praktik hemat air yang terbukti efisien. Pada sistem AWD, lahan dibiarkan mengering hingga kedalaman muka air tanah mencapai 15–20 cm di bawah permukaan tanah (diukur menggunakan pipa pengukur yang ditancapkan di lahan), kemudian diairi kembali hingga ketinggian 5 cm. Penelitian menunjukkan bahwa AWD dapat menghemat penggunaan air hingga 30% tanpa menurunkan hasil gabah secara signifikan, serta mengurangi emisi gas metana (CH_4) dari lahan sawah hingga 30–40% (Lampayan et al., 2021; Zwart dan Bastiaanssen, 2021).

Pengairan yang tidak tepat, baik kekurangan maupun kelebihan, dapat menimbulkan dampak negatif terhadap tanaman. Kekurangan air pada fase kritis (inisiasi malai dan pembungaan) dapat menyebabkan sterilitas serbuk sari, gabah hampa, dan penurunan hasil hingga 50–70%. Sebaliknya, kelebihan air yang menyebabkan genangan terus-menerus dapat mengurangi aerasi tanah, menghambat perkembangan akar, meningkatkan kehilangan nitrogen melalui denitrifikasi, serta menciptakan kondisi yang kondusif bagi perkembangan penyakit busuk batang dan peningkatan populasi keong mas.

Pada dua minggu sebelum panen, pengairan dihentikan untuk mempercepat pematangan biji, memudahkan pemanenan dengan mesin, dan mengurangi kerusakan akar akibat genangan berkepanjangan. Pengeringan lahan sebelum panen juga membantu mengurangi kadar air biji sehingga meminimalkan risiko kerusakan biji selama pemanenan dan penanganan pascapanen.

3.3.2 Pemupukan Berimbang

Pemupukan berimbang (*balanced fertilization*) adalah pendekatan pemberian pupuk yang mempertimbangkan kebutuhan nyata tanaman, status hara tanah, dan target produksi yang ingin dicapai, dengan tujuan mengoptimalkan efisiensi penggunaan pupuk sekaligus meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Konsep ini merupakan evolusi dari pendekatan pemupukan konvensional yang cenderung seragam dan tidak mempertimbangkan variabilitas kesuburan lahan.

Nitrogen (N) merupakan unsur hara makro yang paling banyak dibutuhkan tanaman padi dan paling sering menjadi faktor pembatas produksi. Kebutuhan N untuk padi sawah berkisar antara 90–150 kg N/ha per musim, tergantung varietas dan target hasil. Pemberian N umumnya dilakukan secara bertahap (split application): sekitar 1/3 dosis saat tanam (basal), 1/3 pada fase anakan aktif (25–30 HST), dan 1/3 pada fase inisiasi malai (40–45 HST). Pemberian N yang tepat waktu sesuai fase pertumbuhan sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi serapan N oleh tanaman (Muthayya et al., 2021).

Fosfor (P) berperan penting dalam pembentukan akar, perkembangan anakan, dan proses pembungaan. Kebutuhan P untuk padi berkisar antara 30–60 kg P_2O_5/ha. Pupuk P umumnya diberikan sekaligus saat tanam (basal) karena mobilitasnya yang rendah dalam tanah. Kalium (K) berperan dalam regulasi air tanaman, sintesis protein, dan peningkatan ketahanan terhadap penyakit. Dosis K yang umum digunakan adalah 60–90 kg K_2O/ha, diberikan separuh saat tanam dan separuh pada fase anakan aktif (Prasad dan Shivay, 2021).

Selain pupuk anorganik, penggunaan pupuk organik (kompos, pupuk kandang, biofertilizer) sangat dianjurkan untuk memperbaiki sifat fisik dan biologi tanah dalam jangka panjang.

Pengembalian jerami ke lahan (*in-situ decomposition*) dapat memberikan kontribusi hara N, P, K, dan Si yang signifikan bagi tanaman. Penggunaan bagan warna daun (BWD) *dan Leaf Color Chart* (LCC) sangat membantu dalam menentukan waktu dan dosis pemupukan N secara lebih presisi berdasarkan status N aktual tanaman di lapangan.

3.3.3 Pengendalian Hama Utama

Pengendalian hama pada tanaman padi dilakukan dengan pendekatan Pengendalian Hama Terpadu (PHT) yang mengutamakan penggunaan cara-cara pengendalian yang ramah lingkungan, ekonomis, dan efektif. PHT mencakup pemantauan populasi hama secara rutin, penggunaan varietas tahan, pemanfaatan musuh alami (agens hayati), pengaturan waktu tanam (kalender tanam), serta penggunaan pestisida kimia hanya sebagai pilihan terakhir ketika populasi hama telah melampaui ambang ekonomi (Savary et al., 2021).

1. Wereng Batang Coklat (WBC)



Gambar 3.3. a. Wereng Coklat
(Sumber : https://diperpa.badungkab.go.id)

Nilaparvata lugens Stal merupakan hama paling merusak pada padi sawah di Asia Tenggara, termasuk Indonesia. WBC menghisap cairan floem tanaman dan dapat menyebabkan gejala hopperburn (kekeringan mendadak) pada tanaman. Hama ini juga menjadi vektor penyakit virus kerdil rumput dan kerdil hampa. Pengendalian WBC meliputi: penggunaan varietas tahan (Inpari 13, Inpari 30, Inpari 32), penanaman serempak dalam

satu hamparan, pemantauan populasi dengan perangkap cahaya, konservasi musuh alami (laba-laba, kumbang Micraspis, parasitoid telur Anagrus), serta aplikasi insektisida sistemik golongan neonikotinoid atau buprofezin jika populasi melebihi ambang 10–15 imago per rumpun.

2. Penggerek Batang Padi (PBP)



Gambar 3.3. b. Penggerek Batang Padi
(Sumber : https://distankan.bulelengkab.go.id)

Scirpophaga incertulas, *S. innotata*, *Chilo suppressalis* merupakan hama utama yang menyerang tanaman padi pada fase vegetatif (mengakibatkan gejala sundep/*dead heart*) maupun fase generatif (mengakibatkan gejala beluk/*white ear*). Larva PBP menggerek batang dan mengganggu translokasi hara serta air ke bagian atas tanaman. Pengendalian dilakukan melalui: pengumpulan dan pemusnahan kelompok telur, pemangkasan ujung bibit sebelum tanam pindah untuk mencegah pembawaan telur ke lahan utama, pemasangan lampu perangkap untuk menangkap imago, pemanfaatan parasitoid telur *Trichogramma japonicum*, serta aplikasi insektisida berbahan aktif fipronil atau karbofuran bila diperlukan.

3. **Tikus Sawah**



Gambar 3.3. c. Tikus Sawah
(Sumber : https://distankan.bulelengkab.go.id)

Rattus argentiventer merupakan hama vertebrata yang paling merugikan pada pertanaman padi di Indonesia, dengan estimasi kehilangan hasil mencapai 10–20% per musim tanam. Pengendalian tikus dilakukan secara terpadu melalui: gropyokan (perburuan massal secara serentak), pemasangan bubu perangkap, penggunaan rodentisida berbahan aktif brodifakum atau bromadiolon pada liang tikus (tidak disebar di lahan terbuka), serta pemanfaatan musuh alami burung hantu (*Tyto alba*) melalui pemasangan rumah burung hantu (rubuha) di sekitar areal pertanaman (Toung dan Bouman, 2022).

3.3.4 Pengendalian Penyakit Utama

Penyakit tanaman padi disebabkan oleh berbagai patogen termasuk jamur, bakteri, dan virus. Kehilangan hasil akibat penyakit tanaman padi secara global diperkirakan mencapai 10–30% dari total produksi (Skamnioti dan Gurr, 2022). Pengendalian penyakit yang efektif memerlukan pemahaman yang mendalam tentang siklus penyakit, kondisi lingkungan yang mendukung perkembangan patogen, serta interaksi antara tanaman inang, patogen, dan lingkungan (segitiga penyakit).

1. **Blas (*Blast*)**

Pyricularia oryzae Cavara merupakan penyakit jamur yang paling luas persebarannya dan paling merusak pada tanaman padi di seluruh dunia, termasuk Indonesia. Penyakit ini menyerang hampir semua bagian tanaman di atas tanah: daun

(*leaf blast*), leher malai (*neck blast*), buku batang (*node blast*), dan malai (*panicle blast*). Serangan neck blast pada fase generatif sangat merugikan karena menyebabkan malai berwarna keabu-abuan dan hampa. Kondisi yang mendukung perkembangan blas meliputi: kelembaban tinggi, suhu rendah (20–28°C), kabut pagi hari berkepanjangan, dan penggunaan pupuk N yang berlebihan. Pengendalian dilakukan dengan: penggunaan varietas tahan, pengelolaan pupuk N yang bijaksana (tidak berlebihan), penghindaran sistem irigasi intermittent saat kondisi lembab tinggi, aplikasi fungisida berbahan aktif tricyclazole atau isoprothiolane secara preventif.



Gambar 3.4. a. Penyakit Blas pada Padi
(Sumber : https://medialampung.disway.id)

2. Hawar Daun Bakteri (HDB)

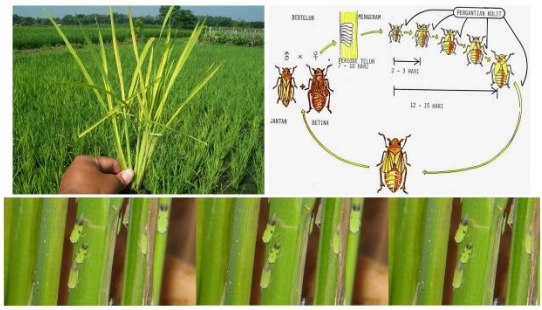
Xanthomonas oryzae pv. *oryzae* merupakan penyakit bakterial yang serius pada padi sawah, terutama pada kondisi curah hujan tinggi, angin kencang, dan pemupukan N yang berlebihan. Gejala khas HDB adalah bercak kebasahan pada tepi daun yang berkembang menjadi hawar berwarna kuning hingga putih krem, dimulai dari ujung dan tepi daun (*leaf blight*). Serangan berat dapat menyebabkan kehilangan hasil 20–30%. Pengendalian utama adalah penggunaan varietas tahan (Inpari 13, Inpari 18, Conde), pengaturan jarak tanam yang tidak terlalu rapat, pengurangan dosis N, dan hindari pemupukan N pada saat tanaman sudah terserang. Tidak ada fungisida yang efektif untuk HDB; bakterisida berbahan aktif tembaga dapat membantu mengurangi penyebaran.



Gambar 3.4. b. Hawar Daun Bakteri pada Padi
(Sumber : https://plantix.net/id)

3. Tungro

Tungro merupakan penyakit yang disebabkan oleh kompleks dua virus (*Rice Tungro Bacilliform* Virus/RTBV dan Rice Tungro Spherical Virus/RTSV) yang ditularkan oleh wereng hijau (*Nephotettix virescens*). Gejala khas adalah tanaman mengerdil, daun berwarna kuning-oranye, dan malai yang tidak sempurna. Kehilangan hasil akibat tungro dapat mencapai 100% pada serangan berat. Pengendalian diarahkan pada pengurangan populasi vektor dengan insektisida (*imidakloprid, fipronil*), penggunaan varietas tahan, dan penentuan waktu tanam yang menghindari puncak populasi vektor.



Gambar 3.4. c. Tungro
(Sumber : https://distankan.bulelengkab.go.id)

3.3.5 Manajemen Pengendalian Gulma

Gulma merupakan salah satu penyebab kehilangan hasil padi yang paling signifikan, dengan estimasi kehilangan hasil antara 10–40% jika tidak dikendalikan dengan baik (Chauhan et el., 2022). Gulma bersaing dengan tanaman padi dalam hal pemanfaatan air, cahaya matahari, ruang tumbuh, dan unsur hara. Selain itu, beberapa spesies gulma juga dapat menjadi inang alternatif bagi OPT dan meningkatkan kelembaban mikro yang kondusif bagi perkembangan penyakit.

Jenis gulma utama pada pertanaman padi sawah mencakup gulma berdaun lebar seperti *Monochoria vaginalis* (eceng gondok mini) dan *Ludwigia hyssopifolia*; gulma golongan rumput seperti *Echinochloa crus-galli* (jajagoan) dan *Leptochloa chinensis*; serta gulma teki-tekian seperti *Cyperus difformis* dan *Fimbristylis miliacea*. Periode kritis pengendalian gulma pada padi adalah 20–45 hari setelah tanam (HST), di mana kompetisi gulma pada periode ini berdampak paling besar terhadap hasil akhir.

Pengendalian gulma dapat dilakukan secara:

1. Preventif, melalui penggunaan benih bersertifikat bebas biji gulma dan persiapan lahan yang baik;
2. Mekanis atau manual, melalui penyiangan dengan tangan atau alat gosrok/landak;
3. Biologis, melalui pemeliharaan bebek atau ikan di sela tanaman padi; dan
4. Kimiawi, menggunakan herbisida.

Herbisida pra-tumbuh (*pre-emergent*) seperti oxadiazon dan butachlor diaplikasikan 3–5 hari setelah tanam untuk mencegah perkecambahan biji gulma, sedangkan herbisida pasca-tumbuh (*post-emergent*) seperti bispyribac-sodium dan penoxsulam diaplikasikan pada 10–25 HST untuk mengendalikan gulma yang telah tumbuh. Rotasi herbisida dengan bahan aktif berbeda penting dilakukan untuk mencegah terjadinya resistensi gulma terhadap herbisida tertentu (Chauhan et al., 2022).

3.4 Panen, Pascapanen, dan Analisis Kelayakan

3.4.1 Kriteria Umur Panen dan Teknik Pemanenan

Ketepatan waktu panen merupakan faktor kritis yang menentukan kualitas dan kuantitas gabah yang dihasilkan. Panen yang terlalu dini (sebelum mencapai masak fisiologis) menghasilkan gabah dengan kadar air tinggi, banyak gabah hijau/belum matang, dan berat jenis rendah. Sebaliknya, panen yang terlambat meningkatkan risiko kerontokan gabah di lapangan, serangan burung dan tikus, serta kerusakan biji akibat siklus pembasahan dan pengeringan berulang yang menyebabkan retak pada biji beras (*chalky grain*).

Kriteria umum kematangan panen padi meliputi:

1. 90–95% gabah pada malai telah menguning;
2. Kadar air gabah mencapai 21–26%;
3. Daun bendera dan leher malai mulai mengering; dan
4. Biji telah keras dan padat saat ditekan.

Secara agronomi, waktu panen optimal umumnya dicapai pada 28–35 hari setelah heading (keluarnya malai) tergantung varietas dan kondisi lingkungan. Penggunaan alat ukur kadar air (moisture meter) di lapangan sangat dianjurkan untuk menentukan waktu panen yang tepat secara objektif.

Dari segi teknik pemanenan, terdapat dua metode yang umum digunakan. Pemanenan manual menggunakan sabit bergerigi (sabit dodos) masih banyak dilakukan terutama di lahan-lahan sempit dan berkontur tidak teratur. Cara ini relatif rendah kehilangan hasil namun membutuhkan banyak tenaga kerja dan waktu. Pemanenan mekanis menggunakan combine harvester (mesin pemanen-perontok gabungan) semakin luas digunakan karena efisiensi waktu dan tenaga yang sangat tinggi. Combine harvester mampu memanen 0,5–1,5 ha/jam, jauh lebih efisien dibandingkan pemanenan manual yang hanya mampu menyelesaikan 0,1–0,15 ha/hari per kelompok tenaga kerja. Kehilangan hasil (*harvest losses*) pada pemanenan dengan combine harvester terlatih berkisar antara 2–5%, lebih rendah dibandingkan pemanenan manual yang dapat mencapai 5–10% (Gummert et al., 2022).

3.4.2 Penanganan Pascapanen dan Mutu Beras

Penanganan pascapanen yang baik dan tepat merupakan mata rantai penting dalam rantai nilai produksi padi. Kehilangan pascapanen yang tidak tertangani dengan baik dapat mencapai 10–20% dari total produksi, terutama akibat kerusakan biji selama pengeringan, penggilingan, dan penyimpanan yang tidak tepat.

Perontokan (*threshing*) gabah dari malai dapat dilakukan secara manual (dengan memukul malai pada papan atau drum geblok), semi-mekanis (menggunakan mesin perontok/thresher bertenaga traktor atau diesel), maupun mekanis penuh (integrate dalam combine harvester). Segera setelah perontokan, gabah perlu segera dikeringkan untuk menurunkan kadar air dari kondisi panen (21–26%) hingga kadar air simpan yang aman (14% untuk GKG – Gabah Kering Giling). Pengeringan dapat dilakukan secara alami (penjemuran di bawah sinar matahari selama 2–3 hari pada cuaca cerah) atau menggunakan alat pengering mekanis (*dryer*) yang lebih cepat dan tidak tergantung cuaca.

Proses penggilingan (*milling*) bertujuan mengubah gabah menjadi beras konsumsi melalui dua tahap utama: pengupasan sekam (*dehusking*) menghasilkan beras merah (*brown rice*/beras pecah kulit), dan penyosohan (*polishing*) untuk menghasilkan beras putih dengan membuang lapisan bekatul (*bran*). Rendemen penggilingan (*milling recovery*) merupakan indikator kunci efisiensi penggilingan, di mana rendemen beras kepala (*head rice recovery*) pada penggilingan modern berkisar antara 55–65% dari bobot gabah. Faktor yang mempengaruhi rendemen meliputi kadar air gabah saat digiling, varietas, teknik pengeringan, dan kondisi mesin penggiling.

Mutu beras dinilai berdasarkan beberapa parameter, antara lain:

1. Derajat sosoh (*whiteness/degree of milling*);
2. Persentase beras kepala (*head rice*), beras patah (*broken rice*), dan menir;
3. Kadar air;
4. Benda asing; serta
5. Karakter fisikokimia seperti kadar amilosa, tingkat kepulenan, dan aroma.

Beras dengan kadar amilosa rendah (<20%) menghasilkan nasi yang lebih pulen, sementara kadar amilosa tinggi (>25%) menghasilkan nasi yang lebih pera dan tidak mengkilap setelah dingin. Penyimpanan beras sebaiknya dilakukan di gudang yang bersih, kering, berventilasi baik, dengan suhu dan kelembaban yang terkontrol untuk mencegah infestasi hama gudang (kumbang Sitophilus) dan pertumbuhan jamur (Zhang et al., 2022).

3.4.3 Analisis Ekonomi Usaha Tani

Analisis ekonomi usaha tani padi bertujuan untuk menilai kelayakan dan profitabilitas kegiatan budidaya padi dari aspek finansial. Analisis ini penting dilakukan sebelum dan sesudah kegiatan usaha tani sebagai bahan evaluasi dan pengambilan keputusan manajemen. Komponen biaya produksi dalam usaha tani padi sawah umumnya terdiri atas:

1. Biaya sarana produksi (benih, pupuk, pestisida, herbisida);
2. Biaya tenaga kerja (pengolahan tanah, penanaman, pemeliharaan, panen);
3. Biaya sewa lahan; dan
4. Biaya penyusutan alat.

Analisis kelayakan usaha tani lazimnya dilakukan dengan menghitung beberapa rasio finansial, antara lain:

1. **R/C Ratio (*Revenue-Cost Ratio*)**
   R/C Ratio merupakan perbandingan antara total penerimaan (*revenue*) dengan total biaya produksi (*cost*). R/C > 1 menunjukkan usaha tani menguntungkan, R/C = 1 berarti impas, dan R/C < 1 berarti merugi. Pada kondisi normal dengan produktivitas 5–7 ton/ha GKG dan harga jual Rp 4.500–5.500/kg GKP (Gabah Kering Panen), nilai R/C ratio usaha tani padi sawah berkisar antara 1,5–2,2.
2. **B/C Ratio (*Benefit-Cost Ratio*)**
   B/C Ratio atau rasio manfaat terhadap biaya menghitung perbandingan antara keuntungan bersih (net benefit) dengan total biaya. B/C > 0 menunjukkan usaha tani menguntungkan. Pada usaha tani padi dengan penerapan teknologi rekomendasi, nilai B/C berkisar antara 0,5–1,2.

3. ***Break Even Point*** **(BEP)**
   Merupakan titik impas di mana total penerimaan sama dengan total biaya, tidak ada keuntungan maupun kerugian. BEP dapat dihitung dalam satuan harga jual (BEP harga) maupun produksi (BEP produksi). BEP produksi memberikan informasi tentang batas minimum produksi yang harus dicapai agar usaha tani tidak merugi.

Penerapan teknologi inovatif seperti varietas unggul, sistem Jarwo, dan pemupukan berimbang terbukti secara nyata meningkatkan profitabilitas usaha tani padi. Pada lahan sawah irigasi di Jawa Barat, penerapan paket teknologi Jarwo Super (Jarwo + varietas unggul + pupuk hayati) mampu meningkatkan produktivitas rata-rata sebesar 15–20% dan keuntungan bersih hingga 30% dibandingkan cara petani konvensional (Ikhwani et al., 2023). Peningkatan akses petani terhadap pasar melalui kelembagaan petani (kelompok tani, koperasi) juga terbukti meningkatkan posisi tawar petani dalam penentuan harga jual gabah.

DAFTAR PUSTAKA

Chauhan, B. S., Jabran, K., & Mahajan, G. (2022). Rice Production Worldwide: Issues and Challenges.. *Springer International Publishing*, 1, 1–23. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47516-5_1

Gummert, M., Nguyen, V. H., Choomjaihan, P., & Belford, R. (2022). Postharvest Technology for Rice: Issues and Opportunities.. *Rice Production Worldwide*, (1), 425–450. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47516-5_17

Hairmansis, A., Yullianida, Y., Supartopo, S., Kustianto, B., & Suwarno, S. (2022). Pengembangan Varietas Unggul Padi Tipe Baru untuk Lahan Sawah Irigasi.. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 41(1), 1–10. https://doi.org/10.21082/jpptp.v41n1.2022.p1-10

Ikhwani, I., Pratiwi, G. R., Paturrohman, E., & Makarim, A. K. (2023). Peningkatan Produktivitas Padi melalui Penerapan Jarak Tanam Berbeda dan Beberapa Varietas Unggul Baru.. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 42(3), 155–164. https://doi.org/10.21082/jpptp.v42n3.2023.p155-164

Kartina, N., Wibawa, B. M., Perdiansyah, I., & Purwoko, B. S. (2022). Karakter Agronomi dan Kualitas Beras Varietas Padi Inpari pada Berbagai Sistem Tanam.. *Jurnal Agronomi Indonesia*, 50(2), 134–142. https://doi.org/10.24831/jai.v50i2.37865

Kumar, V., Jat, H. S., Sharma, P. C., Gathala, M. K., & Malik, R. K. (2022). Evaluating alternatives to rice-wheat systems in South Asia: Impact assessment using economic, environmental and social indicators.. *World Development*, 149, 105694. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105694

Lampayan, R. M., Rejesus, R. M., Singleton, G. R., & Bouman, B. A. M. (2021). Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice.. *Field Crops Research*, 261, 107994. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107994

Muthayya, S., Sugimoto, J. D., Montgomery, S., & Maberly, G. F. (2021). An overview of global rice production, supply, trade, and consumption and the nutrition.. *Annals of the New York*

Academy of Sciences, 1324(1), 7–14. https://doi.org/10.1111/nyas.12540

Nasution, A., Yusuf, R., & Purba, E. (2023). Pengaruh Sistem Tanam Jajar Legowo terhadap Pertumbuhan dan Produksi Padi Sawah.. *Jurnal Agroekoteknologi Universitas Sumatera Utara*, 11(2), 88–97. https://doi.org/10.32734/jaet.v11i2.2023

Peng, S., Khush, G. S., Virk, P., Tang, Q., & Zou, Y. (2022). Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential.. *Field Crops Research*, 108(1), 32–40. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.107902

Prasad, R., & Shivay, Y. S. (2021). Balanced fertilization of rice crop for improving production, quality, and economy.. *Indian Journal of Fertilisers*, 17(2), 142–160. https://doi.org/10.56093/ijas.v91i8.114890

Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S. J., Esker, P., McRoberts, N., & Nelson, A. (2021). The global burden of pathogens and pests on major food crops.. *Nature Ecology & Evolution*, 3(3), 430–439. https://doi.org/10.1038/s41559-021-01400-9

Seck, P. A., Diagne, A., Mohanty, S., & Wopereis, M. C. S. (2021). Crops that feed the world 7: Rice.. *Food Security*, 4(1), 7–24. https://doi.org/10.1007/s12571-021-01160-4

Sekhon, N. K., Sharma, R., & Raj Kumar. (2021). Advances in rice agronomy for sustainable production.. *Journal of Crop Science and Biotechnology*, 24, 1–15. https://doi.org/10.1007/s12892-021-00099-8

Shrivastava, P., & Kumar, R. (2022). Soil physical properties and tillage management for lowland rice cultivation.. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 22(2), 123–131. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.01.015

Skamnioti, P., & Gurr, S. J. (2022). Magnaporthe grisea and rice blast: Biology and management in tropical environments.. *Molecular Plant Pathology*, 23(2), 345–362. https://doi.org/10.1111/mpp.13170

Syahri, A., & Somantri, R. U. (2021). Penggunaan Varietas Unggul Tahan Hama dan Penyakit sebagai Komponen Utama PHT dalam Pengelolaan Budidaya Padi Nasional.. *Jurnal Penelitian*

Pertanian Tanaman Pangan, 35(1), 1–12. https://doi.org/10.21082/jpptp.v35n1.2021.p1-12

Tisarum, R., Theerawitaya, C., Samphumphuang, T., Cha-um, S., & Huang, H. J. (2023). Alleviation of drought stress in rice using arbuscular mycorrhizal fungi inoculation.. *Plant Production Science*, 26(1), 1–12. https://doi.org/10.1080/1343943X.2023.2178925

Tuong, T. P., & Bouman, B. A. M. (2022). Rice production in water-scarce environments and integrated pest management.. *Water Productivity in Agriculture*, 53, 67. https://doi.org/10.1079/9780851996691.0053

Widyastuti, Y., Satoto, S., Indrastuti, A. R., Suparwoto, S., & Daradjat, A. A. (2023). Keragaan Hasil Galur-Galur Padi Hibrida di Beberapa Lingkungan Tumbuh.. *Jurnal Penelitian Pertanian Tanaman Pangan*, 42(1), 11–20. https://doi.org/10.21082/jpptp.v42n1.2023.p11-20

Wopereis, M. C. S., Donovan, C., Nebié, B., Guindo, D., & N'Diaye, M. K. (2023). Soil fertility management in irrigated rice systems and the SRI approach in tropical Asia.. *Field Crops Research*, 61(2), 125–145. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.02.018

Zhang, X., Cai, X., & Huang, Y. (2022). Postharvest management and rice quality: grain physical properties and nutritional value.. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 21(2), 1248–1265. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12918

Zwart, S. J., & Bastiaanssen, W. G. M. (2021). Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize.. *Agricultural Water Management*, 69(2), 115–133. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.08.005

BAB 4
BUDIDAYA JAGUNG

Jagung (*Zea mays* L.) merupakan tanaman pangan terpenting selain padi dan kedelai. Tanaman ini berasal dari Amerika Tengah dan telah didomestikasi sekitar 7000 tahun yang lalu (Purwono dan Purnamawati 2021). Tanaman ini masuk ke Indonesia pada abad ke-16 melalui pedagang Portugis (Subandi *et al*., 2019). Sejak saat itu jagung menyebar luas dan beradaptasi dengan berbagai kondisi agroekologi di Nusantara, mulai dari dataran rendah hingga dataran tinggi.

Pada masa kolonial Belanda, jagung mulai dibudidayakan secara komersial sebagai bahan pangan alternatif dan pakan ternak (Pabbage *et al*., 2020). Namun peran jagung masih terbatas karena padi dianggap sebagai makanan pokok utama. Transformasi besar terjadi pada era Orde Baru melalui program diversifikasi pangan dan peningkatan produksi jagung hibrida (Balitsereal, 2022).

Perkembangan jagung di Indonesia mengalami percepatan sejak dilepasnya varietas hibrida pertama Bisi-2 pada tahun 1986 (Balitsereal, 2022). Lebih lanjut diinformasikan telah dilepas 25 varietas hibrida dan 12 varietas komposit unggul jagung 2018-2022 dengan potensi hasil 9-12 ton/ha. Varietas NK 212, Bisi-18, dan Nasa 29 dirakit tahan terhadap penyakit bulai Peronosclerospora maydis dan toleran kekeringan Inovasi pemuliaan terus berlanjut dengan pelepasan ratusan varietas hibrida, komposit, dan bersari bebas hingga tahun 2023 (Puslitbangtan, 2023).

Saat ini jagung telah menjadi komoditas strategis nasional untuk pangan, pakan, dan industri (Kementerian Pertanian, 2023). Kebutuhan jagung nasional mencapai 17.2 juta ton/tahun, dengan 60% digunakan untuk pakan ternak unggas (BPS, 2024). Perkembangan teknologi budidaya jagung juga mengalami lompatan. Sistem tanam beralih dari tradisional ke mekanisasi, pemupukan

berimbang berbasis uji tanah, dan pengelolaan OPT berbasis PHT (Syafruddin *et al*., 2022). Penggunaan benih hibrida bersertifikat kini mencapai 85% di Jawa dan 60% di luar Jawa (Balitsereal, 2022).

4.1 Botani Jagung

Jagung (*Zea mays* L.) termasuk famili Poaceae yang tumbuh tegak, berbatang tunggal, dan tinggi 1-4 m, tergantung varietas dan lingkungan tumbuh (Pabbage *et al*. 2020). Batang berbentuk silindris beruas-ruas dan kokoh, dilindungi pelepah daun pada setiap ruas (Balitsereal, 2022).

Sistem perakaran jagung terdiri atas akar seminal, akar adventif, dan akar penyangga (Syafruddin *et al*., 2022). Akar penyangga tumbuh dari ruas batang paling bawah dan berfungsi memperkuat tanaman agar tidak mudah rebah serta memperluas serapan air dan hara dengan kedalaman perakaran efektif mencapai 40-60 cm pada tanah gembur (Kementerian Pertanian, 2023).

Daun jagung berbentuk pita memanjang dengan tulang daun sejajar dan ujung runcing (Balitsereal, 2022). Setiap tanaman memiliki 12-24 helai daun dengan luas total 4000-7000 cm^2 per tanaman (Syafruddin *et al*., 2022).

Bunga jagung berumah satu (*monoecious)* dengan bunga jantan tassel terletak di ujung batang dan bunga betina (*silk*) pada ketiak daun (Balitsereal, 2022). Jagung bersifat protandry, yaitu bunga jantan mekar 2-4 hari lebih awal dari bunga betina sehingga penyerbukan berlangsung secara silang (Pabbage *et al*., 2020).

Selanjutnya, Pabbage *et* al., (2020) menuliskan bahwa buah jagung berupa buah buni caryopsis dengan biji melekat langsung pada tongkol tanpa dilindungi kelopak buah. Tongkol dibungkus kelobot yang berfungsi melindungi biji dari hama dan penyakit serta mengurangi kehilangan air (Balitsereal, 2022). Setiap tongkol terdiri atas 8-20 baris biji dengan jumlah biji per tongkol 300-800 butir tergantung varietas dan kepadatan tanam. Bentuk biji jagung hibrida modern umumnya tipe mutiara dan gigi kuda dengan warna kuning atau putih. Bobot 1000 biji berkisar 250-350 gram dan kadar karbohidrat 70-75% (Puslitbangtan, 2023.)

4.2 Syarat Tumbuh Jagung

4.2.1 Suhu

Jagung tumbuh optimal pada suhu 21-30°C Balitsereal 2022. Suhu merupakan faktor pembatas utama pertumbuhan vegetatif dan generatif. Suhu <10°C menghambat perkecambahan biji, pembentukan akar seminal, dan pembelahan sel sehingga pertumbuhan kerdil Kementerian Pertanian 2023. Pada fase pembungaan, suhu >35°C menyebabkan serbuk sari steril, silk cepat kering, dan tongkol ompong karena kegagalan penyerbukan Syafruddin et al. 2022. Ketinggian tempat memengaruhi suhu harian. Dataran rendah 0-500 mdpl suhu 26-32°C umur panen 95-110 hari, sedangkan dataran tinggi 900-1300 mdpl suhu 18-24°C umur panen memanjang jadi 125-135 hari Puslitbangtan 2023. Varietas hibrida NK 212 dan Bisi-18 telah dirakit untuk toleran suhu rendah dataran tinggi Puslitbangtan 2023.

4.2.2 Intersitas cahaya matahari

Jagung termasuk tanaman C4 yang membutuhkan intensitas cahaya tinggi dengan lama penyinaran minimal 8 jam/hari (Pappert *et al.,* 2025 ; Cairns *et al.* 2012.) Fotosintesis C4 lebih efisien pada cahaya kuat 30-35°C, sehingga jagung berproduksi tinggi di daerah tropis (Syafruddin et al. 2022). Intensitas cahaya <50% dari cahaya penuh menyebabkan etiolasi, ruas batang memanjang, daun pucat, dan hasil biji turun 20-40% (Balitsereal, 2022). Etiolasi pada jagung ditandai batang memanjang, kurus, daun pucat kekuningan, dan mudah rebah akibat intensitas cahaya rendah <8 jam/hari. Kondisi ini menurunkan jumlah biji per tongkol dan hasil akhir 30-45% (Li et al., 2023). Jagung toleran naungan hingga 30% sehingga masih cocok ditumpangsarikan dengan tanaman lain (Ashraf, 2023), walaupun jumlah baris biji, biji per tongkol, dan bobot 1000 biji turun signifikan bila naungan > 50% (Pabbage *et al*. 2020). Arah barisan tanam timur-barat disarankan agar tajuk mendapat cahaya merata sepanjang hari Kementerian Pertanian (2023).

4.2.3 Kelembaban udara

Kelembaban relatif RH ideal untuk jagung 50-70% (Volenik *et al.,* 2007*).* Kelembaban tinggi >80% terutama saat fase pembungaan

dan pengisian biji memicu perkembangan penyakit bulai, busuk batang, dan busuk tongkol (Pabbage *et al*., 2020). Saputro *et al*., (2025) menulis korelasi Pearson antara produktivitas jagung dengan curah hujan adalah 0,397. Curah hujan >400 mm/bulan saat fase generatif menyebabkan rebah batang dan pencucian hara N (Kementerian Pertanian 2023). Sebaliknya, defisit air saat fase R1-R3 pembentukan silk dan pengisian biji menurunkan jumlah biji per tongkol hingga 50% (Syafruddin *et al*. 2022).

4.2.4 Sifat fisik tanah

Jagung menyukai tanah dengan tekstur lempung berpasir sampai lempung liat berpasir (Pabbage *et al*., 2020), gembur, porous, dan memiliki kapasitas menahan air sehingga akar mudah menembus sampai kedalaman 40-60 cm (Balitsereal, 2022). Jagung sangat sensitif genangan. Drainase buruk menyebabkan akar kekurangan oksigen jika tergenang >48 jam, ditandai daun menguning dan tanaman kerdil (Kementerian Pertanian, 2023).

4.2.5 Sifat kimia tanah

Nilai pH tanah ideal untuk jagung 5.5-7.0. Pada pH 6.0-6.8, unsur hara makro N, P, K, Ca, Mg, S dan mikro Zn, Cu, Mn, B optimal (Balitsereal 2022). Pada pH <5.0, kelarutan Al-dd meningkat sehingga menghambat serapan P, Ca, Mg. Gejala defisiensi P pada jagung ditandai daun muda ungu kemerahan.

Jagung tergolong tanaman responsif hara dengan kebutuhan N 150-200 kg/ha, P_2O_5 60-90 kg/ha, K_2O 60-120 kg/ha untuk target hasil 8-10 ton/ha Puslitbangtan 2023. Kapasitas Tukar Kation KTK tanah ideal >15 cmol/kg. KTK tinggi mampu menahan dan menyediakan hara lebih lama sehingga efisiensi pemupukan meningkat

4.2.6 Sifat biologi tanah

Kandungan bahan organik tanah ideal 2-3% sangat disukai jagung Syafruddin et al. 2022. Bahan organik memperbaiki struktur tanah, meningkatkan KTK, dan menjadi sumber energi mikroorganisme tanah (Pabbage *et al*. 2020). Populasi mikroba menguntungkan seperti bakteri pelarut fosfat dan mikoriza

meningkatkan serapan P hingga 30% pada lahan marginal (Balitsereal, 2022). Aktivitas cacing tanah dan mesofauna tanah mengindikasikan tanah sehat karena membentuk pori makro untuk aerasi dan drainase. Penggunaan pupuk organik 5-10 ton/ha + pupuk hayati dapat meningkatkan populasi mikroba tanah dan mengurangi dosis pupuk anorganik hingga 25% tanpa menurunkan hasil (Puslitbangtan, 2023).

4.3 Budidaya Jagung

4.3.1 Pemilihan varietas

Pemilihan varietas unggul merupakan langkah awal untuk meningkatkan produktivitas jagung. Varietas unggul berpotensi hasil tinggi, tahan penyakit dan beradaptasi baik (Alfidyah, 2025). Varietas jagung hibrida seperti NK 212, Bisi-18, Pertiwi-3, dan P27 Gajah memiliki potensi hasil 9-12 ton/ha pipil kering (Balitsereal, 2022).

Benih bersertifikat bermutu label biru harus digunakan dengan daya berkecambah >85% dan kadar air <13% (Puslitbangtan 2023). Benih hibrida F1 tidak boleh digunakan kembali karena hasil turun 30-50% akibat segregasi genetik (Pabbage et al. 2020).

4.3.2 Pengolahan tanah

Pengolahan tanah bertujuan memperoleh kondisi media tanam yang sesuai melalui perbaikan aerasi tanah. Tanah diolah ringan, didiamkan 1-2 minggu, kemudian diratakan. Pada lahan kering, dibuat bedengan lebar 100-120 cm dengan saluran drainase 30-40 cm untuk mencegah genangan. Pada lahan sawah, dibuat guludan tinggi 20-30 cm dengan sistem drainase baik. Pemberian bahan organik 5-10 ton/ha saat pengolahan tanah terakhir dapat memperbaiki struktur tanah dan KTK (Syafruddin *et al*., 2022).

4.3.3 Pengairan

Jagung membutuhkan air 265,55 mm (Sirait *et al.,* 2020) dalam 1 periode musim tanam. Fase kritis kebutuhan air terjadi pada fase V8-V12 pembentukan bunga, R1 pembungaan, dan R3 pengisian biji (Kementerian Pertanian, 2023). Kekurangan air saat R1-R3 menyebabkan silk terlambat muncul, serbuk sari tidak jatuh tepat waktu, dan tongkol tidak berisi.

Kelebihan air >48 jam menyebabkan akar jagung busuk dan pertumbuhan terhambat. Sistem pengairan alur (*furrow irrigation*) paling efisien pada lahan datar dengan efisiensi 60-70% (Pabbage *et al*., 2020. Pada lahan kering, pengairan dilakukan saat 10 HST, 30-40 HST, dan 60-70 HST tergantung curah hujan Drainase harus lancar karena jagung tidak tahan genangan.

4.3.4 Pemupukan

Jagung responsif terhadap pemupukan berimbang N, P, K.. Dosis anjuran untuk target 8-10 ton/ha: Urea 250-300 kg/ha, SP-36 100-150 kg/ha, KCl 100-150 kg/ha. Pupuk diberikan 3 tahap: 1/3 dosis N + semua P dan K saat tanam, 1/3 dosis N umur 15-20 HST, dan 1/3 dosis N umur 35-40 HST (Kementerian Pertanian, 2023). Penempatan pupuk 7-10 cm di samping dan 5 cm di bawah benih agar tidak kontak langsung. Kombinasi pupuk anorganik + organik 5 ton/ha + pupuk hayati dapat meningkatkan efisiensi hara 25% dan memperbaiki sifat biologi tanah (Syafruddin *et al.,* 2022). Defisiensi N ditandai daun bawah kuning berbentuk V, defisiensi P daun ungu, defisiensi K tepi daun mengering.

Jagung termasuk tanaman responsif hara dengan kebutuhan N, P, K tinggi untuk mencapai potensi hasil 9-12 ton/ha (Puslitbangtan, 2023). Defisiensi hara utama pada jagung adalah sebagai berikut: 1) Defisiensi Nitrogen terlihat pada daun bagian bawah berwarna kuning dan berbentuk V ; 2)Defisiensi Fosfor mengakibatkan daun berwarna ungu kemerahan 3). Deisiensi K menyebabkan tepi daun mengering seperti terbakar (Balitsereal, 2022).

Kombinasi pupuk anorganik + organik 5-10 ton/ha + pupuk hayati mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Syafruddin *et al*., 2022). Dosis dan waktu aplikasi pupuk disesuaikan dengan umur tanaman dan fase pertumbuhan kritis jagung (Tabel 4.1). Penempatan pupuk 7-10 cm di samping barisan tanaman dan 5 cm di bawah permukaan tanah untuk menghindari kontak langsung dengan benih.

Tabel 4.1. Dosis dan waktu pemupikan jagung

Umur tanaman	Fase pertumbuhan	Jenis pupuk	Dosis (kg/hektar)	Cara aplikasi
Saat tanam	0 HST	Urea	80-100	Tugal 7-10 cm ; di samping beinh
		SP36/TSP	100-150	Semua dosis
		KCl	50-75	Semua dosis
15-20 HST	V6-V8	Urea	80-100	Larikan samping tanaman ; tutup tanah
35-40HST	V12-R1	Urea	80-100	Larikan, sebelum pembungaan
		KCl	50-75	Sisa dosis
Total		Urea	250-300	Setara N 115-138 kg
		SP36	100-150	Setara P_2O_5 : 36-54 kg
		KCl	100-150	Setara K_2O : 60-90 kg

Sumber : Kementerian Pertanian (2023)

Keterangan:

Dosis disesuaikan hasil uji tanah. Apabila hasil analisis menunjukkan kadar P-tanah dan K-tanah tergolong tinggi, dosis SP-36 dan KCl bisa dikurangi 25% (Balitsereal, 2022). Pupuk organik 5-10 ton/ha diberikan saat pengolahan tanah terakhir untuk memperbaiki struktur dan KTK tanah. Pupuk hayati + Mikoriza diberikan 10 g/lubang tanam bersama pupuk dasar untuk meningkatkan serapan P. Jika pH tanah <5,5, pengapuran dolomit 1-2 ton/ha dilakukan 2-4 minggu sebelum tanam untuk menetralkan Al-dd (Kementerian Pertanian, 2023).

Selain dosis tepat, kemampuan mengidentifikasi gejala defisiensi hara di lapangan penting untuk koreksi cepat Balitsereal 2022. Gejala defisiensi muncul lebih dulu pada daun tua untuk hara mobile N, K, Mg dan pada daun muda untuk hara immobile P, Ca, S, Zn

(Syafruddin *et al.*, 2022). Gejala defisiensi hara pada jagung ditampilkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Gejala defisiensi hara tanaman jagung

Unsur Hara	Mobilitas	Daun yang Terserang	Gejala visual	Tindakan koreksi
N	Mobil	Daun tua/ bawah	Kuning berbentuk V dari ujung ke tulang dau ; tanaman kerdil	Urea 50-100 kg/ha ; semprot Urea 2%
P	Imobil	Daun muda/atas	Daun dan batang ungu kemerahan, pertumbuhan terhambat	SP36 100 kg/ha ; pupuk hayati
K	Mobil	Daun tua tepi	Tepi daun kering seperti terbakar, batang lemah, mudah rebah	KCl 50-100 kg/ha
Mg	Mobil	Daun tua tengah	Klorosis, belang hijau-kuning di antara tulang daun	Kieserit 50 kg/ha
Zn	Imobil	Daun muda	Garis putih-kunig antar tulang daun, ruas pendek	
B	Imobil	Titik tumbuh	Tongkol kecil, biji tidak penuh, silk tidak muncul	

4.3.5 Pengendalian hama dan penyakit

Pengendalian dilakukan dengan konsep PHT Pengendalian Hama Terpadu Kementerian Pertanian 2023. Hama utama: ulat grayak Spodoptera frugiperda, penggerek batang Ostrinia furnacalis, dan lalat bibit Atherigona oryzae Pabbage et al. 2020. Pengendalian ulat grayak dilakukan sejak 7 HST dengan insektisida berbahan aktif

emamektin benzoat atau spinosad jika ambang ekonomi 10% tanaman terserang Kementerian Pertanian 2023. Penyakit utama: bulai Peronosclerospora maydis, hawar daun Helminthosporium turcicum, dan busuk batang Fusarium sp Balitsereal 2022. Penggunaan varietas tahan bulai + perlakuan benih fungisida metalaksil efektif menekan serangan Puslitbangtan 2023. Gulma dikendalikan 2 kali: 15 HST dan 35 HST secara manual atau herbisida pra dan purna tumbuh Pabbage et al. 2020.

4.3.6 Panen dan pascapanen

Jagung dipanen saat kadar air biji 20-25% dengan ciri kelobot mengering kecoklatan, biji keras, dan lapisan hitam black layer terbentuk di dasar biji Balitsereal 2022. Umur panen hibrida 100-110 HST dataran rendah, 125-135 HST dataran tinggi Puslitbangtan 2023. Panen terlalu cepat KA >30% rawan jamur, panen terlalu lambat KA <15% biji rontok Kementerian Pertanian 2023. Tongkol dipetik lalu dikelobotkan dan dijemur 3-5 hari hingga KA 14% untuk penyimpanan aman Pabbage et al. 2020. Pengeringan di lantai semen atau para-para, diaduk 2-3 jam sekali agar merata Balitsereal 2022. Setelah kering, pipil dilakukan manual atau mesin, lalu sortasi untuk memisahkan biji rusak dan kotoran (Syafruddin *et al*., 2022). Penyimpanan pada gudang kering, bersirkulasi udara, dan bebas hama gudang Sitophilus zeamais dengan KA biji maksimal 14% (Kementerian Pertanian, 2023).

DAFTAR PUSTAKA

Alfidyah M/ 2025. Analisis pengaruh varietas benih terhadap hasil panen jagung. *Jurnal Agroekoteknologi.* Vol. 1 (1): 15-21

Ashraf M. 2023. Physiological, morphological and phytochemical responses of maize to abiotic responses. Review. Vol. 23 (1). https://doi.org/10.64013/bbasrjlifess.v2023i1.18

Balai Penelitian Serealia. 2022. Prospek dan Arah Pengembangan Agribisnis Jagung. Maros: Balitsereal.

Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian. 2021. Teknologi Pengelolaan Lahan Suboptimal. Bogor: BBSDLP.

Cairns JE., K. Sonder, PH Zaidi., PN Verhulst., G Mahuku., R Babu., SK Nair, B Das., B Govaerts., MT Vinayan., Z Rashid., JJ Noor., De Vicente F. san., BMPrasanna. 2012. Maize production in a changing climate: Impacts, adaptation, and mitigation strategies. *Advances in Agronomy* 114: 1-65.

Kementerian Pertanian. 2023. Pedoman Teknis Budidaya Jagung GAP. Jakarta: Ditjen Tanaman Pangan.

Pabbage, M.S., A. Baco., M. Azrai. 2020. Teknologi Budidaya Jagung Lahan Kering. Maros: Balitsereal.

Purwono., H. Purnamawati. 2021. Dasar-dasar Agronomi. Jakarta: Penebar Swadaya.

Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. 2023. Deskripsi Varietas Unggul Jagung 2023. Bogor: Puslitbangtan.

Subandi, S., M. Syafruddin, & A. Efendi. 2019. Sejarah dan Penyebaran Tanaman Jagung di Indonesia. Bogor: Puslitbangtan.

Syafruddin, M., N. Suharta, & E. Prasetya. 2022. Pemupukan Berimbang Jagung. Bogor: Balittanah.

Papper I., C. Uhlein, L. Jokic., R. Kaldenhoff. 2025. Effects of high light intensity and spectral variability on maize photosynthesis and growth. Frontiers in Plant Science. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1511768

Saputro WA., FA Harahap., IF Dewati. 2025. Hubungan curah hujan terhadap produktivitas pangan di Pulau Jawa. *Agrisaintifika.* Jurnal Ilmu-ilmu Pertanian. Vol. 9 (1). DOI: 10.32585/ags.v9i1.6236

Sirait, S., L Aprilia., F Fachruddin. 2020. Analisis Neraca Air dan Kebutuhan Air Tanaman Jagung (*Zea Mays* L.) Berdasarkan Fase Pertumbuhan Di Kota Tarakan. *Rona Teknik Pertanian,* 13(1), 1– 12. https://doi.org/10.17969/rtp.v13i1.15856

Volenik M., V. Rozman., I. Kalianovic., A. Liska., D. Kis., B. Simic. 2007. Influence of Relative Humidity and Temperature on the Changes in Grain Moisture in Stored Soybean and Maize. *Agriculturae Conspectus Scientificus*. Vol. 72 (3): 215-219

BAB 5
PENGELOLAAN TANAH DALAM BUDIDAYA TANAMAN PANGAN: INTEGRASI BIOCHAR, MIKORIZA, DAN PENGELOLAAN KESUBURAN TANAH BERKELANJUTAN PADA LAHAN MARGINAL

Peningkatan kebutuhan pangan seiring pertumbuhan penduduk menuntut optimalisasi pemanfaatan lahan pertanian, termasuk lahan marginal. Di Indonesia, lahan marginal seperti Ultisol, Oxisol, gambut masam, dan tanah sawah berketerbatasan hara memiliki luasan yang cukup besar dan berpotensi mendukung produksi pangan nasional. Akan tetapi, pemanfaatan lahan tersebut menghadapi berbagai kendala kesuburan tanah yang menyebabkan rendahnya produktivitas tanaman.

Ultisol dan Oxisols adalah tanah yang sangat lapuk yang ditandai dengan kapasitas pertukaran basa rendah, bahan organik rendah, dan keasaman tinggi, terutama karena adanya ion Al dan Fe. Kondisi ini menyebabkan tantangan signifikan bagi produktivitas pertanian, terutama melalui fiksasi fosfor dan potensi toksisitas pada tanaman. Bagian berikut menguraikan aspek-aspek kunci ini. Baik Ultisol dan Oxisols menunjukkan keasaman tinggi, dengan tingkat pH sering di bawah 5. Keasaman ini terkait dengan konsentrasi tinggi aluminium yang dapat ditukar, yang dapat merusak pertumbuhan tanaman (Manrique, 1986; Fatai et al, 2017).

Tanah ini biasanya memiliki saturasi basa dan kapasitas pertukaran kation yang rendah, sehingga ketersediaan nutrisi

penting seperti kalium dan fosfor terbatas. Fiksasi fosfor terjadi karena adanya aluminium amorf dan oksida besi, yang mengikat fosfor, membuatnya tidak tersedia untuk tumbuhan (Prasetyo et al., 2016; Das et al., 1992). Dominasi ion Al dapat menyebabkan toksisitas pada tanaman sensitif, sementara ketersediaan nutrisi yang rendah membatasi pertumbuhan tanaman secara keseluruhan dan produktivitas pertanian (Prause et al., 2013; Fatai et al., 2017).

Praktik pengelolaan tanah yang efektif, seperti pemberian kapur dan amandemen organik, sangat penting untuk meningkatkan kesuburan tanah dan mengurangi efek buruk keasaman dan fiksasi nutrisi (Prasetyo et al., 2016; Fatai et al., 2017). Sebaliknya, sementara Ultisol dan Oxisols menghadirkan tantangan yang signifikan, mereka masih dapat mendukung kegiatan pertanian dengan strategi pengelolaan yang tepat. Praktik berkelanjutan dapat meningkatkan kesuburan dan produktivitas tanah, memungkinkan budidaya tanaman yang sukses bahkan dalam kondisi tanah yang menantang ini.

Pada tanah gambut masam, kendala utama meliputi pH rendah, kandungan asam-asam organik tinggi, rendahnya ketersediaan unsur hara makro terutama fosfor dan kalium, serta tingginya risiko pencucian hara. Sementara itu, tanah sawah dengan intensifikasi tinggi sering mengalami penurunan kualitas tanah akibat penggunaan pupuk anorganik secara terus-menerus tanpa diimbangi penambahan bahan organik. Kondisi tersebut menyebabkan efisiensi pemupukan menurun dan produktivitas tanaman tidak optimal.

5.1 Karakteristik dan Permasalahan Tanah untuk Tanaman Pangan

5.1.1 Tanah Masam

Tanah masam adalah tanah yang memiliki pH rendah, umumnya pH < 5,5. Pada kondisi ini, ketersediaan unsur hara menjadi terbatas dan beberapa unsur seperti Al (aluminium) serta Fe (besi) dapat bersifat racun bagi tanaman. Jenis tanah masam banyak dijumpai pada wilayah tropis basah, termasuk Ultisol, Oxisol, dan sebagian tanah gambut di Indonesia. Secara umum pada tanah ini pertumbuhan perakaran tanaman pangan menjadi terhambat,

tanaman mengalami kekurangan unsur hara terutama unsur P, Ca, Mg dan K (Varghese et al., 20220. Secara umum tanah ini juga mengandung kadar bahan organic yang rendah, sehingga akan menghambat pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme yang menguntungkan di dalam tanah. Beberapa unsur hara seperti P, akan mudah terikat oleh Al dan Fe sehingga menjadi tidak tersedia bagi tanaman pangan. Kasifah (2015) menjelaskan bahwa tingkat tinggi Al yang dapat ditukar (Al-exch) di tanah mineral masam menghambat penyerapan nutrisi, terutama fosfor (P), yang menyebabkan pertumbuhan tanaman yang buruk. Penerapan senyawa humat dan kompos, terutama kompos kotoran ayam, secara efektif mengurangi kadar Al-exch dan meningkatkan ketersediaan P. Ini mengatasi kekurangan nutrisi dan efek toksik Al di tanah asam, sehingga meningkatkan kondisi pertumbuhan akar dan kesehatan tanaman secara keseluruhan di Ultisol yang ditemukan di Sulawesi Selatan, Indonesia.

5.1.2 Ultisol

Ultisol merupakan salah satu tanah marginal yang banyak ditemukan di wilayah tropika basah. Tanah ini dicirikan oleh tingkat pelapukan lanjut, pH masam, kandungan bahan organik dan kejenuhan basa yang rendah, serta kandungan Al-dd yang tinggi. Pada kondisi masam, Al larut dalam jumlah besar dan bersifat toksik terhadap akar tanaman sehingga menghambat pertumbuhan dan penyerapan hara (Rais et al., 2017). Selain itu, fosfor yang diberikan melalui pupuk mudah terfiksasi oleh Al dan Fe sehingga tidak tersedia bagi tanaman dan menyebabkan efisiensi pupuk fosfat menjadi rendah (Wahyuningsih et al., 2017; Maulida et al., 2025).

Pada profil Ultisol umumnya terdapat horizon Bt, yaitu lapisan akumulasi liat berwarna merah hingga kuning akibat dominasi oksida Fe dan Al (Gambar 5.1). Kehadiran oksida Fe dan Al berkontribusi terhadap meningkatnya kepadatan tanah dan menghambat perkembangan akar (He et al., 2019). Horizon Bt yang padat juga dapat membatasi penetrasi akar, terutama apabila terjadi erosi sehingga lapisan tersebut semakin dekat ke permukaan tanah (Shaw, 2001). Kondisi ini menyebabkan penyerapan air dan unsur

hara menjadi terganggu sehingga pertumbuhan tanaman kurang optimal.



Gambar 5.1. Profil Ultisol yang memiliki sub horizon Bt

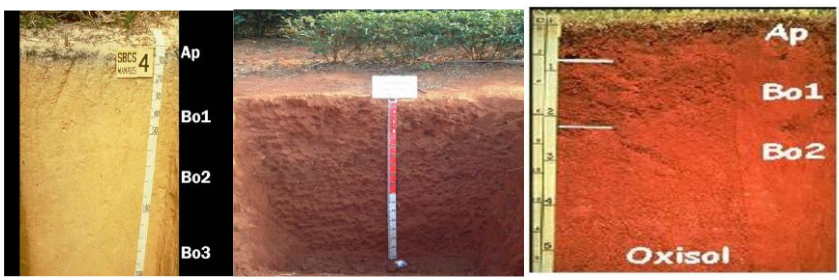
Berbagai penelitian menunjukkan bahwa pengelolaan kesuburan tanah secara terpadu melalui pemanfaatan biochar, pupuk organik, dan mikroorganisme fungsional dapat menjadi solusi untuk memperbaiki kualitas Ultisol. Penambahan biochar sekam padi dan pupuk organik terbukti mampu meningkatkan pH tanah, menurunkan Al-dd, meningkatkan kapasitas tukar kation, serta memperbaiki ketersediaan fosfor. Pada tanaman kentang, aplikasi biochar meningkatkan pH tanah dari 4,87 menjadi 6,47 (Bewuketu, 2025), sedangkan pada tanaman padi kombinasi biochar dan pupuk organik mampu menurunkan Al-dd dan meningkatkan kesuburan tanah (Hayat et al., 2023). Kombinasi tersebut juga meningkatkan efisiensi fosfor hingga 23,89% dibandingkan kontrol (Baquy et al., 2022). Selain memperbaiki retensi hara, penggunaan biochar dan pupuk organik juga dilaporkan meningkatkan pertumbuhan dan biomassa tanaman (Panjaitan, 2024).

Dengan demikian, pengelolaan Ultisol melalui aplikasi biochar, pupuk organik, CMA, PSB, dan pemupukan berimbang menjadi strategi penting untuk meningkatkan kesuburan tanah, efisiensi pemupukan, serta produktivitas pertanian secara berkelanjutan. Pengelolaan jangka panjang, termasuk aplikasi kapur

dan pupuk, meningkatkan kondisi tanah dengan meningkatkan kapasitas pertukaran kation yang efektif dan mengurangi kadar Al yang dapat ditukar. Ini mengurangi hambatan kimia untuk perkembangan akar, memungkinkan tanaman mengakses lebih banyak nutrisi dan air, sehingga mendorong pertumbuhan yang lebih baik. Tanpa pengelolaan seperti itu, perkembangan akar yang terhambat menyebabkan kekurangan air dan nutrisi, mengakibatkan pertumbuhan tanaman yang buruk (Hardy et al., 1990).

5.1.3 Oxisol

Oxisol dicirikan oleh sifatnya yang sangat lapuk, didominasi oleh besi dan aluminium oksida, dan menunjukkan beberapa keterbatasan yang mempengaruhi produktivitas pertanian mereka. Tanah ini biasanya memiliki pH rendah, kapasitas pertukaran kation rendah (CEC), dan fiksasi fosfor yang signifikan, yang secara kolektif menghambat ketersediaan nutrisi. Bagian berikut menguraikan tantangan ini dan strategi manajemen potensial (Gambar 5.2). Oxisol sering memiliki pH di bawah 5, yang menyebabkan peningkatan toksisitas aluminium dan penurunan ketersediaan nutrisi. Kapasitas Pertukaran Kation umumnya rendah, membatasi kemampuan tanah untuk mempertahankan nutrisi esensial (Lobato et al., 2014). Fiksasi fosfor yang tinggi terjadi karena adanya besi dan aluminium oksida, yang mengikat fosfor dengan erat, sehingga tidak tersedia untuk tanaman (Jamet, 1986).

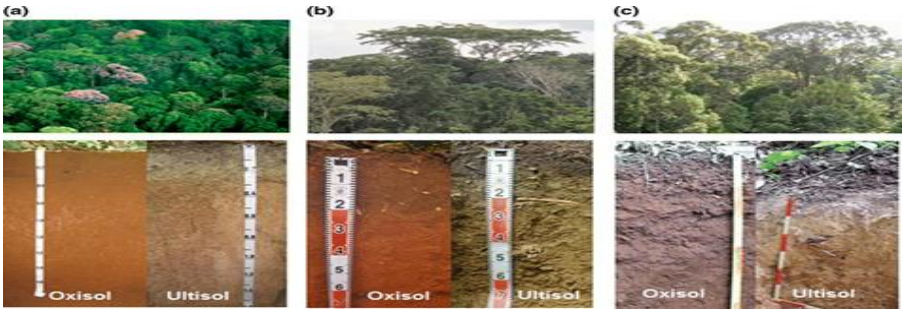


Gambar 5.2. Profil Oxisol
(Sumber: USDA-NRCS Oxisol Profile)

Oxisol biasanya mengandung bahan organik rendah, yang sangat penting untuk retensi nutrisi dan struktur tanah. Menerapkan

praktik tanpa pengolahan dapat meningkatkan retensi bahan organik dan memperbaiki struktur tanah, sehingga meningkatkan ketersediaan nutrisi (Aide, 2024). Menambahkan kalsium silikat dapat membantu mengurangi pH rendah dan meningkatkan ketersediaan nutrisi (Jamet, 1986). Sementara Oxisols menghadirkan tantangan signifikan bagi pertanian, praktik manajemen yang inovatif dapat meningkatkan kesuburan dan produktivitasnya. Namun, keterbatasan yang melekat pada tanah ini memerlukan penelitian berkelanjutan dan adaptasi teknik pertanian untuk mengoptimalkan penggunaannya. Penggunaan bahan organik dan biochar pada Oxisol terbukti dapat memperbaiki sifat kimia tanah. Biochar berperan meningkatkan luas permukaan tanah dan menyediakan gugus bermuatan negatif yang membantu mengurangi kehilangan hara akibat pencucian. Selain itu, aplikasi pupuk hayati seperti bakteri pelarut fosfat dan CMA mampu meningkatkan penyerapan fosfor oleh tanaman.

Perbandingan tampilan antara Ultisol dan oxisol sesuai vegetasi dan tampilan profil tanah disajikan padan Gambar 5.3.



Gambar 5.3. Profil Tanah antara Oxisol dan Ultisol (Sumber: USDA-NRCS. Oxisols and Ultisols. United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.)

5.1.4 Gambut Masam

Tanah gambut masam memiliki karakteristik unik berupa kandungan bahan organik sangat tinggi tetapi ketersediaan unsur hara rendah (Gambar 5.4). pH tanah gambut umumnya sangat masam sehingga aktivitas mikroorganisme tanah dan penyerapan hara oleh tanaman menjadi terganggu. Pada gambut masam juga

sering ditemukan permasalahan kontaminasi logam berat seperti Pb dan Cd, terutama pada lahan yang dipengaruhi aktivitas antropogenik. Dalam kondisi masam, mobilitas logam berat meningkat sehingga berpotensi diserap tanaman dan menurunkan keamanan pangan.



Gambar 5.4. Profil Tanah Gambut (Histosol) (diadaptasi dari ISRIC – Histosols)

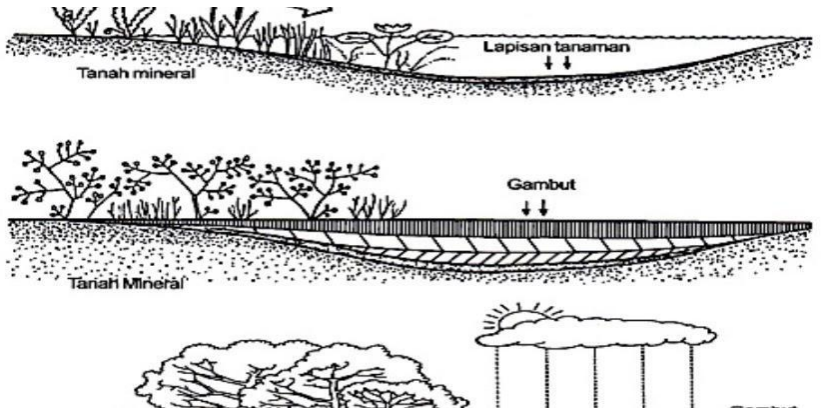
Penggunaan biochar sekam padi yang dikombinasikan dengan CMA dan PSB menjadi pendekatan yang potensial dalam memperbaiki kesuburan gambut masam. Biochar dapat meningkatkan pH tanah dan mengadsorpsi logam berat, sedangkan CMA membantu meningkatkan serapan fosfor dan memperluas daerah jelajah akar tanaman.

Gambar 5.5 menjelaskan proses pembentukan tanah gambut di atas tanah mineral pada daerah cekungan atau lahan yang selalu tergenang air. Ilustrasi ini memperlihatkan tahapan akumulasi sisa-sisa tanaman hingga akhirnya membentuk lapisan gambut. Pada bagian atas gambar terlihat permukaan tanah mineral yang ditumbuhi vegetasi. Sisa-sisa tanaman seperti daun, ranting, dan akar mengalami penumpukan di daerah cekungan yang selalu basah. Karena kondisi lingkungan jenuh air dan miskin oksigen, proses pelapukan bahan organik berlangsung sangat lambat. Akibatnya, sisa tanaman tidak terdekomposisi sempurna dan mulai membentuk lapisan bahan organik di permukaan tanah.

Pada tahap berikutnya, lapisan bahan organik tersebut semakin tebal dan berkembang menjadi gambut. Lapisan gambut terbentuk di atas tanah mineral dan terus mengalami akumulasi dari waktu ke waktu. Semakin banyak vegetasi yang tumbuh dan mati,

semakin tebal pula lapisan gambut yang terbentuk. Kondisi genangan air dan curah hujan tinggi mempercepat proses akumulasi bahan organik karena aktivitas mikroorganisme pengurai menjadi terbatas.

Gambut sebenarnya berasal dari timbunan sisa tanaman yang terawetkan akibat kondisi anaerob (kekurangan oksigen). Oleh karena itu, tanah gambut umumnya memiliki kandungan bahan organik yang sangat tinggi, berwarna gelap, ringan, dan mampu menyimpan air dalam jumlah besar. Secara umum, ilustrasi tersebut menjelaskan hubungan antara vegetasi, kondisi lahan basah, genangan air, dan proses pembentukan tanah gambut di atas lapisan tanah mineral.



Gambar 5.5. Proses pembentukan tanah gambut di atas tanah mineral pada daerah cekungan atau lahan yang selalu tergenang air

Gambar 5.6 merupakan peta sebaran lahan gambut (*peat land*) dan tanah mineral di Indonesia, khususnya di wilayah Sumatra dan Kalimantan. Peta ini memperlihatkan bahwa lahan gambut di Indonesia banyak tersebar pada: Pantai timur Sumatra, seperti Riau, Jambi, Sumatra Selatan, dan sebagian Aceh. Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, dan Kalimantan Selatan. Daerah yang diberi tanda merah pada peta menunjukkan contoh wilayah gambut yang cukup luas, seperti: Kabupaten Ogan Komering Ilir (Sumatra Selatan), Kabupaten Pulang Pisau (Kalimantan Tengah). Lahan gambut memiliki karakteristik kandungan bahan organik sangat tinggi, pH masam, daya simpan air besar, namun

rentan mengalami subsiden dan kebakaran jika dikeringkan. Karena itu, pengelolaan lahan gambut harus dilakukan secara hati-hati agar tetap produktif dan berkelanjutan.



Gambar 5.6. Sebaran tanah gambut di Indonesia (Sumber: Kementerian Pertanian RI, Peta Lahan Gambut Indonesia Skala 1:250.000).

5.1.5 Tanah Sawah intensif dengan Keterbatasan Hara

Intensifikasi budidaya padi secara terus-menerus menyebabkan penurunan kualitas tanah sawah, terutama akibat penggunaan pupuk kimia yang tidak berimbang dan rendahnya pengembalian bahan organik ke tanah. Kondisi ini menyebabkan kandungan bahan organik tanah menurun, efisiensi pupuk berkurang, serta aktivitas biologi tanah mengalami degradasi. Pada beberapa lahan sawah, pemupukan fosfor jangka panjang juga dapat menyebabkan ketidakseimbangan hara dan efisiensi pemupukan rendah. Mengetahui status kesuburan tanah adalah penting agar dapat dilakukan pemupukan yang optimal sehingga tidak mengakibatkan aplikasi pupuk menjadi berlebih, khususnya pupuk buatan. Kondisi status unsur hara dan tingkat kualitas kesuburan tanah disajikan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1. Status hara tanah berdasarkan Hardjowigeno (1983)

PARAMETER	NILAI						SATUAN
	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi		
C (%)	< 1.00	1.00 – 2.00	2.01 – 3.00	3.01 – 5.00	> 5.00		%
N (%)	< 0.10	0.10 – 0.20	0.21 – 0.50	0.51 – 0.75	> 0.75		%
C/N	< 5	5 – 10	11 – 15	16 – 25	> 25		-
P_2O_5 HCl 25 % (mg/100 g)	< 10	10 – 20	21 – 40	41 – 60	> 60		mg/100 g
K_2O HCl 25 % (mg/100 g)	< 10	10 – 20	21 – 40	41 – 60	> 60		mg/100 g
P_2O_5 Bray 1 (ppm)	< 10	10 – 15	16 – 25	26 – 35	> 35		ppm
KTK (me/100 g)	< 5	5 – 16	17 – 24	25 – 40	> 40		me/100 g
Susunan kation :							
K (me/100 g)	< 0.1	0.1 – 0.2	0.3 – 0.5	0.6 – 1.0	> 1.0		me/100 g
Na (me/100 g)	< 0.1	0.1 – 0.3	0.4 – 0.7	0.8 – 1.0	> 1.0		me/100 g
Mg (me/100 g)	< 0.4	0.4 – 1.0	1.1 – 2.0	2.1 – 8.0	> 8.0		me/100 g
Ca (me/100 g)	< 2	2 – 5	6 – 10	11 – 20	> 20		me/100 g
Kejenuhan basa (%)	< 20	20 – 35	36 – 50	51 – 70	> 70		%
Kejenuhan Aluminium (%)	< 10	10 – 20	21 – 30	31 – 60	> 60		%
pH (H_2O)	Sangat masam	Masam	Agak masam	Netral	Agak Alkalis	Alkalis	
	< 4.5	4.5 – 5.5	5.6 – 6.5	6.6 – 7.5	7.6 – 8.5	> 8.5	-
Unsur mikro DTPA:							
Zn (ppm)	Defisien	Medium	Cukup				ppm
Fe (ppm)	0.5	0.5 – 1.0	1.0				ppm
Mn (ppm)	2.5	2.5 – 4.5	4.5				ppm
Mn (ppm)	1.0	-	1.0				ppm
Cu (ppm)	1.0	-	1.0				ppm
B (ppm)	0.2	-	0.2				ppm

Sumber: Djaenudin, D., Marwan, H., Subagjo, H., & Hidayat, A. (2003). Petunjuk Teknis Evaluasi Lahan untuk Komoditas Pertanian. Balai Penelitian Tanah.

Selain itu, pengelolaan air yang kurang tepat dapat meningkatkan kehilangan nitrogen melalui denitrifikasi dan volatilisasi. Penggunaan sistem pemupukan terpadu yang mengombinasikan pupuk organik, biochar, dan pupuk anorganik secara berimbang terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan hara dan produktivtas padi.

Gambar 5.7 menunjukkan contoh tanah sawah di Kecamatan Palembayan, Kabupaten Agam, sekaligus memperlihatkan profil atau lapisan tanah sawah yang terbentuk akibat budidaya padi dalam jangka waktu lama. Pada bagian kiri terlihat aktivitas pengolahan lahan sawah oleh petani. Sawah ini merupakan lahan pertanian yang terus-menerus digenangi dan diolah untuk budidaya padi. Penggenangan air secara terus menerus menyebabkan terjadinya perubahan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah sehingga terbentuk karakteristik khas tanah sawah.

Sementara itu, bagian kanan gambar memperlihatkan profil tanah sawah hasil pengamatan lapangan atau pengeboran tanah. Profil tersebut dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu:

1. **Modern farming paddy soil**

   Merupakan lapisan tanah sawah modern atau lapisan atas yang saat ini aktif digunakan untuk budidaya padi. Pada lapisan ini terlihat horizon atau susunan tanah seperti:

   A1: lapisan atas kaya bahan organik,
   P1: lapisan olah sawah (*plow layer*),
   W1: lapisan jenuh air,
   C1: bahan induk atau lapisan bawah.

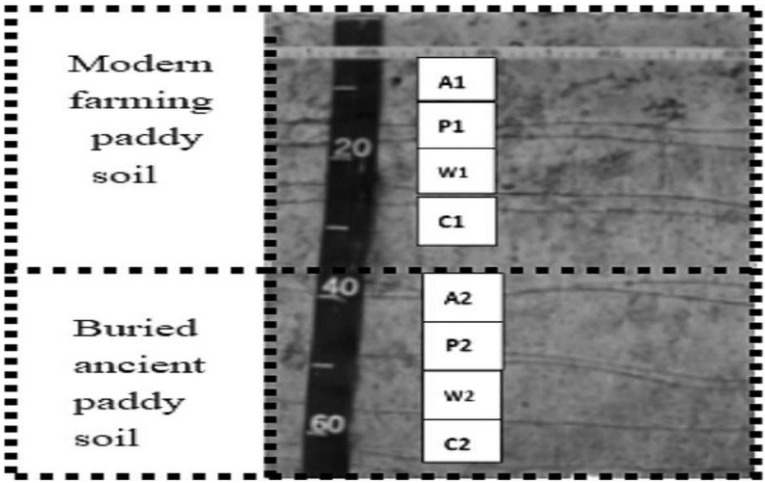
2. ***Buried ancient paddy soil***

   Merupakan lapisan sawah kuno yang tertimbun di bawah lapisan sawah modern. Hal ini menunjukkan bahwa wilayah tersebut kemungkinan telah lama digunakan sebagai lahan persawahan sejak masa lampau. Lapisan ini juga memiliki horizon serupa:

   A2,
   P2,
   W2,
   C2.

   Keberadaan sawah kuno yang tertimbun menunjukkan adanya proses sedimentasi atau penimbunan tanah dari waktu ke waktu, misalnya akibat erosi, banjir, atau deposisi material dari daerah sekitar. Kondisi ini sering ditemukan pada daerah lembah atau kaki gunung yang aktif menerima endapan. Penggenangan menyebabkan terbentuknya lapisan khas seperti lapisan olah (*plow pan*), kondisi reduksi, serta perubahan warna dan struktur tanah. Selain itu, gambar ini juga memberikan informasi bahwa sistem persawahan di daerah Palembayan kemungkinan telah berlangsung sejak lama dan mengalami perkembangan secara bertahap dari generasi ke generasi.





Gambar 5.7. Tanah sawah yang berada di Kecamatan Palembayan, Kabupaten Agam

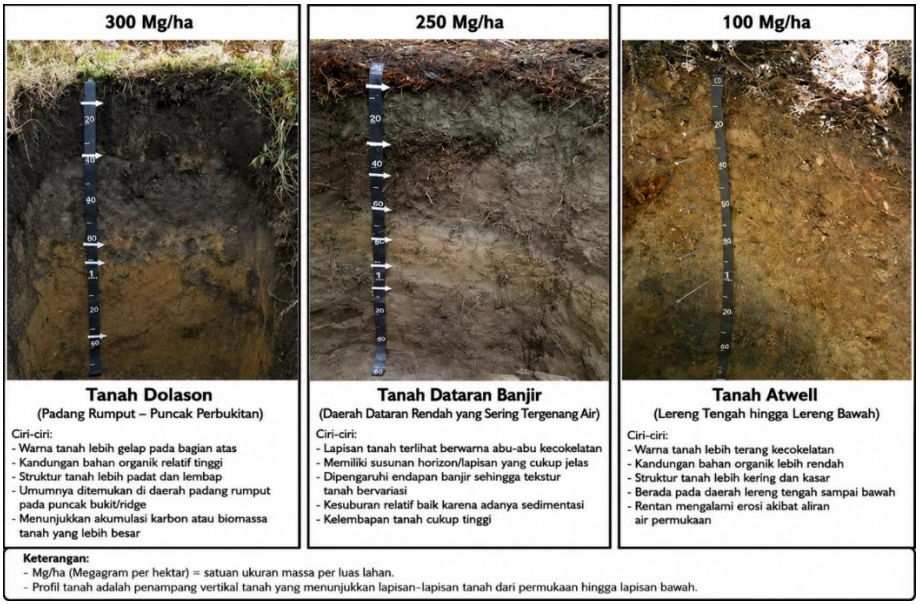
Gambar 5.7. menunjukkn bahwa sawah yang tinggi kadar besi (Fe) menunjukkan tanaman mengalami bronze pada daun padi, ini diidentifikasi pada padi varietas Cisokan, usia 50 hari setelah tanam. Penggenangan bahkan membuat kadar besi (Fe) membentuk Fe^{2+} sangat larut dan mudah diserap tanaman.



Gambar 5.8. Landsekap tanah sawah dengan kondisi tanaman padi keracunan besi

5.2 Rendahnya Bahan Organik sebagai Faktor Pembatas

Bahan organik merupakan komponen penting dalam menjaga kesuburan tanah karena berfungsi sebagai sumber energi mikroorganisme, penyedia unsur hara, serta pembentuk agregat tanah. Pada sebagian besar lahan marginal seperti Ultisol dan Oxisol, kandungan bahan organik sangat rendah akibat tingginya laju dekomposisi di daerah tropis. Rendahnya bahan organik menyebabkan, kapasitas tukar kation rendah, retensi air rendah, aktivitas mikroorganisme tanah menurun, efisiensi pupuk rendah, dan struktur tanah kurang baik. Profil tanah disajikan pada Gambar 6.3, yang menunjukkan berdasarkan kadar bahan organiknya.



Gambar 5.9. Profil tanah dengan kadar bahan organic mulai dari tinggi, sedang dan rendah

Kategori bahan organik tanah mineral umumnya dibedakan berdasarkan persentase C-organik atau bahan organik total (Tabel 5.9). Di Indonesia, acuan yang sering dipakai berasal dari Balai Penelitian Tanah dan PPT Bogor. Pada tanah mineral tropika seperti Ultisol dan Oxisol, kandungan bahan organik sering tergolong rendah karena dekomposisi cepat akibat suhu dan curah hujan tinggi. Penambahan pupuk organik, kompos, pupuk kandang, serta biochar menjadi strategi penting untuk meningkatkan kandungan bahan organik tanah. Dalam beberapa penelitian, kombinasi pupuk kandang, kompos jerami, dan biochar sekam padi mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman secara signifikan. Biochar memiliki stabilitas tinggi sehingga mampu bertahan lama di dalam tanah dan berfungsi sebagai penyimpan karbon jangka panjang. Selain itu, biochar mampu meningkatkan porositas tanah dan menyediakan habitat yang baik bagi mikroorganisme tanah. Berdasarkan kadar C-organik (%), dan konversi menjadi bahan organik (BO), biasanya dihitung: BO (%) = C-organik (%) X 1.724

Tabel 5.2. kadar C-organik dan Bahan Organik tanah mineral berdasarkan kategorinya

Kategori	C-organik (%)	Bahan Organik (%)
Sangat rendah	< 1	< 1,7
Rendah	1,1 – 2	1,7 – 3,4
Sedang	2,1 – 3	3,4 – 5,2
Tinggi	3,1 – 5	5,2 – 8,6
Sangat tinggi	> 5	> 8,6

5.3 Kemasaman Tanah dan Toksisitas Al serta Fe

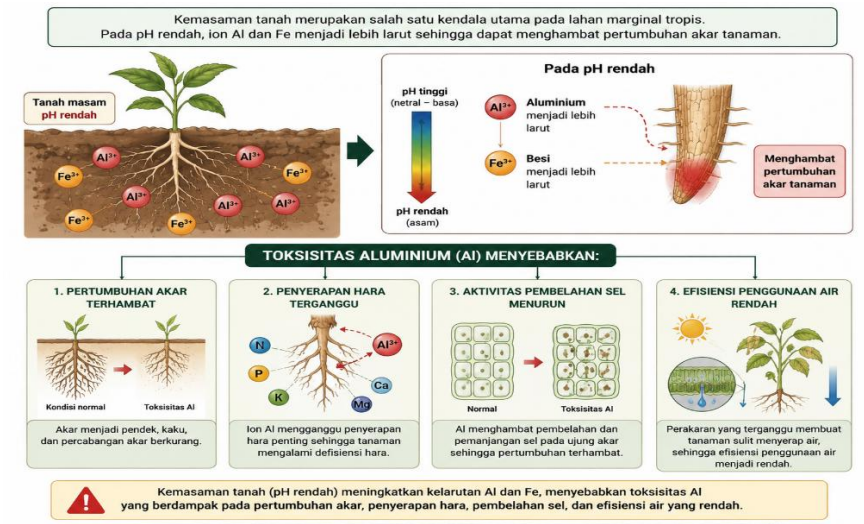
Kemasaman tanah merupakan salah satu kendala utama pada lahan marginal tropis. Pada pH rendah, ion Al dan Fe menjadi lebih larut sehingga dapat menghambat pertumbuhan akar tanaman. Toksisitas Al menyebabkan, pertumbuhan akar terhambat, penyerapan hara terganggu, aktivitas pembelahan sel menurun, dan efisiensi penggunaan air rendah (Gambar 5.10 Sementara itu, Fe dalam jumlah berlebih dapat menyebabkan keracunan Fe terutama pada lahan sawah tergenang. Strategi pengelolaan untuk mengatasi kemasaman tanah meliputi: Pengapuran, Penambahan bahan organik, Penggunaan biochar, dan pemanfaatan mikroorganisme fungsional.

Biochar dan bahan organik mampu meningkatkan pH tanah melalui peningkatan muatan negatif dan pelepasan kation basa. Selain itu, bahan organik dapat mengkelat ion Al dan Fe sehingga mengurangi toksisitasnya terhadap tanaman. Penelitian mengenai charged biochar menunjukkan bahwa biochar yang diperkaya dengan pupuk organik cair dan bakteri pelarut fosfat mampu meningkatkan efektivitas biochar dalam memperbaiki kesuburan tanah. Muatan hara pada permukaan biochar meningkatkan kapasitas adsorpsi dan ketersediaan unsur hara bagi tanaman.

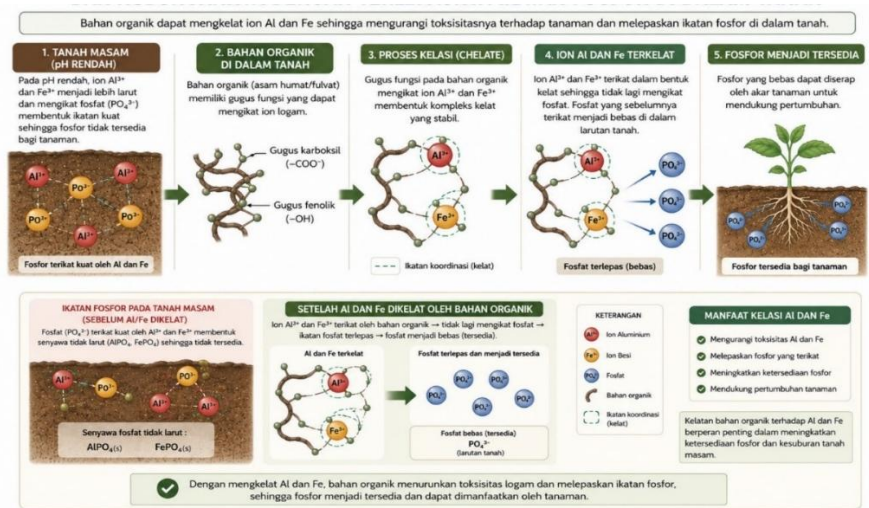
5.4 Fiksasi Fosfor dan Strategi Peningkatan Ketersediaan P

Fosfor merupakan unsur hara esensial yang berperan penting dalam pembentukan energi, perkembangan akar, dan pembentukan hasil tanaman. Namun, pada tanah masam seperti Ultisol dan Oxisol, sebagian besar fosfor terfiksasi oleh Al dan Fe sehingga tidak tersedia

bagi tanaman. Efisiensi pupuk fosfat pada tanah masam sering kali rendah karena sebagian besar fosfor yang diberikan berubah menjadi bentuk tidak larut. Oleh karena itu, diperlukan strategi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan fosfor (Gambar 5.10).



Gambar 5.10. Dampak Kemasaman Tanah terhadap Pertumbuhan Tanaman



Gambar 5.11. Khelat bahan organic terhadap Al dan Fe dan pembebasan Fosfat

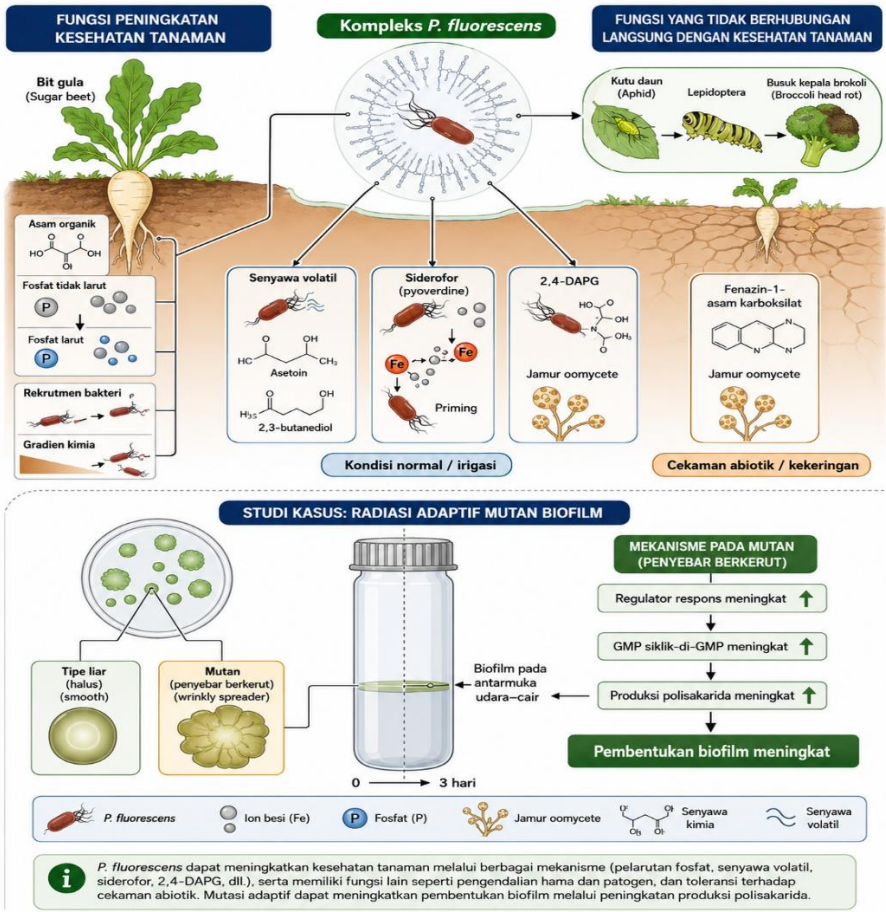
5.5 Penggunaan Bakteri Pelarut Fosfat (PSB)

Bakteri Pelarut Fosfat (PSB) antara lain; *Pseudomonas fluorescens* mampu menghasilkan asam organik yang melarutkan fosfat terikat sehingga meningkatkan ketersediaan fosfor dalam tanah**.** *Pseudomonas fluorescens* merupakan bakteri berbentuk batang. Bakteri ini memiliki ukuran panjang antara 1,5 hingga 3,0 µm (dengan lebar sekitar 0,5 µm), dan selnya dapat berbentuk lurus maupun sedikit melengkung. Sebagai spesies Gram-negatif, *Pseudomonas fluorescens* memiliki dinding sel peptidoglikan yang tipis dengan membran lipid luar. Secara umum, selubung selnya terdiri atas membran sitoplasma (CM), peptidoglikan (PG), dan membran luar (OM). *Pseudomonas fluorescens* juga bersifat motil dan bergerak menggunakan flagela polar. Jumlah flagela berbeda-beda pada setiap strain. Sebagai contoh, *P. fluorescens* MFE01 memiliki dua flagela, sedangkan *P. fluorescens* SBW25 hanya memiliki satu flagel polar. Namun, beberapa strain dapat memiliki lebih dari dua flagela; strain *P. fluorescens* C7R12 bahkan dapat memiliki hingga tujuh flagela. Ketika diamati di bawah mikroskop, *Pseudomonas fluorescens* umumnya ditemukan sebagai sel tunggal. Artinya, bakteri ini biasanya tidak membentuk rantai pendek maupun berpasangan (Gambar 5.12).



Gambar 5.12. Penampakan Mikroskopis dan Struktur Flagela *Pseudomonas fluorescens* (Sumber : https://www.microscopemaster.com/images/Pseudomonas_fluorescens_Gram_ Stain_on_ Microscope_ Slide.jpg)

Penggunaan PSB pada lahan marginal terbukti meningkatkan serapan fosfor dan pertumbuhan tanaman. Mekanisme Biologis *P. fluorescens* dalam Mendukung Pertumbuhan Tanaman. Gambar 5.13 menjelaskan peranan penting bakteri Pseudomonas fluorescens dalam meningkatkan kesehatan dan pertumbuhan tanaman melalui berbagai mekanisme biologis di daerah perakaran (rizosfer). Bakteri ini termasuk kelompok PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) yang mampu memberikan manfaat langsung maupun tidak langsung terhadap tanaman pangan dan hortikultura. Salah satu mekanisme utama yang ditunjukkan pada gambar adalah kemampuan *P. fluorescens* dalam melarutkan fosfat tidak larut di dalam tanah melalui produksi asam organik. Fosfat yang semula tidak tersedia bagi tanaman diubah menjadi bentuk larut sehingga lebih mudah diserap akar. Proses ini sangat penting karena unsur fosfor berperan dalam pembentukan energi, pertumbuhan akar, dan peningkatan hasil tanaman. Selain itu, bakteri ini juga menghasilkan berbagai senyawa volatil seperti asetoin dan 2,3-butanediol yang dapat merangsang pertumbuhan tanaman serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan. Pada kondisi tanah normal maupun teririgasi, *P. fluorescens* juga memproduksi siderofor, yaitu senyawa pengikat besi (Fe) seperti pyoverdine. Siderofor membantu meningkatkan ketersediaan unsur Fe bagi tanaman sekaligus menghambat perkembangan mikroorganisme patogen yang juga membutuhkan Fe untuk tumbuh. Kemampuan *P. fluorescens* menghasilkan senyawa antimikroba seperti 2,4-DAPG dan fenazin-1-asam karboksilat. Senyawa ini berfungsi menekan pertumbuhan jamur dan oomycetes penyebab penyakit tanaman. Dengan demikian, bakteri ini berperan sebagai agen pengendali hayati yang mampu mengurangi serangan penyakit akar maupun penyakit tanaman lainnya.



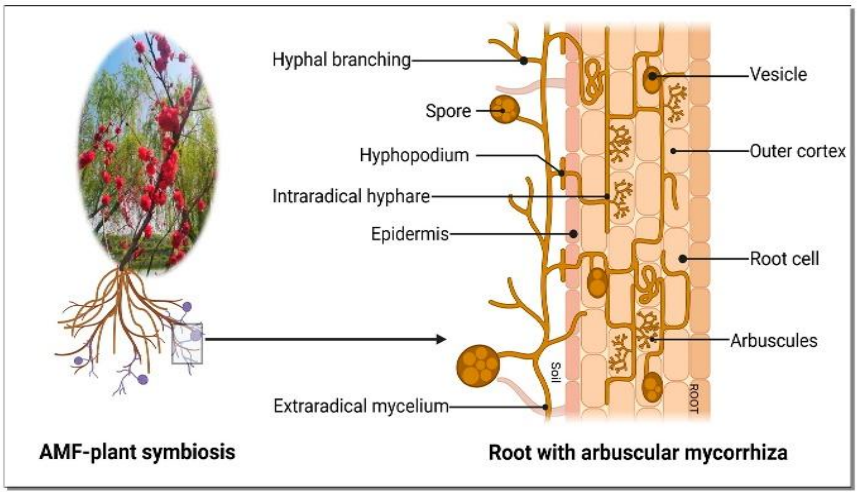
Gambar 5.13. Mekanisme Biologis *P. fluorescens* dalam Mendukung Pertumbuhan Tanaman (sumber Taylor and Jackson, 2024)

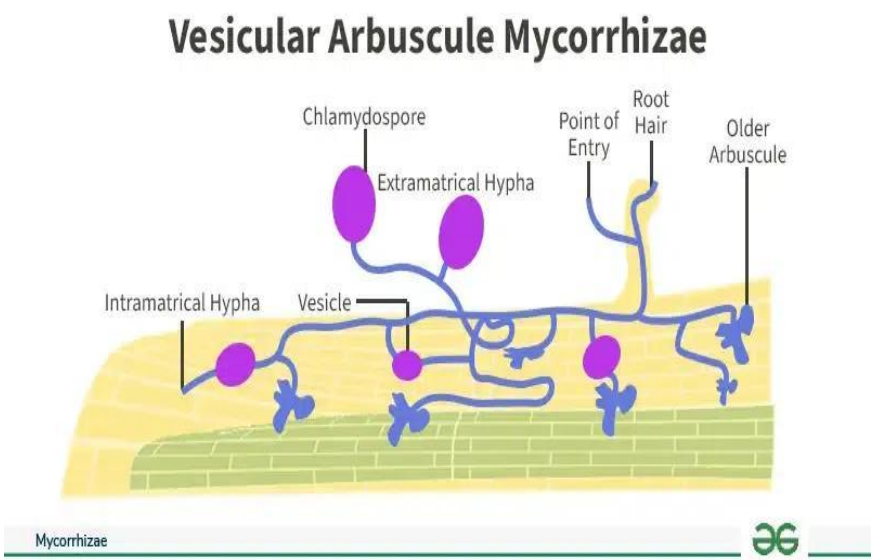
Selain fungsi langsung terhadap kesehatan tanaman, *P. fluorescens* juga memiliki fungsi tidak langsung seperti membantu mengendalikan hama kutu daun (*aphid*), larva Lepidoptera, dan penyakit busuk kepala brokoli. Bakteri ini bahkan dapat membantu tanaman menjadi lebih toleran terhadap cekaman abiotik seperti kekeringan. Bagian bawah gambar menjelaskan studi kasus mengenai mutan biofilm adaptif pada *P. fluorescens*. Mutan tipe "wrinkly spreader" menunjukkan kemampuan membentuk biofilm lebih tinggi dibanding tipe liar (*smooth*). Peningkatan pembentukan biofilm terjadi akibat meningkatnya regulator respons, kadar

senyawa sinyal c-di-GMP, dan produksi polisakarida. Biofilm merupakan lapisan mikroba yang melekat pada permukaan akar atau media tumbuh sehingga membantu bakteri bertahan hidup, memperkuat kolonisasi akar, dan meningkatkan efektivitas interaksi antara bakteri dan tanaman.

5.6 Inokulasi Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA)

Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) atau *Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF)* adalah kelompok cendawan tanah yang hidup bersimbiosis mutualisme dengan akar tanaman. CMA berasal dari filum *Glomeromycota* dan membentuk hubungan yang saling menguntungkan dengan sebagian besar tanaman darat. Gambar 5.14 menjelaskan bahwa Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) atau *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) hidup bersimbiosis dengan akar tanaman dan membantu meningkatkan penyerapan air serta unsur hara, terutama fosfor (P). Mikoriza membentuk hifa, arbuskula, dan vesikel pada akar sehingga daerah serapan akar menjadi lebih luas. Selain meningkatkan pertumbuhan tanaman, CMA juga membantu tanaman lebih tahan terhadap kekeringan, tanah masam, dan serangan patogen. Oleh karena itu, CMA sangat penting dalam pengelolaan tanah dan pertanian berkelanjutan, terutama pada lahan marginal.

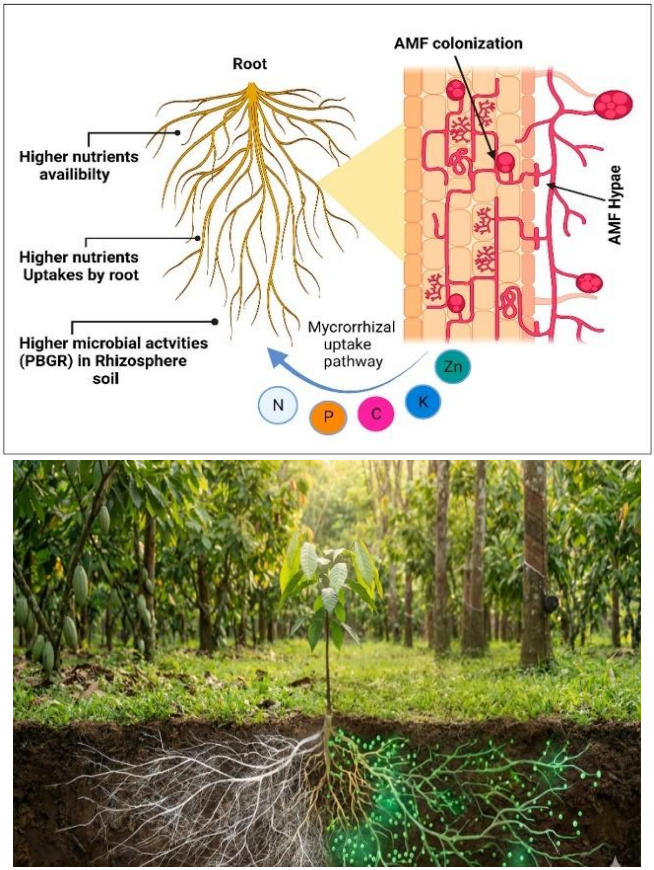




Gambar 5.14. Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) atau *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) hidup bersimbiosis dengan akar tanaman.

Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) atau *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) merupakan mikroorganisme tanah yang hidup bersimbiosis mutualisme dengan akar tanaman (Gambar 5.15). Pada hubungan ini, tanaman menyediakan hasil fotosintesis

berupa karbohidrat sebagai sumber energi bagi cendawan, sedangkan CMA membantu tanaman dalam meningkatkan penyerapan air dan unsur hara dari tanah, terutama fosfor (P), nitrogen (N), kalium (K), serta beberapa unsur mikro lainnya. Hifa cendawan yang berkembang di dalam dan di luar jaringan akar mampu memperluas daerah penyerapan akar sehingga tanaman menjadi lebih efisien dalam memperoleh nutrisi. Selain itu, keberadaan CMA juga dapat meningkatkan aktivitas mikroba tanah, memperbaiki struktur tanah, serta membantu tanaman lebih tahan terhadap cekaman lingkungan seperti kekeringan dan serangan patogen akar.



Gambar 5.15. Simbiosis Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) atau *Arbuscular Mycorrhizal Fungi* (AMF) dengan akar tanaman dalam membantu penyerapan unsur hara dan air.

5.6.1 Fungsi CMA bagi Tanaman

1. Meningkatkan Serapan Hara terutama: fosfor (P), nitrogen (N), Zn, Cu, dan unsur mikro lainnya. Hifa CMA mampu menjangkau pori tanah yang tidak dapat dicapai akar.
2. Meningkatkan Ketahanan Tanaman, CMA membantu tanaman lebih tahan terhadap: kekeringan, salinitas, logam berat, penyakit akar, dan tanah masam.
3. Memperbaiki Struktur Tanah, Hifa CMA membantu pembentukan agregat tanah sehingga: tanah lebih gembur, aerasi lebih baik, dan erosi berkurang. CMA juga menghasilkan glomalin yang penting untuk kestabilan agregat tanah.

5.6.2 Tanaman yang Bersimbiosis dengan CMA

Sebagian besar tanaman dapat bermikoriza, misalnya: padi, jagung, kedelai, cabai, kelapa sawit, kopi, kakao, rumput pakan, dan tanaman kehutanan. Namun beberapa tanaman seperti famili Brassicaceae (kubis, sawi) umumnya tidak responsif terhadap CMA. Beberapa genus yang umum: *Glomus, Acaulospora, Gigaspora, Scutellospora.*

5.6.3 Peranan CMA di Pertanian

CMA banyak digunakan dalam: pertanian berkelanjutan, rehabilitasi lahan marginal, revegetasi lahan bekas tambang, pengurangan pupuk kimia, dan peningkatan efisiensi pupuk fosfat. Karena minat Anda juga banyak terkait kesuburan tanah dan lahan marginal, CMA sangat relevan untuk: Ultisol, Oxisol, gambut masam, serta tanah terdegradasi dengan P tersedia rendah. CMA membantu meningkatkan luas daerah serapan akar melalui pembentukan hifa eksternal. Pada kondisi tanah miskin fosfor, CMA sangat efektif meningkatkan efisiensi penyerapan hara. Penelitian pada padi sawah di tanah kadar Fe tinggi menunjukkan bahwa kombinasi CMA, PSB, dan biochar mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman serta mengurangi serapan logam berat Fe.

5.6.4 Teknik Isolasi Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) dari Tanah

Isolasi CMA dari tanah bertujuan untuk memperoleh spora mikoriza yang dapat digunakan untuk: identifikasi jenis CMA, penghitungan populasi spora, pembuatan inokulum, pengujian efektivitas CMA, dan penelitian biodiversitas mikoriza. Metode yang paling umum digunakan adalah: wet sieving and decanting (penyaringan basah bertingkat), dilanjutkan dengan sentrifugasi sukrosa bila diperlukan. Prinsip Isolasi CMA, Spora CMA dipisahkan dari partikel tanah berdasarkan: ukuran partikel, berat jenis, dan kemampuan spora mengapung dalam larutan tertentu. Spora biasanya berukuran: ±50–500 µm.

Alat dan Bahan

Alat, Saringan bertingkat: (500 µm, 250 µm, 125 µm, dan 63 µm), Gelas beker, Centrifuge, Tabung centrifuge, Pipet, Cawan petri, Mikroskop stereo/binokuler dan Object glass. Bahan; sampel tanah rhizosfer, aquades, larutan sukrosa 60% dan kertas saring, pengambilan sampel tanah, lokasi sampling, Tanah diambil dari: daerah perakaran aktif (rhizosfer), kedalaman ±0–20 cm. Cara Pengambilan, ambil beberapa titik sampling. Campurkan menjadi sampel komposit dan simpan dalam plastik lembab.

Metode Wet Sieving and Decanting, metode ini paling umum digunakan untuk isolasi awal spora CMA, dilakukan dengan cara:

1. Persiapan Suspensi Tanah, Timbang tanah ±50–100 g. Masukkan ke gelas beker. Tambahkan air ±500–1000 mL. dan aduk hingga tanah terdispersi.
2. Pengendapan Partikel Berat, diamkan ±10–20 detik. Partikel besar akan mengendap. Tuangkan suspensi secara perlahan ke saringan bertingkat.
3. Penyaringan Bertingkat, susunan saringan: terbesar di atas, terkecil di bawah. Urutan umum:500 µm, 250 µm, 125 µm, dan 63 µm. Fungsi, menyaring akar dan debris besar, dan menangkap spora berdasarkan ukuran.
4. Pencucian Hasil Saringan, semprot perlahan dengan aquades. Spora akan tertinggal pada saringan tertentu, terutama: 125 µm, dan 63 µm.

5. Pengambilan Spora; bilas hasil saringan ke cawan petri. Amati di bawah mikroskop stereo. Spora biasanya tampak: bulat/oval, kuning, coklat, hitam, atau transparan.
6. Metode Sentrifugasi Sukrosa, digunakan untuk meningkatkan kemurnian spora.
7. Sentrifugasi Awal, masukkan suspensi hasil saringan ke tabung centrifuge. Centrifuge ±3000 rpm selama 3–5 menit dan buang supernatan.
8. Penambahan Sukrosa, menambahkan larutan sukrosa 60%, aduk perlahan hingga homogen.
9. Sentrifugasi Kedua, centrifuge kembali ±1–2 menit. Spora akan mengapung bersama supernatan.
10. Penyaringan Kembali, tuangkan supernatan ke saringan 63 µm. Bilas dengan aquades untuk menghilangkan sukrosa.
11. Pengamatan dan Identifikasi Spora. Parameter Pengamatan; ukuran spora, warna, bentuk, ketebalan dinding, ornamentasi, dan hifa subtending.
12. Perhitungan Jumlah Spora, Jumlah spora biasanya dinyatakan sebagai:

$$\text{Jumlah spora per 100 g tanah} = \frac{Jumlah\ spora\ hasil\ pengamatan}{berat\ tanah\ sampel} \times 100$$

Teknik Identifikasi dan Evaluasi Infeksi CMA pada Akar
Prinsip Identifikasi Kolonisasi CMA

Konsep simbiosis CMA pada korteks akar, struktur yang diamati, hifa internal, vesikula, arbuskula, dan spora (Gambar).

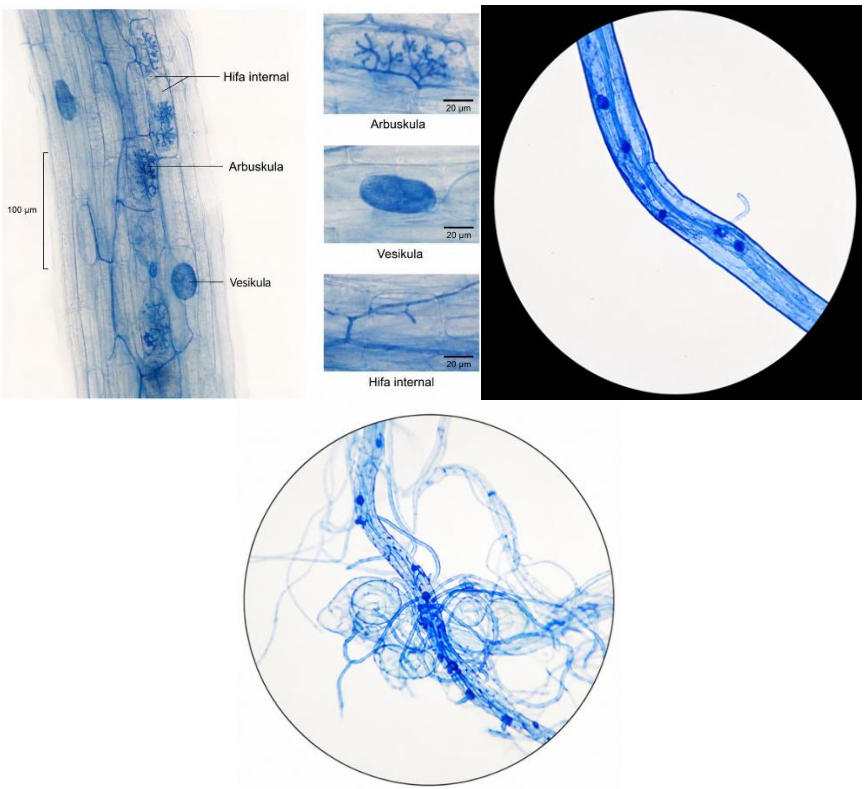
1. Pengambilan dan Preparasi Sampel Akar, pengambilan akar halus, pencucian akar, pemotongan akar ±1 cm dan penyimpanan sampel.
2. Teknik Clearing Akar, Fungsi clearing. Penggunaan KOH, Pemanasan akar, Penghilangan pigmen akar.
3. Teknik Pewarnaan Akar, menggunakan pewarna Trypan blue, lactoglycerol, dan acid fuchsin.
4. Pengamatan Mikroskopis, penggunaan mikroskop compound, pembesaran pengamatan, struktur mikoriza yang diamati dan dokumentasi kolonisasi.

5. Perhitungan Persentase Infeksi CMA, dapat dimasukkan metode: gridline intersect method, Slide method, dan rumus persentase kolonisasi.

   Misalnya:

   Persentase infeksi CMA = $\frac{jumlah\ akar\ terinfeksi}{jumlah\ akar\ yang\ diamati} \times 100\ \%$

Interpretasi Tingkat Kolonisasi, Rendah, Sedang, Tinggi. Hubungan kolonisasi dengan pertumbuhan tanaman. **Kendala dan Pengembangan Metode Identifikasi,** Kesulitan pewarnaan, Variasi ketebalan akar, Teknik molekuler dan Digital imaging dan AI untuk identifikasi CMA.



Gambar 5.16. Infeksi Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) pada akar padi sawah (pewarnaan Tryphan Blue)

5.7 Identifikasi Genus CMA

Genus umum yang sering ditemukan: Glomus, Acaulospora, Gigaspora, Scutellospora, dan Entrophospora. Identifikasi dilakukan berdasarkan: morfologi spora, warna, struktur dinding, dan subtending hyphae.

5.7.1 Faktor yang Mempengaruhi Jumlah Spora CMA

1. **Faktor Tanah;** pH, bahan organik, kadar P tersedia, dan kelembaban tanah.
2. **Faktor Tanaman;** jenis tanaman inang, umur tanaman, dan sistem budidaya.

5.7.2 Kendala dalam Isolasi CMA

1.	**Kendala**	**Penyebab**
2.	Spora sedikit	Tanah miskin CMA
3.	Spora rusak	Penyaringan terlalu kasar
4.	Banyak debris	Pencucian kurang baik
5.	Sulit identifikasi	Spora belum matang

5.8 Pengembangan Teknik Isolasi Modern

Pengembangan teknik isolasi modern pada Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) dilakukan untuk meningkatkan ketepatan identifikasi, mempercepat proses analisis, serta menghasilkan inokulum CMA yang lebih efektif untuk penelitian maupun aplikasi di lapangan. Teknik modern ini melengkapi metode konvensional seperti *wet sieving and decanting* yang selama ini digunakan untuk memisahkan spora CMA dari tanah. Beberapa teknik modern yang banyak dikembangkan meliputi teknik molekuler, digital imaging, dan *trap culture*.

5.8.1 Teknik Molekuler: PCR dan DNA Barcoding

Teknik molekuler digunakan untuk mengidentifikasi CMA berdasarkan materi genetik atau DNA. Metode ini lebih akurat dibandingkan identifikasi morfologi spora karena beberapa jenis CMA memiliki bentuk spora yang mirip sehingga sulit dibedakan secara visual. Salah satu teknik yang banyak digunakan adalah PCR (*Polymerase Chain Reaction*). Kojima et al., (2004) dan Redecker,

(2000) PCR berfungsi memperbanyak fragmen DNA CMA sehingga dapat dianalisis lebih lanjut. Dalam proses ini, DNA diekstraksi dari spora atau akar tanaman yang terinfeksi CMA, kemudian bagian DNA tertentu diperbanyak menggunakan primer khusus. Hasil amplifikasi DNA dapat digunakan untuk mengetahui keberadaan dan jenis CMA yang mengkolonisasi akar tanaman.

Selain PCR, digunakan pula teknik DNA barcoding, yaitu metode identifikasi spesies berdasarkan urutan DNA tertentu yang bersifat khas pada setiap organisme. Lee et al., (2006) menjelaskan bahwa teknik ini memungkinkan identifikasi CMA hingga tingkat genus atau spesies secara lebih cepat dan akurat. DNA barcoding sangat membantu dalam penelitian biodiversitas CMA, pemetaan komunitas mikoriza, serta seleksi CMA unggul untuk lahan marginal. PCR menawarkan keuntungan yang signifikan dalam mengidentifikasi CMA, penting untuk dicatat bahwa metode morfologi masih berperan dalam menyediakan data pelengkap, terutama dalam studi ekologi di mana identifikasi visual dapat menawarkan wawasan tentang struktur komunitas jamur.
Keunggulan teknik molekuler adalah:

1. Identifikasi lebih akurat,
2. Dapat mendeteksi cma meskipun jumlah sporanya sedikit,
3. Mampu membedakan spesies yang morfologinya mirip,
4. Serta mendukung penelitian biodiversitas dan konservasi mikroba tanah.

5.8.2 Digital Imaging: Identifikasi Berbasis Citra

Digital imaging merupakan teknik identifikasi CMA menggunakan teknologi pencitraan digital dan analisis komputer. Pada metode ini, spora CMA atau akar yang terinfeksi difoto menggunakan mikroskop digital, kemudian gambar dianalisis berdasarkan ukuran, warna, bentuk, tekstur, dan struktur spora. Teknologi ini membantu mempercepat proses identifikasi dibandingkan pengamatan manual menggunakan mikroskop biasa. Bahkan saat ini mulai dikembangkan penggunaan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) dan *machine learning* untuk mengenali jenis CMA secara otomatis berdasarkan pola citra.
Digital imaging memiliki beberapa manfaat, yaitu:

1. Meningkatkan ketelitian identifikasi,
2. Mempermudah dokumentasi hasil pengamatan,
3. Mempercepat analisis laboratorium,
4. Mengurangi kesalahan identifikasi manusia,
5. Dan mendukung penyimpanan data digital untuk penelitian jangka panjang.

Teknik ini sangat bermanfaat dalam penelitian mikoriza modern karena memungkinkan analisis dalam jumlah sampel yang besar dengan waktu yang lebih singkat.

5.8.3 Trap Culture: Perbanyakan CMA Menggunakan Tanaman Inang

Trap culture adalah teknik perbanyakan CMA dengan menggunakan tanaman inang tertentu untuk meningkatkan jumlah spora dan inokulum mikoriza. Teknik ini dilakukan karena jumlah spora CMA di tanah alami sering kali sedikit sehingga perlu diperbanyak sebelum digunakan untuk penelitian atau aplikasi lapangan. Pada metode ini, tanah yang mengandung CMA dicampurkan dengan media tanam steril, kemudian ditanami tanaman inang seperti jagung, sorgum, padi, atau rumput-rumputan yang responsif terhadap mikoriza. Tanaman tersebut dipelihara selama beberapa minggu hingga CMA berkembang dan membentuk banyak spora pada daerah perakaran.

Setelah tanaman tumbuh, media tanam dan akar yang telah terkolonisasi dapat digunakan sebagai sumber inokulum CMA. Teknik *trap culture* bertujuan untuk:

1. Meningkatkan populasi spora CMA,
2. Mempertahankan viabilitas dan aktivitas CMA,
3. Memperoleh inokulum dalam jumlah besar,
4. Dan menyeleksi CMA yang adaptif terhadap kondisi lingkungan tertentu.

Keunggulan *trap culture* adalah metode ini relatif sederhana, murah, dan efektif untuk menghasilkan inokulum CMA alami yang siap digunakan dalam budidaya tanaman maupun rehabilitasi lahan marginal.

Dengan berkembangnya teknik molekuler, digital imaging, dan *trap culture*, penelitian CMA menjadi lebih maju dan akurat. Teknologi tersebut mendukung pengembangan pertanian berkelanjutan melalui pemanfaatan mikroorganisme tanah yang mampu meningkatkan efisiensi penyerapan hara dan kesehatan tanah.

5.9 Aplikasi Biochar

Biochar mampu mengurangi fiksasi fosfor melalui peningkatan pH tanah dan penurunan aktivitas Al dan Fe. Selain itu, pori-pori biochar dapat menjadi tempat penyimpanan hara sehingga kehilangan fosfor dapat dikurangi. Biochar dapat dibuat dari pembakaran sekam padi yang sudah di panen, sehingga bahan baku pembuatan biochar sangat melimpah saat petani panen padi.



Gambar 5.17. Pembuatan biochar dari limbah sekam padi

5.10 Pemupukan Berimbang

Pemupukan fosfor perlu disesuaikan dengan kebutuhan tanaman dan status hara tanah. Pendekatan pemupukan spesifik lokasi lebih efektif dibandingkan penggunaan dosis pupuk secara umum. Pemupukan berimbang untuk beberapa komoditi pangan seperti padi, Jagung dan Kedelai sudah dirumuskan oleh (Husnain et al., 2020) berdasarkan masing-masing kecamatan dan kabupaten yang ada di Indonesia. Beberapa kecamatan di Sumatera Barat memiliki dosis pemupukan berimbang berkisar 200 kg NPK (15-15-

15) dan 200 kg Urea khusus padi sawah. Pentingnya menetapkan pemupukan berimbang agar kualitas tanaman dan metabolism tanaman berlangsung dengan baik dan lancar. Menerapkan pemupukan seimbang berdasarkan pengelolaan nutrisi spesifik lokasi telah terbukti secara signifikan meningkatkan hasil tanaman seperti padi dan kedelai. Pendekatan ini mengoptimalkan efisiensi penggunaan nutrisi dan meminimalkan limbah (Bana et al., 2020).

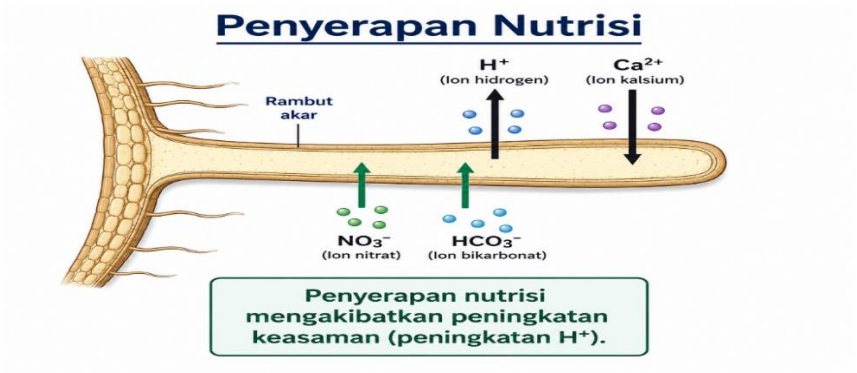
Dengan menyelaraskan praktik pemupukan dengan kondisi tanah setempat, petani dapat mencapai produktivitas dan profitabilitas yang lebih tinggi, sebagaimana dibuktikan dengan potensi peningkatan hasil kedelai saat menggunakan aplikasi nutrisi yang disesuaikan (Permadi & Haryati, 2015). Sebaliknya, sementara pemupukan spesifik lokasi menawarkan banyak manfaat, pemupukan memerlukan data tanah yang komprehensif dan mungkin melibatkan biaya awal yang lebih tinggi untuk pengujian dan analisis. Hal ini dapat menimbulkan tantangan bagi petani kecil yang mungkin tidak memiliki akses ke sumber daya tersebut. Meskipun demikian, keuntungan jangka panjang dari peningkatan hasil panen dan keberlanjutan seringkali lebih besar daripada rintangan awal ini.

Pentingnya pemupukan berimbang harus memperhatikan sebagaimana mekanisme serapan yang dilakukan oleh hara tanaman. Mekanisme serapan hara pada tanaman yang dilakukan melalui perakaran tanaman disajikan pada Gambar 5.18 Proses penyerapan unsur hara oleh rambut akar tanaman serta pengaruhnya terhadap perubahan pH atau tingkat kemasaman tanah di sekitar daerah perakaran (rizosfer). Rambut akar merupakan bagian akar yang berfungsi memperluas permukaan penyerapan sehingga tanaman dapat menyerap air dan unsur hara secara lebih efisien. Dalam proses penyerapan nutrisi, akar menyerap berbagai ion baik yang bermuatan positif (kation) maupun bermuatan negatif (anion) dari larutan tanah.

Akar menyerap ion nitrat (NO_3^-) dan ion kalsium (Ca^{2+}). Ketika tanaman menyerap ion bermuatan positif seperti Ca^{2+}, akar akan melepaskan ion hidrogen (H^+) ke dalam tanah untuk menjaga keseimbangan muatan listrik. Pelepasan ion H^+ ini menyebabkan konsentrasi ion hidrogen di sekitar akar meningkat sehingga tanah

menjadi lebih masam atau mengalami penurunan pH. Oleh karena itu, penyerapan kation dalam jumlah besar dapat meningkatkan kemasaman tanah di daerah perakaran. Sebaliknya, saat tanaman menyerap ion bermuatan negatif seperti nitrat (NO_3^-), akar dapat melepaskan ion bikarbonat (HCO_3^-) atau ion hidroksida (OH^-) ke tanah sehingga kondisi tanah menjadi lebih basa atau pH meningkat. Mekanisme ini menunjukkan bahwa aktivitas penyerapan hara oleh akar sangat memengaruhi keseimbangan kimia tanah di sekitar tanaman.

Dengan demikian, gambar ini menegaskan bahwa proses penyerapan nutrisi tidak hanya berfungsi memenuhi kebutuhan unsur hara tanaman, tetapi juga berperan dalam mengubah kondisi kimia tanah, khususnya tingkat kemasaman tanah di daerah perakaran.



Gambar 5.18. Mekanisme serapan hara pada tanaman yang dilakukan melalui perakaran tanaman

5.11 Efisiensi Pemupukan pada Lahan Marginal

Efisiensi pemupukan menjadi isu penting dalam pengelolaan lahan marginal karena tingginya kehilangan hara akibat pencucian, fiksasi, dan volatilisasi. Penggunaan pupuk kimia secara terus-menerus tanpa perbaikan kondisi tanah menyebabkan respons tanaman terhadap pupuk semakin rendah. Pengelolaan pemupukan yang efektif harus mempertimbangkan, kondisi kimia tanah,

kebutuhan tanaman, kemampuan tanah menahan hara, dan aktivitas biologi tanah.

Pendekatan *integrated nutrient management* (INM) menjadi strategi yang banyak dikembangkan karena mampu mengombinasikan keunggulan pupuk organik, pupuk hayati, dan pupuk anorganik. Pupuk organik berfungsi memperbaiki sifat tanah, biochar meningkatkan retensi hara, mikroba fungsional meningkatkan efisiensi serapan hara, dan pupuk anorganik menyediakan hara secara cepat. Beberapa penelitian pada budidaya padi menunjukkan bahwa kombinasi pupuk organik dan pupuk anorganik mampu meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen dan fosfor dibandingkan penggunaan pupuk anorganik tunggal. (Jamilah et al., 2026) telah membuktikan bahwa aplikasi biochar dan CMA mampu meningkatkan ketersediaan hara di dalam tanah dan meningkatkan hasil padi sawah.

5.12 Peran Biochar dalam Pengelolaan Kesuburan Lahan Marginal

Biochar merupakan bahan kaya karbon hasil pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen. Penggunaan biochar pada lahan marginal semakin berkembang karena memiliki berbagai manfaat dalam memperbaiki kesuburan tanah. Manfaat biochar meliputi, meningkatkan pH tanah, meningkatkan kapasitas tukar kation, meningkatkan retensi air, mengurangi kehilangan hara, meningkatkan aktivitas mikroba tanah, dan mengurangi toksisitas logam berat.

Pada penelitian menggunakan biochar sekam padi, aplikasi biochar mampu memperbaiki sifat kimia dan fisik tanah marginal secara nyata. Biochar sekam padi berperan dalam meningkatkan pH tanah masam sehingga menurunkan kelarutan Al dan Fe yang bersifat toksik bagi tanaman. Peningkatan pH tersebut juga berdampak pada meningkatnya ketersediaan fosfor karena berkurangnya proses fiksasi P oleh Al dan Fe. Selain itu, biochar sekam padi memiliki luas permukaan dan porositas yang tinggi sehingga mampu meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Kondisi ini menyebabkan kemampuan tanah dalam menahan unsur hara menjadi lebih baik dan kehilangan hara akibat pencucian dapat

dikurangi. Pada tanah Ultisol dan Oxisol, aplikasi biochar terbukti meningkatkan efisiensi pemupukan terutama unsur nitrogen dan fosfor. Biochar sekam padi juga berfungsi sebagai habitat yang baik bagi mikroorganisme tanah karena memiliki struktur pori yang mendukung perkembangan mikroba. Peningkatan aktivitas mikroorganisme, termasuk bakteri pelarut fosfat (PSB) dan cendawan mikoriza arbuskula (CMA), berkontribusi terhadap peningkatan ketersediaan dan penyerapan hara oleh tanaman.

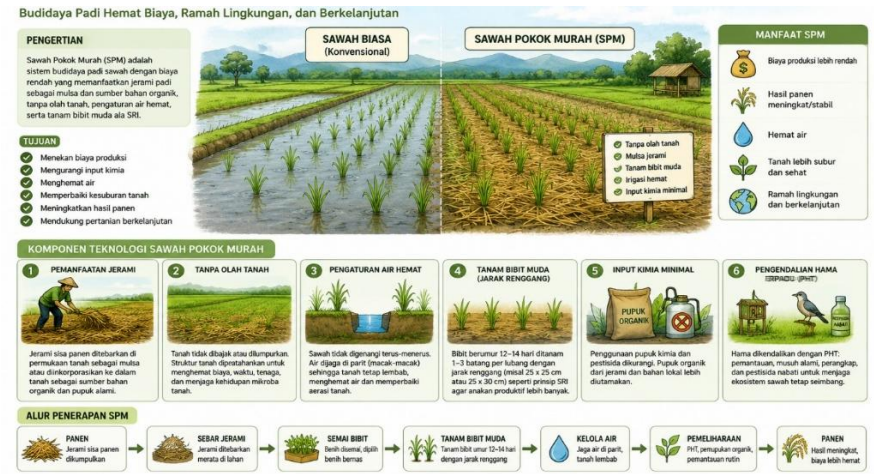
Dalam beberapa penelitian pada tanaman padi, kombinasi biochar sekam padi dengan pupuk organik dan pupuk hayati mampu meningkatkan pertumbuhan akar, jumlah anakan produktif, serapan hara, dan hasil gabah. Biochar juga membantu mempertahankan kelembapan tanah sehingga mendukung pertumbuhan tanaman pada kondisi cekaman lingkungan. Pengembangan charged biochar menjadi inovasi lanjutan dalam pengelolaan kesuburan tanah. Charged biochar merupakan biochar yang diperkaya dengan pupuk organik cair dan mikroorganisme fungsional sebelum diaplikasikan ke tanah. Proses ini memungkinkan permukaan biochar terisi oleh unsur hara dan koloni mikroba sehingga efektivitasnya dalam menyediakan hara menjadi lebih tinggi dibandingkan biochar biasa. Pada kondisi tanah marginal, charged biochar berpotensi meningkatkan efisiensi pemupukan sekaligus memperbaiki kualitas tanah secara berkelanjutan.

5.13 Rekomendasi

5.1.3.1 Pengembangan teknologi local dan pendekatan teknologi terpadu

Teknologi lokal yang dikembangkan pada lahan sawah di Kabupaten Agam adalah sistem Sawah Pokok Murah (SPM), yaitu metode budidaya padi berbiaya rendah yang memanfaatkan jerami sisa panen sebagai sumber bahan organik bagi tanaman berikutnya (Agam.co.id, 2025). Sistem ini dikembangkan untuk menciptakan budidaya padi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Program SPM dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi biaya produksi dan hasil panen melalui penerapan tanpa olah tanah, penggunaan mulsa jerami, serta teknik tanam menyerupai metode SRI (*System of Rice Intensification*) (Kab. Agam,

2025; Dinas Pertanian Kab. Agam, 2025). Dalam penerapannya, sawah tidak digenangi terus-menerus, tetapi dijaga tetap lembab untuk menghemat air. Jerami digunakan sebagai mulsa untuk menjaga kelembaban tanah, menambah bahan organik, dan menekan gulma. Selain itu, bibit muda ditanam dengan jarak lebih renggang agar pertumbuhan akar dan anakan lebih optimal. Sistem SPM juga mengurangi penggunaan pupuk dan pestisida kimia melalui penerapan Pengendalian Hama Terpadu (PHT) dan pemanfaatan bahan alami. Dengan demikian, Sawah Pokok Murah tidak hanya menekan biaya produksi, tetapi juga menjaga kesehatan tanah dan mendukung keberlanjutan budidaya padi sawah.



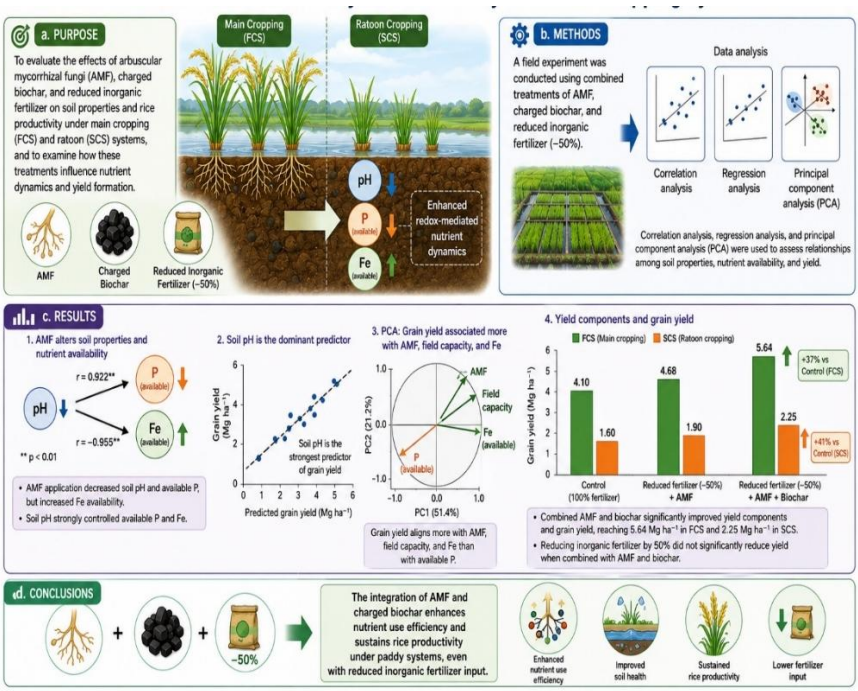
Gambar 5.19. Teknologi Sawah Pokok Murah (SPM) pada Budidaya Padi Berkelanjutan

Penguatan penelitian aplikatif

Jamilah et al., (2026) telah meneliti pemanfaatan fungi mikoriza arbuskula (*Arbuscular Mycorrhizal Fungi*/AMF), charged biochar, dan pengurangan pupuk anorganik sebesar 50% dalam mempertahankan produktivitas padi serta meningkatkan kualitas tanah pada sistem budidaya ratoon. Sistem ratoon merupakan metode budidaya yang memanfaatkan pertumbuhan tunas baru setelah panen pertama sehingga tanaman dapat dipanen kembali tanpa penanaman ulang.

Pendekatan ini dinilai lebih efisien, namun sering menghadapi kendala penurunan kesuburan tanah dan hasil panen apabila pengelolaan hara tidak dilakukan dengan baik.

Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi pengaruh kombinasi AMF, charged biochar, dan pengurangan pupuk anorganik terhadap sifat tanah, dinamika unsur hara, serta produktivitas padi pada dua sistem budidaya, yaitu *main cropping system* (FCS) dan *ratoon cropping system* (SCS). Penelitian lapangan dilakukan dengan pemberian berbagai kombinasi perlakuan, kemudian dianalisis menggunakan analisis korelasi, regresi, dan *Principal Component Analysis* (PCA) untuk mengetahui hubungan antara sifat tanah, ketersediaan hara, dan hasil tanaman.



Gambar 5.20. Pengurangan Pupuk Anorganik dengan AMF dan Biochar Bermuatan pada Sistem Budidaya Ratoon

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi AMF memberikan perubahan nyata terhadap sifat kimia tanah.

Penggunaan AMF menyebabkan penurunan pH tanah dan fosfor (P) tersedia, tetapi meningkatkan ketersediaan besi (Fe). Hubungan antarparameter menunjukkan bahwa pH tanah berkorelasi positif dengan fosfor tersedia dan berkorelasi negatif dengan besi tersedia. Kondisi ini mengindikasikan bahwa perubahan pH tanah sangat memengaruhi dinamika unsur hara di dalam tanah. Analisis regresi memperlihatkan bahwa pH tanah merupakan faktor paling dominan dalam menentukan hasil gabah. Semakin sesuai kondisi pH tanah, maka semakin tinggi produktivitas padi yang dihasilkan. Selain itu, hasil analisis PCA menunjukkan bahwa peningkatan hasil gabah berkaitan erat dengan keberadaan AMF, kapasitas lapang tanah (field capacity), dan ketersediaan Fe. Sebaliknya, fosfor tersedia memiliki hubungan yang berbeda terhadap komponen hasil.

Pada komponen hasil dan produksi gabah, kombinasi perlakuan pengurangan pupuk anorganik sebesar 50% yang dipadukan dengan AMF dan charged biochar memberikan hasil terbaik. Produksi gabah mencapai 5,64 Mg ha^{-1} pada tanaman utama dan 2,25 Mg ha^{-1} pada tanaman ratoon. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan perlakuan kontrol, masing-masing meningkat sekitar 37% pada tanaman utama dan 41% pada ratoon. Hasil ini menunjukkan bahwa pengurangan pupuk anorganik hingga 50% tidak menyebabkan penurunan hasil yang signifikan apabila dikombinasikan dengan AMF dan charged biochar. Penelitian ini menegaskan bahwa integrasi AMF dan charged biochar mampu meningkatkan efisiensi penggunaan unsur hara, memperbaiki kesehatan tanah, serta mempertahankan produktivitas padi meskipun penggunaan pupuk anorganik dikurangi. Temuan ini memberikan peluang penerapan sistem budidaya padi yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan, dan ekonomis melalui pengurangan ketergantungan terhadap pupuk kimia sintetis.

Pertanyaan untuk mahasiswa

1. Apa karakteristik utama tanah marginal seperti Ultisol dan Oxisol?
2. Mengapa fosfor sulit tersedia pada tanah masam?

3. Bagaimana pengaruh kemasaman tanah terhadap pertumbuhan tanaman?
4. Apa fungsi biochar dalam meningkatkan kesuburan tanah?
5. Bagaimana mekanisme kerja bakteri pelarut fosfat (PSB)?
6. Apa manfaat Cendawan Mikoriza Arbuskula (CMA) bagi tanaman?
7. Mengapa bahan organik penting dalam pengelolaan tanah?
8. Apa yang dimaksud dengan integrated nutrient management (INM)?
9. Bagaimana charged biochar membantu meningkatkan efisiensi pemupukan?
10. Mengapa penggunaan pupuk anorganik berlebihan dapat menurunkan kualitas tanah?
11. Apa keuntungan penggunaan sistem ratoon pada budidaya padi?
12. Bagaimana kombinasi AMF dan biochar memengaruhi hasil padi?
13. Apa hubungan pH tanah dengan ketersediaan unsur hara?
14. Mengapa lahan gambut perlu dikelola secara hati-hati?
15. Bagaimana strategi pengelolaan tanah berkelanjutan pada lahan marginal?

5.14 Penutup

Pengelolaan tanah pada lahan marginal merupakan tantangan penting dalam upaya meningkatkan produktivitas tanaman pangan secara berkelanjutan. Permasalahan seperti kemasaman tanah, rendahnya bahan organik, fiksasi fosfor, serta toksisitas Al dan Fe menyebabkan efisiensi pemupukan menjadi rendah dan pertumbuhan tanaman kurang optimal. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan pengelolaan tanah yang terpadu dan ramah lingkungan.

Integrasi biochar, cendawan mikoriza arbuskula (CMA/AMF), bakteri pelarut fosfat (PSB), bahan organik, serta pemupukan berimbang terbukti mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Biochar berperan dalam meningkatkan pH tanah, kapasitas tukar kation, dan retensi hara, sedangkan CMA dan PSB membantu meningkatkan penyerapan unsur hara terutama fosfor serta meningkatkan ketahanan tanaman

terhadap cekaman lingkungan. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, tetapi juga mendukung kesehatan tanah dalam jangka panjang.

Hasil berbagai penelitian menunjukkan bahwa kombinasi biochar dan mikroorganisme fungsional mampu mempertahankan bahkan meningkatkan produktivitas tanaman pangan meskipun penggunaan pupuk anorganik dikurangi. Hal ini memberikan peluang besar dalam pengembangan sistem pertanian yang lebih hemat biaya, ramah lingkungan, dan berkelanjutan, terutama pada lahan-lahan marginal di Indonesia.

Dengan demikian, pengelolaan kesuburan tanah berbasis teknologi lokal, pemanfaatan sumber daya hayati, dan pendekatan integrated nutrient management menjadi strategi penting untuk mendukung ketahanan pangan nasional sekaligus menjaga kelestarian lingkungan pertanian di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

Agam.co.id. 2025. Sawah Pokok Murah Dukung Swasembada Beras, Agam Jadi Percontohan Nasional | Website Resmi Kabupaten Agam. https://www. agamkab.go. id/content/detail_berita_agam/sawah-pokok-murah-berdampak-nyata-dorong-peningkatan-pertanian-dan-ketahanan-pangan-daerah

Aide, M. (2024). Evaluating Land Management Options to Optimize Soil Organic Matter Retention in Oxisols: Case Studies Involving Brazil and Hawaii. In *Sustainable Agroecosystems-Principles and Practices*. IntechOpen.

Bana, R. C., Yadav, S., Shivran, A., Singh, P., & Kudi, V. K. (2020). Site-specific Nutrient Management for Enhancing Crop Productivity. *International Research Journal of Pure and Applied Chemistry*, 17–25. https://doi.org/10.9734/ IRJPAC/ 2020/V21I1530249

Baquy, M. A. A., Pan, X. Y., Li, J. Y., Hong, Z. N., Kamran, M. A., & Xu, R. K. (2022). Synergistic effects of rice straw and its biochar on availability of phosphorus fertiliser in acidic soils. *Crop & Pasture Science*, *73*(12), 1334-1344.

Bewuketu Haile (2025) Biochar and Inorganic Fertilizers for Acidic Soil Management: Improving Soil Properties and Potato Productivity in Ethiopia. Curr Tren Agron & Agric Res 1(2): 1-5

Das, P. K., Sahu, G. C., & Nanda, S. S. K. (1992). Nature of acidity and exchange chemistry of some laterite soils of Orissa. *Journal-Indian Society of Soil Science*, *40*, 425-425.

Dinas Pertanian Kab. Agam. 2025. Pedoman sawah pokok murah. Dinas pertanian Agam. https://ppid.agamkab.go.id/public/statistik/publikasi/file/ buku_pedoman_sawah_pokok_murah_1770372215.pdf, 23 hal.

Fatai, A. A., Shamshuddin, J., Fauziah, C. I., Radziah, O., & Bohluli, M. (2017). Formation and characteristics of an Ultisol in Peninsular Malaysia utilized for oil palm production. *Solid Earth Discussions*, *2017*, 1-21.

Fujii, K., Shibata, M., Kitajima, K. *et al.* Plant–soil interactions maintain biodiversity and functions of tropical forest ecosystems. *Ecol Res* 33, 149–160 (2018). https:// doi.org/10.1007/s11284-017-1511-y

Hardy, D. H., Raper Jr, C. D., & Miner, G. S. (1990). Chemical restrictions of roots in ultisol subsoils lessened by long-term management. *Soil Science Society of America Journal*, *54*(6), 1657-1660.

Hardjowigeno, Sarwono. 2010. Ilmu Tanah. Akademika Pressindo. Jakarta.

Hayat, E. S., Andayani, S., & Hayati, R. (2023). Effect of Combination of Poultry Manure and Rice Husk Biochar on Soil Fertility and Rice Plants. *International Journal of Multi Discipline Science*, *6*(1), 53. https://doi.org/10.26737/ij-mds.v6i1.3751

He, Y., Gu, F., Xu, C., & Chen, J. (2019). Influence of iron/aluminum oxides and aggregates on plant available water with different amendments in red soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, *74*(2), 145-159.

Jamet, R. (1986). Les oxydisols de la Polynésie française. Caractérisation et fertilité. *Cah. Orstom, Sér. Pédol*, *22*, 285-299.

Jamilah, Hidayat, R., Haryoko, W., Ermawati, Desi, Y., Sidabalok, I., ... & Fridarti. (2026, February). Enhancing Nutrient Uptake and Growth Quality of Lowland Rice through the Application of AMF and Nutrient-Enriched Biochar. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1583, No. 1, p. 012023). IOP Publishing.

Kab. Agam. 2025. Sawah Pokok Murah Dukung Swasembada Beras, Agam Jadi Percontohan Nasional.https://www.agamkab.go.id/content/detail_berita_agam/sawah-pokok-murah-dukung-swasembada-beras-agam-jadi-percontohan-nasional

Kasifah, S. (2015). Reducing exchangeable-Al and increasing P availability in Ultisol by the application of humic compounds and compost. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, *9*(3), 23–27. https://www.cabdirect.org/cabdirect/ abstract/20153189768

Kojima, T., Sawaki, H., & Saito, M. (2004). Detection of arbuscular mycorrhizal fungi, archaeospora leptoticha, and related species coloning plant roots by specific PCR primer. *Soil Science and Plant Nutrition*, *50*(1), 95–101. https://doi.org/10.1080/00380768.2004.10408456

Lee, J., Park, S. H., & Eom, A. H. (2006). Molecular identification of arbuscular mycorrhizal fungal spores collected in Korea. *Mycobiology*, *34*(1), 7-13.

Lobato, E. M. S. G., Fernandes, A. R., Lobato, A. D. S., Guedes, R. S., Netto, J. R. C., Moura, A. D. S., ... & Borgo, J. D. H. (2014). The chemical properties of a clayey oxisol from Amazonia and the attributes of its phosphorus fractions. *J Food Agric Environ*, *2*, 1328-1335.

Manrique, L. A. (1986). The relationship of soil ph to aluminum saturation and exchangeable aluminum in ultisols and oxisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *17*(4), 439–455. https://doi.org/10.1080/00103628609367725

Maulida, M., Yusran, F. H., Fachruzi, I., & Mariana, Z. T. (2025). Pengaruh Amelioran terhadap Jerapan Isotermal Fosfat di Tanah Mineral Masam: Effect of Ameliorant on Isothermal Phosphate Sorption in Acid Mineral Soil. *Acta Solum*, *3*(2), 67-74.

Permadi, K., & Haryati, Y. (2015). Pemberian Pupuk N, P, dan K Berdasarkan Pengelolaan Hara Spesifik Lokasi untuk Meningkatkan Produktivitas Kedelai (Review). *Agrotrop: Journal on Agriculture Science*, *5*(1), 1–8.

Prasetyo, B. H., Suharta, N., & Hikmatullah, H. (2001). Chemical and mineralogical properties of Ultisols of Sasamba area, East Kalimantan. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, *2*(2), 37-47.

Prause, J., Fernández López, C., & Dalurzo, H. C. (2013). Concentraciones totales de fe, Mn, Al y P en alfisoles, oxisoles y ultisoles en Misiones, Argentina.

Rais, M., & Lubis, A. (2017). Pengaruh Tepung Cangkang Kepiting Terhadap pH Tanah dan Al-dd Pada Tanah Ultisol: Effect of Crab Shell Powder on Soil pH and Al-dd on Ultsiol. *Jurnal Agroteknologi*, *5*(1), 138-143.

Redecker, D. (2000). Specific PCR primers to identify arbuscular mycorrhizal fungi within colonized roots. *Mycorrhiza*, *10*(2), 73-80.

Shaw, J. N. (2001). Iron and aluminum oxide characterization for highly-weathered alabama ultisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *32*, 49–64. https://doi.org/10.1081/CSS-100102992

Soil profile of Oxisol. https://www.uidaho.edu/agricultural-life-sciences/soil-orders/ oxisols, diakses tanggal 29 Mei 2026.

Taylor T, Silby M, Jackson R. 2024. *Pseudomonas fluorescens.* Trends in Microbiology 33, 250-251

USDA-SDA-NRCS. 1999. Oxisols Profile. Natural Resources Conservation Service. https://www.nrcs.usda.gov/conservation-basics/natural-resource-concerns /soil/oxisols

Varghese, E. M., Kour, B. P., Ramya, S., Kumar, N. S., Jisha, M. S., & Ramakrishnan, B. (2022). *Rhizosphere microbe-mediated alleviation of aluminum and iron toxicity in acidic soils* (pp. 499–526). https://doi.org/10.1016/b978-0-323-89973-4.00003-x

Wahyuningsih, W., Proklamasiningsih, E., & Dwiati, M. (2017). *Serapan fosfor dan pertumbuhan kedelai (Glycine max) pada tanah Ultisol dengan pemberian asam humat. Biosfera, 33 (2), 66-70*.

BAB 6
PENGENDALIAN HAMA DAN PENYAKIT TANAMAN

6.1 Konsep Dasar Pengendalian Hama Terpadu (HPT)

Pengendalian Hama Terpadu (PHT) merupakan pendekatan ekologi dalam manajemen hama yang mengintegrasikan berbagai metode pengendalian secara harmonis untuk menjaga populasi hama di bawah ambang ekonomi. PHT telah berkembang menjadi strategi utama pertanian berkelanjutan global, menggantikan paradigma lama yang terlalu bergantung pada pestisida kimia sintetik. Pendekatan ini menempatkan ekosistem pertanian sebagai sistem yang kompleks dan dinamis, di mana keseimbangan populasi hama dapat dikelola melalui kombinasi tindakan biologis, kimia, fisik, dan kultur teknis.

Menurut Angon et al. (2023), serangga hama, gulma, dan patogen tanaman merusak lebih dari 40% total produksi pangan global setiap tahunnya. Fakta ini menegaskan urgensi implementasi PHT yang efektif dan berkelanjutan. PHT tidak hanya bertujuan menekan kerugian ekonomi tetapi juga melindungi keanekaragaman hayati dan keseimbangan lingkungan.

6.1.1 Filosofi dan Prinsip Ekologi PHT

Filosofi dasar PHT bertumpu pada pemahaman bahwa hama adalah bagian inheren dari ekosistem pertanian dan tidak perlu dieradikasi secara total. Tujuan pengelolaan bukan eliminasi sempurna, melainkan menjaga populasi hama agar tidak melampaui ambang kerusakan ekonomi (Sharma dan Kumar, 2024). PHT mengakui peran predator alami, parasitoid, dan patogen sebagai regulator populasi hama secara alami.

Prinsip ekologi PHT mencakup:

1. Pengamatan rutin dan pemantauan populasi hama;

2. Penetapan ambang ekonomi (*economic threshold*) sebagai dasar pengambilan keputusan;
3. Pemanfaatan musuh alami dan agens hayati;
4. Penggunaan varietas tahan;
5. Modifikasi lingkungan melalui praktik budidaya; dan
6. Penggunaan pestisida kimia sebagai pilihan terakhir dengan mempertimbangkan selektivitas dan dampak lingkungan.

Dalam kerangka *Climate-Smart One-Health* (CS-OH) yang diusulkan oleh para ilmuwan terkini, PHT perlu diintegrasikan dengan faktor ekologi, lingkungan, dan sosio-ekonomi yang mempertimbangkan kesehatan manusia, hewan, tanah, dan air secara holistic (Navik et el., 2025). Pendekatan ini sangat relevan mengingat perubahan iklim yang berdampak signifikan pada distribusi dan intensitas serangan hama.

6.1.2 Pengambilan Keputusan Berdasarkan Ambang Ekonomi

Ambang ekonomi (*economic threshold*/ET) dan ambang kerusakan ekonomi (*economic injury level*/EIL) merupakan dua konsep kunci dalam pengambilan keputusan PHT. EIL didefinisikan sebagai tingkat kepadatan populasi hama di mana nilai kerusakan yang ditimbulkan sama dengan biaya pengendalian. Sementara ET adalah kepadatan populasi di mana tindakan pengendalian harus dilakukan untuk mencegah populasi mencapai EIL.

Penggunaan pestisida yang didasarkan pada ambang ekonomi, pemantauan hama, dan sistem pendukung keputusan terbukti dapat secara signifikan mengurangi jumlah bahan kimia yang dibutuhkan untuk menjaga populasi hama di bawah tingkat yang merusak, sehingga menurunkan biaya input bagi petani dan mengurangi perkembangan resistensi pestisida (Sharma dan Kumar, 2024).

Komponen utama pengambilan keputusan PHT meliputi: identifikasi dan monitoring hama, penghitungan populasi di lapangan, perbandingan dengan ambang batas, dan pemilihan metode pengendalian yang tepat. Petani dan petugas penyuluh pertanian perlu terampil dalam teknik pengamatan dan pencatatan

data populasi hama secara berkala untuk dapat mengambil keputusan yang tepat dan efisien.

6.1.3 Metode PHT secara Fisik, Mekanis, dan Kultur Teknis

Pengendalian fisik dan mekanis merupakan komponen penting PHT yang ramah lingkungan dan tidak meninggalkan residu kimia. Metode fisik mencakup penggunaan perangkap cahaya (light trap), perangkap feromon, perangkap warna (*yellow sticky trap*), pagar penghalang, dan manipulasi suhu. Pengendalian mekanis meliputi pengambilan manual hama, penggunaan jaring, dan pembersihan sisa tanaman.

Penelitian terkini mengenai metode perangkap multi-sumber fisik dan kimia menunjukkan bahwa kombinasi perangkap cahaya-seks-warna (*color-sex-light trap*) secara sinergis efektif dalam mengendalikan berbagai hama padi (Zeng et al, 2025). Dalam konteks praktis, perangkap feromon telah mendapat perhatian sebagai alat PHT yang cerdas iklim, karena spesifik terhadap spesies dan ramah lingkungan, dan berhasil digunakan dalam pengelolaan hama seperti ulat grayak (*Spodoptera frugiperda*) (Navik et el., 2025).

Kultur teknis (*agronomic practices*) merupakan pilar PHT yang paling fundamental karena bersifat preventif dan berkelanjutan. Praktik kultur teknis yang umum diterapkan antara lain rotasi tanaman, pengolahan tanah, pengaturan waktu tanam, pemilihan varietas tahan, pengelolaan pupuk dan air, sanitasi lahan, serta pengaturan jarak tanam. Rotasi tanaman antara padi sawah dan jagung dataran tinggi terbukti berdampak pada bakteri dan archaea yang mengkolonisasi akar, yang secara tidak langsung mempengaruhi komposisi mikrobioma tanah dan ketahanan tanaman.

6.2 Hama Utama Tanaman Pangan dan Strategi Pengendaliannya

Tanaman pangan utama seperti padi, jagung, kedelai, dan kacang-kacangan menghadapi ancaman dari berbagai jenis hama yang dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang signifikan. Pemahaman mendalam tentang biologi, ekologi, dan perilaku hama merupakan prasyarat utama dalam merancang strategi pengendalian yang efektif. Setiap hama memiliki karakteristik spesifik yang memerlukan pendekatan pengendalian yang berbeda.

Kerugian akibat hama merupakan kendala utama produktivitas pertanian, dengan estimasi hingga 40% dari produksi tanaman global hilang setiap tahun akibat hama (Sharma dan Kumar, 2024). Di kawasan Asia, ancaman tambahan datang dari ulat grayak (*Spodoptera frugiperda*) yang merupakan hama invasif dengan kemampuan reproduksi cepat, penyebaran luas, dan adaptabilitas yang luar biasa yang menimbulkan risiko kerugian panen yang signifikan (Kafle dan Joshi, 2025).

6.2.1 Hama Penggerek dan Pengisap Batang

Penggerek batang padi (*Scirpophaga incertulas* dan *Chilo suppressalis*) merupakan salah satu hama terpenting pada tanaman padi di Asia Tenggara. Larva penggerek masuk ke dalam batang tanaman dan memakan jaringan di dalamnya, menyebabkan gejala "sundep" pada fase vegetatif (tanaman layu dan mati) dan "beluk" pada fase generatif (malai putih dan steril). Strategi pengendalian integratif mencakup penggunaan varietas tahan, manipulasi waktu tanam untuk menghindari puncak populasi, penggunaan perangkap feromon, dan aplikasi insektisida sistemik yang selektif.

Penggunaan agen hayati *Trichogramma* sebagai parasitoid telur penggerek batang telah terbukti efektif dalam program PHT berbasis pengendalian hayati. Dalam penelitian di Subregion Mekong Raya, implementasi PHT berbasis pengendalian hayati menggunakan *Trichogramma* berhasil mengurangi penggunaan pestisida hampir setengahnya pada petani yang mengadopsi strategi ini (Wyckhuys et al., 2019).



Gambar 6.1. Hama Penggerek Batang
(Sumber : https://diperpa.badungkab.go.id)

Pengisap batang, terutama wereng batang coklat (*Nilaparvata lugens*), merupakan ancaman serius pada pertanaman padi. Wereng menghisap cairan tanaman secara langsung dan juga bertindak sebagai vektor penyakit *virus grassy stunt* dan *ragged stunt*. Pengendalian wereng meliputi: penggunaan varietas tahan, pengaturan jarak tanam, pengelolaan air, monitoring populasi secara berkala, penggunaan insektisida sistemik dengan rotasi bahan aktif untuk mencegah resistensi, dan konservasi musuh alami seperti laba-laba dan parasitoid.

6.2.2 Hama Pemakan Daun dan Polong

Ulat grayak (*Spodoptera frugiperda*) merupakan hama invasif yang telah menyebar dari Amerika Neotropis ke Afrika, Asia, dan Oseania sejak 2016. Hama ini menjadi perhatian global karena kemampuannya merusak berbagai tanaman pangan, terutama jagung. Di Asia, ada kekhawatiran pergeseran inang dari jagung ke padi (Kafle dan Joshi, 2025). Pengendalian kimia semakin menantang karena saat ini FAW telah menunjukkan 257 kasus resistensi terhadap 45 bahan aktif insektisida yang berbeda di seluruh dunia (Maria et al, 2024).

Hama pemakan daun lainnya pada tanaman kedelai dan kacang-kacangan seperti ulat polong (*Helicoverpa armigera*) dan ulat daun (*Spodoptera litura*) menyebabkan kerusakan serius pada fase pembungaan dan pembentukan polong. Strategi pengendalian terpadu meliputi: penggunaan varietas toleran, intercropping

dengan tanaman penolak hama, pemanfaatan parasitoid *Trichogramma* dan *Braconid*, serta aplikasi biopestisida berbasis *Bacillus thuringiensis* (Bt) yang selektif terhadap ulat pemakan daun.



Gambar 6.2. Kumbang Daun Kacang Polong (*Sitona lineatus*)
(Sumber : https://saskpulse-com.translate.goog)

6.2.3 Hama Mamalia dan Rodensia (Tikus Sawah)

Tikus sawah (*Rattus argentiventer*) merupakan hama rodensia paling merusak pada pertanaman padi di Asia Tenggara. Serangan tikus dapat terjadi sepanjang siklus pertumbuhan padi, dari persemaian hingga panen, dengan potensi kerugian 5-30% bahkan bisa mencapai 100% bila terjadi ledakan populasi. Tikus bersifat nokturnal, hidup berkoloni, dan memiliki kemampuan reproduksi yang sangat tinggi (dapat menghasilkan 3-5 generasi per tahun dengan 5-12 anak per kelahiran).



Gambar 6.3. Tikus Sawah
(Sumber : https://tabloidsinartani.com)

Pengendalian terpadu tikus sawah meliputi berbagai pendekatan:

1. Pengendalian fisik: gropyokan massal, pemasangan bubu perangkap, pagar plastik TBS (*Trap Barrier System*) di sekitar pertanaman;
2. Pengendalian biologis: konservasi predator alami seperti burung hantu (*Tyto alba*) melalui pemasangan rumah burung;
3. Pengendalian kimia: rodentisida antikoagulan dengan umpan beracun (*bait station*) yang ditempatkan strategis di sekitar lahan;
4. Sanitasi lingkungan: pembersihan saluran irigasi, pinggiran jalan, dan tempat bersarang; serta
5. Penerapan budidaya serentak dalam satu hamparan untuk meminimalkan ketersediaan pakan.

6.2.4 Hama Gudang dan Pascapanen

Kerugian pascapanen akibat hama gudang menjadi tantangan serius dalam ketahanan pangan. Hama gudang utama pada tanaman pangan meliputi: kumbang bubuk (*Sitophilus oryzae, S. granarius*), ngengat gudang (*Sitotroga cerealella*), dan kutu tepung (*Tribolium castaneum*). Hama-hama ini dapat menurunkan kualitas dan kuantitas biji-bijian yang disimpan secara signifikan dalam waktu yang singkat.

Pengendalian hama gudang secara terpadu mencakup: penyiapan gudang yang bersih dan bebas retakan sebelum penyimpanan, pengeringan bahan hingga kadar air aman (< 14%), penggunaan wadah atau kemasan yang kedap udara dan tahan hama, fumigasi dengan fosfin atau karbon dioksida untuk infestasi berat, serta aplikasi insektisida kontak berbahan aktif *pirimifos-metil* pada permukaan gudang. Pendekatan terbaru mencakup penggunaan *diatomite earth (*DE) sebagai insektisida fisik yang aman dan tidak meninggalkan residu berbahaya.



Gambar 6.4. Hama Gudang
(Sumber : https://www.scribd.com)

6.2.5 Teknik Pemantauan dan Pengamatan Populasi Hama

Pemantauan populasi hama merupakan komponen kritis PHT yang menjadi dasar seluruh keputusan pengendalian. Teknik pemantauan yang umum digunakan meliputi:

1. Metode jaring ayun (*sweep net*) untuk hama yang aktif di kanopi tanaman;
2. Perangkap cahaya untuk hama yang aktif malam;
3. Perangkap feromon seks untuk memantau populasi ngengat;
4. Pengamatan visual terstruktur dengan menggunakan metode unit sampel;
5. Pitfall trap untuk arthropoda permukaan tanah; dan
6. Teknologi digital seperti sensor IoT dan kecerdasan buatan untuk deteksi dini otomatis.

6.3 Penyakit Utama Tanaman Pangan dan Epidemiologinya

Penyakit tanaman merupakan ancaman biotik yang dapat menyebabkan kehilangan hasil yang dramatis bila kondisi lingkungan mendukung perkembangan patogen. Pemahaman epidemiologi penyakit meliputi segitiga penyakit (patogen-inang-lingkungan), siklus infeksi, dan mekanisme penyebaran sangat penting untuk merancang strategi pengendalian yang efektif dan tepat waktu.

Patogen penyebab penyakit tanaman pangan terdiri dari empat kelompok utama: cendawan (fungi), bakteri, virus, dan nematoda. Setiap kelompok memiliki karakteristik epidemiologi yang berbeda, sehingga memerlukan pendekatan pengendalian yang spesifik. Faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan curah hujan sangat mempengaruhi perkembangan dan penyebaran epidemi penyakit.

6.3.1 Penyakit Akibat Infeksi Cendawan (Jamur)

Penyakit blas pada padi yang disebabkan oleh cendawan *Magnaporthe oryzae* merupakan penyakit padi paling merusak di seluruh dunia, dengan potensi kehilangan hasil hingga 50% pada serangan yang parah (Wang dan Dean, 2022). Penyakit ini menginfeksi padi pada semua fase pertumbuhan, dari persemaian hingga pengisian biji, menyebabkan bercak daun, busuk leher malai, dan sterilitas gabah.



Gambar 6.5. Penyakit Blas Tanaman Padi
(Sumber : https://distankan.bulelengkab.go.id)

Pengendalian blas secara terpadu melibatkan kombinasi varietas tahan (memanfaatkan gen *Pi* dan piramida gen resistensi), pengelolaan nitrogen yang tidak berlebih, aplikasi fungisida (triazol, strobilurin, dan kombinasinya), serta penggunaan agen hayati. Strategi terkini mencakup pendekatan molekuler seperti Host-Induced Gene Silencing (HIGS) yang menargetkan gen-gen kunci patogenisitas dan perkembangan *M. oryzae* (Wang dan Dean, 2022).

Evaluasi fungisida kombinasi modern terhadap blas padi menunjukkan bahwa kombinasi strobilurin dan triazol memberikan efektivitas yang superior dibandingkan penggunaan tunggal. [15] Namun, penggunaan fungisida harus dirotasi secara berkala untuk menghindari perkembangan resistensi patogen terhadap bahan aktif tertentu.

Penyakit jamur penting lainnya pada tanaman pangan meliputi: hawar daun jagung (*Helminthosporium turcicum*), bulai jagung (*Peronosclerospora maydis*), antraknosa kedelai (*Colletotrichum truncatum*), dan karat daun pada berbagai serealia. Pengelolaan penyakit-penyakit ini umumnya melibatkan penggunaan varietas tahan, rotasi tanaman, sanitasi lahan, perlakuan benih dengan fungisida, dan aplikasi fungisida foliar berdasarkan ambang keparahan penyakit.

6.3.2 Penyakit Akibat Infeksi Bakteri

Hawar daun bakteri (Bacterial Leaf Blight/BLB) pada padi yang disebabkan oleh *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae* (Xoo) merupakan penyakit bakteri paling merusak pada padi di kawasan tropis dan subtropis. Infeksi BLB dapat menyebabkan kehilangan hasil 20-70% tergantung pada varietas, stadium infeksi, dan kondisi iklim (Jain et al., 2023).



Gambar 6.6. Hawar Daun Bakteri
(Sumber : https://distankan.bulelengkab.go.id)

Analisis genomik terkini terhadap 30 strain *X. oryzae* dari lima benua mengidentifikasi 28 jenis gen resistensi antibiotik dan 16 gen virulen yang mencakup sistem sekresi tipe III dan VI, gen motilitas, dan protein efektor (Adedibu et al., 2024). Temuan ini menunjukkan adanya ancaman berkembangnya strain yang resisten terhadap berbagai bahan kimia.

Metode pengendalian BLB yang paling efektif dan ekonomis adalah penggunaan varietas tahan melalui piramida gen resistensi (*Xa4, xa5, xa13, Xa21*). Pendekatan marker-assisted backcross breeding (MABB) telah berhasil mengintegrasikan empat gen resistensi ke dalam varietas padi populer dengan mempertahankan karakteristik agronomis yang unggul (Gautam et al., 2023). Selain varietas tahan, penelitian terkini mengeksplorasi potensi terapi bakteriofag sebagai strategi pengendalian biologis yang menjanjikan (Jain et al., 2023).

6.3.3 Penyakit Akibat Infeksi Virus dan Peran Serangga Vektor

Penyakit virus pada tanaman pangan terutama disebarkan oleh vektor serangga. Serangga dari ordo Hemiptera, Thysanoptera, dan Coleoptera merupakan kelompok vektor virus terpenting. Famili *Aleyrodidae*, *Aphididae*, *Cicadellidae*, dan *Delphacidae* merupakan keluarga-keluarga serangga yang paling penting sebagai vektor virus tanaman (Wendimu, 2024).



Gambar 6.7. Wereng Penular Tungro pada Padi
(Sumber : https://distankan.bulelengkab.go.id)

Di antara vektor-vektor tersebut, kutu daun (aphid) dan kutu kebul (*whitefly*) merupakan vektor primer yang mentransmisikan lebih dari 500 spesies virus. Virus tanaman diklasifikasikan berdasarkan lamanya viruliferous vector persisten, semi persisten (SP), atau non-persisten (NP) dan rute virus di dalam vektornya (Rao et el., 2024). Penyakit virus penting pada tanaman pangan di Indonesia antara lain: tungro padi (*Rice Tungro Bacilliform* Virus/RTBV dan *Rice Tungro Spherical* Virus/RTSV), yang disebarkan oleh wereng hijau; penyakit kerdil rumput padi (*Rice Grassy Stunt* Virus) yang ditularkan oleh wereng batang coklat; dan mosaik jagung.

Perubahan iklim diperkirakan akan memperburuk epidemiologi penyakit virus tanaman dengan memengaruhi distribusi, perilaku, dan keanekaragaman populasi vector (Blancard et al, 2023). Strategi pengendalian penyakit virus meliputi: penggunaan varietas toleran/tahan, pengendalian populasi vektor (insektisida, agens hayati, tanaman refugia), eradikasi tanaman terinfeksi, pengelolaan kebun yang bersih, dan penggunaan mulsa reflektif untuk mengusir vektor.

6.3.4 Cekaman Abiotik dan Penyakit Fisiologis

Selain patogen biotik, tanaman pangan juga rentan terhadap berbagai cekaman abiotik yang dapat menyebabkan gejala menyerupai penyakit (penyakit fisiologis). Cekaman abiotik utama

meliputi: defisiensi hara (nitrogen, fosfor, kalium, besi, seng, boron), toksisitas mineral (aluminium, besi berlebih), kekeringan, genangan air, suhu ekstrem, dan kadar garam tanah yang tinggi.



Gambar 6.7. Pengaruh Salinitas pada Padi
(Sumber : https://forestryinformation.wordpress.com)

Penyakit fisiologis pada padi antara lain: kresek akibat defisiensi kalium, kurang besi, keracunan besi (bronzing), dan akumulasi gas H2S pada lahan sawah dengan dekomposisi bahan organik tinggi. Pada jagung, gejala umum penyakit fisiologis meliputi: daun menguning akibat defisiensi nitrogen (N), klorosis interveinal akibat defisiensi magnesium (Mg), serta busuk batang yang diperparah oleh cekaman kekeringan pada fase pengisian biji. Diagnosa yang akurat melalui analisis tanah dan jaringan tanaman sangat penting untuk membedakan penyakit fisiologis dari infeksi patogen.

6.4 Agen Pengendali Hayati dan Manajemen Pestisida Kimiawi

Pengendalian hayati (*biological control*) merupakan komponen esensial PHT yang memanfaatkan organisme hidup (musuh alami) untuk menekan populasi hama dan patogen. Strategi ini mencakup konservasi musuh alami yang sudah ada di lapangan, augmentasi melalui pelepasan massal agens hayati, dan introduksi agens hayati eksotis untuk pengendalian hama invasif. Penggunaan agens hayati secara integratif dengan metode pengendalian lainnya memberikan sinergi positif dalam program PHT jangka panjang.

6.4.1 Eksploitasi Agen Pengendali Hayati (Bioremediasi)

Agen pengendali hayati (*Biological Control Agents*/BCA) yang banyak digunakan dalam pertanian pangan mencakup: fungi antagonis (*Trichoderma* spp.), bakteri pengendali (*Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp.), parasitoid (*Trichogramma* spp.), predator (laba-laba, kumbang Carabid, kepik), dan entomopatogen (*Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*) (Saldaña-Mendoza, et al., 2025).

Trichoderma spp. merupakan fungi pengendali hayati yang paling banyak digunakan secara komersial, mencakup 50-60% pasar global BCA. Mekanisme pengendalian *Trichoderma* meliputi mikoparasitisme, kompetisi nutrisi, antibiosis melalui produksi enzim litik dan metabolit sekunder, serta induksi resistensi sistemik pada tanaman (Guzmán-Guzmán et al., 2023).

Bacillus spp., khususnya *B. subtilis* dan *B. velezensis*, mengendalikan patogen melalui produksi lipopeptid (iturin, surfaktin, fengycin), enzim litik, siderofor, dan aktivasi resistensi sistemik terinduksi (ISR) (Syed Ab Rahman et al, 2023). Strain *Bacillus* terpilih juga terbukti efektif sebagai agen PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) yang meningkatkan pertumbuhan tanaman sekaligus menekan patogen tular tanah.

Kemajuan bioteknologi telah membuka peluang peningkatan efektivitas BCA melalui: enkapsulasi menggunakan biopolimer lignin untuk meningkatkan stabilitas dan viabilitas spora *Trichoderma*; mutagenesis kimia untuk menghasilkan mutan dengan aktivitas antagonistik yang lebih kuat; serta formulasi nano untuk meningkatkan ketahanan BCA terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem (Saldaña-Mendoza et al., 2025).

Dalam program PHT padi dan jagung di Subregion Mekong Raya, pembangunan 22 fasilitas perbanyakan *Trichogramma* menunjukkan bahwa 11 fasilitas masih memproduksi agen hayati dalam jumlah besar 1,5 tahun setelah dukungan proyek berakhir, sementara petani pengguna berhasil mengurangi penggunaan pestisida hampir 50% (Wyckhuys, et al., 2019).

Konservasi dan augmentasi musuh alami di lapangan dapat dilakukan melalui berbagai cara: penanaman tanaman refugia (bunga-bungaan) di pinggiran sawah sebagai habitat dan sumber makanan musuh alami; pengurangan penggunaan pestisida luas

spektrum yang merugikan musuh alami; penyediaan habitat berlindung bagi predator; serta program pelepasan mussal parasitoid pada saat puncak populasi hama.

6.4.2 Aplikasi Pestisida Kimiawi secara Bijaksana

Penggunaan pestisida kimia yang tidak terkendali dan indiskriminatif telah memicu degradasi ekologi, risiko kesehatan manusia, dan perkembangan resistensi hama (Agnihotri et al., 2024). Meskipun demikian, pestisida kimia tetap diperlukan sebagai "perisai terakhir" dalam program PHT bila metode pengendalian lainnya tidak cukup efektif. Penggunaan bijaksana (*judicious use*) pestisida mensyaratkan: identifikasi tepat sasaran, pemilihan bahan aktif selektif, dosis dan waktu aplikasi yang optimal, serta rotasi bahan aktif untuk mencegah resistensi.

Resistensi pestisida merupakan masalah global yang semakin mengkhawatirkan. Resistensi berkembang sebagai proses evolusi di mana sifat-sifat yang memberikan kemampuan menghindari atau mentoleransi pestisida dipilih melalui tekanan seleksi. [44] Perkembangan resistensi yang cepat, bahkan seluruh kelompok *Mode of Action* (MoA) kimia telah menjadi tidak efektif terhadap hama-hama tertentu, menegaskan perlunya rotasi dan diversifikasi bahan aktif dalam program manajemen resistensi.

Prinsip-prinsip utama penggunaan pestisida yang bijaksana meliputi:

1. Gunakan pestisida hanya apabila populasi hama atau tingkat keparahan penyakit telah melampaui ambang ekonomi.
2. Pilih bahan aktif yang selektif dan berisiko rendah terhadap musuh alami, penyerbuk, dan organisme non-target lainnya.
3. Lakukan rotasi bahan aktif berdasarkan kelompok *Mode of Action* (MoA) yang berbeda untuk mencegah dan mengelola resistensi.
4. Ikuti dosis yang direkomendasikan pada label pestisida; hindari penggunaan dosis sub-letal yang mempercepat seleksi resistensi.
5. Gunakan alat aplikasi yang tepat (nozzle, volume semprot) untuk memastikan distribusi merata dan meminimalkan drift.

6. Perhatikan interval pra-panen (PHI/*Pre-Harvest Interval*) untuk memastikan residu pestisida di bawah Batas Maksimum Residu (BMR) pada saat panen.
7. Simpan dan buang kemasan pestisida sesuai prosedur yang benar untuk mencegah kontaminasi lingkungan.

Pendekatan pengurangan ketergantungan pestisida melalui manajemen tanaman terpadu—diversifikasi agroekologi, inovasi kimia, dan adopsi biopestisida—terbukti dapat mengurangi penggunaan pestisida hingga 61% dengan mempertahankan atau bahkan meningkatkan hasil panen (Chen et al., 2025). Hal ini menunjukkan bahwa pertanian yang produktif dan berkelanjutan dapat dicapai melalui integrasi berbagai strategi pengelolaan hama yang cerdas dan berbasis bukti ilmiah.

Kemajuan teknologi digital dan presisi pertanian membuka peluang baru dalam manajemen pestisida yang lebih efisien. Penggunaan drone untuk aplikasi pestisida secara presisi, sensor IoT untuk pemantauan hama real-time, kecerdasan buatan untuk prediksi serangan hama berbasis data cuaca dan citra satelit, serta sistem pendukung keputusan berbasis web dan mobile telah mulai diterapkan di berbagai negara maju dalam pertanian. Adopsi teknologi-teknologi ini di Indonesia masih dalam tahap awal namun memiliki potensi yang sangat besar untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan pengelolaan hama di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

Adedibu, P. A., Son, O., Tekutyeva, L., & Balabanova, L. (2024). Pathogenomic Insights into Xanthomonas oryzae pv. oryzae's Resistome, Virulome, and Diversity for Improved Rice Blight Management. Life, 14(12), 1690. https://doi.org/10.3390/life14121690 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC11678079/

Agnihotri, P., et al. (2024). Comprehensive insights into pesticide residue dynamics: unraveling impact and management. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 11, 182. https://doi.org/10.1186/s40538-024-00708-4 https://chembioagro.springeropen.com/articles/10.1186/s40538-024-00708-4

Angon, P. B., Islam, Md. S., KC, S., Anjum, N., Poudel, A., & Arif, Md. A. U. (2023). Integrated Pest Management (IPM) in Agriculture and Its Role in Maintaining Ecological Balance and Biodiversity. Advances in Agriculture, 2023, 5546373. https://doi.org/10.1155/2023/5546373 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2023/5546373

Blancard, D., et al. (2023). Epidemiology and Management of Plant Viruses Under a Changing Climate. Phytopathology, 114(1). https://doi.org/10.1094/PHYTO-07-23-0262-V https://apsjournals.apsnet.org/doi/10.1094/PHYTO-07-23-0262-V

Chen, M., et al. (2025). Reduced pesticide dependency through crop management. Discover Applied Sciences. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07248-y https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-025-07248-y

Gautam, R. K., et al. (2023). Marker-assisted enhancement of bacterial blight resistance in a salt-tolerant rice variety for sustaining rice production of tropical islands. Frontiers in Plant Science, 14, 1221537. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1221537

https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2023.1221537/full
Guzmán-Guzmán, P., et al. (2023). Trichoderma species: Our best fungal allies in the biocontrol of plant diseases—a review. Plants, 12(3), 432. https://doi.org/10.3390/plants12030432 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9921048/
Jain, L., Kumar, V., Jain, S. K., Kaushal, P., & Ghosh, P. K. (2023). Isolation of bacteriophages infecting Xanthomonas oryzae pv. oryzae and genomic characterization of novel phage vB_XooS_NR08 for biocontrol of bacterial leaf blight of rice. Frontiers in Microbiology, 14, 1084025. https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1084025 https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2023.1084025/full
Kafle, L. K., & Joshi, R. C. (2025). Review: Integrated pest management is critical in fight against fall armyworm threat to Asian rice security. CABI News, April 2025. https://www.cabi.org/news-article/review-integrated-pest-management-is-critical-in-fight-against-fall-armyworm-threat-to-asian-rice-security/
Maria C. Melo, MC., et al. (2024). Pest management research is not geared toward transformability. Frontiers in Sustainable Food Systems, 8, 1375065. https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1375065 https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2024.1375065/full
Navik, O., et al. (2025). Roadmap for mainstreaming integrated pest management (IPM) into a climate smart one-health (CS-OH) framework. PMC. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12155761/ https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12155761/
Rao, YD., Kumar, D., & Sharma, S. (2024). A comprehensive review on transmission mechanism of plant viruses by insects. International Journal of Research in Agronomy, SP-7(7), 337–344. DOI: https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i7Se.1049

https://www.agronomyjournals.com/archives/2024/vol7issue7S/PartE/S-7-7-33-372.pdf

Saldaña-Mendoza, S. A., et al. (2025). Biological control agents: mechanisms of action, selection, formulation and challenges in agriculture. Frontiers in Agronomy, 7, 1578915. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1578915 https://www.frontiersin.org/journals/agronomy/articles/10.3389/fagro.2025.1578915/full

Sharma, A., & Kumar, V. (2024). Integrated Pest Management: An Update on the Sustainability Approach to Crop Protection. ACS Omega. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06628 https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.4c06628

Syed Ab Rahman, S. F., et al. (2023). Bacterial and Fungal Biocontrol Agents for Plant Disease Protection: Journey from Lab to Field. PMC. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537577/ https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10537577/

Wang, M., & Dean, R. A. (2022). Host induced gene silencing of Magnaporthe oryzae by targeting pathogenicity and development genes to control rice blast disease. Frontiers in Plant Science, 13, 959641. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.959641 https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2022.959641/full

Wendimu, Y. (2024). Insect Vectors of Plant Viruses: Host Interactions, Their Effects, and Future Opportunities. Advances in Agriculture. https://doi.org/10.1155/aia/6006985 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/aia/6006985

Wyckhuys, K. A. G., et al. (2019). Impact Assessment of Biological Control-Based Integrated Pest Management in Rice and Maize in the Greater Mekong Subregion. PMC/Insects. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6723913/ https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6723913/

Zeng, W., Peng, J., Feng, C., Chen, Q., & Jiang, C. (2025). Synergistic Attraction and Ecological Effects of Multi-Source Physical and Chemical Trapping Methods with Different Mechanism

Combinations on Rice Pests. Insects, 16(10), 1001. https://doi.org/10.3390/insects16101001
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12565363/

BAB 7
IRIGASI DAN MANAJEMEN AIR DALAM BUDIDAYA TANAMAN PANGAN

7.1 Pengantar Irigasi Pertanian

7.1.1 Pengertian irigasi

Secara mendasar, irigasi dapat didefinisikan sebagai serangkaian kegiatan yang berfokus pada pemanfaatan sumber air demi mendongkrak produktivitas sektor pertanian. Aktivitas ini mencakup tata kelola air yang komprehensif, mulai dari penyediaan, ekstraksi, alokasi, hingga pengaliran air menuju area persawahan atau perkebunan (Mahyuddin et al. 2024).

Kedudukan irigasi dalam dunia pertanian sangatlah krusial sebagai sebuah sistem manajemen air (Juhana et al., 2016 dalam Priyonggo et al., 2025). Lebih lanjut, sistem ini dipahami sebagai integrasi dari berbagai elemen yang saling menopang untuk menjamin ketersediaan, pembagian, dan regulasi air demi mengoptimalkan hasil panen. Secara operasional, irigasi mengalirkan air dari sumber alami ke lahan pertanian lewat mekanisme yang terstruktur, sekaligus memastikan efisiensi pemakaian dan ketepatan pembuangannya. Di samping fungsi utamanya memasok air bagi vegetasi, irigasi juga memegang peranan penting dalam menstabilkan temperatur tanah, mencuci polutan atau zat beracun, mengendalikan populasi hama, menaikkan tinggi muka air tanah, serta membersihkan sisa buangan air akibat pemadatan lahan.

Secara prinsip, teknik pengairan mengandalkan ekstraksi air dari berbagai asal, meliputi air permukaan (sungai dan danau), air tanah (melalui instalasi sumur bor maupun gali), air hujan, serta kolam tampungan. Pemanfaatan sumur bor atau sumur gali menjadi solusi vital bagi area pertanian yang lokasinya terisolasi dari jaringan waduk atau aliran sungai alami. Di sisi lain, sistem pemanen air hujan

dioperasikan dengan menangkap air menggunakan saluran khusus untuk dialirkan ke bak penampung atau kolam. Air cadangan ini dioptimalkan tatkala ketersediaan pasokan air alami mulai menyusut, demi menjaga kontinuitas suplai pengairan lahan. Terlepas dari ketersediaan sumbernya, kelangsungan irigasi ditopang oleh keberadaan sarana dan prasarana penunjang seperti waduk, bendungan, embung, kanal irigasi berjenjang (primer, sekunder, dan tersier), pintu air, serta sarana pelengkap pendukung lainnya.

Lebih lanjut, struktur pelengkap seperti bangunan bendung, pintu sadap, kanal pembuangan, dan sistem drainase ikut andil dalam mempermudah manajemen, kalkulasi volume, hingga pengurasan air secara terukur. Adapun variasi metode irigasi di lapangan mencakup teknik irigasi permukaan (aliran di atas tanah), bawah permukaan (aliran di bawah tanah), sprinkler atau pancaran (menyerupai curahan hujan buatan), irigasi bertekanan/pompa, hingga sistem irigasi tetes yang menyalurkan air secara langsung ke area perakaran tanaman agar lebih hemat (Priyonggo et al., 2025).

7.1.2 Irigasi dan tantangan masa depan

Integrasi teknologi sensor dan sistem otomatisasi pada instrumen pengairan modern memegang andil besar dalam mengoptimalkan efisiensi air, serta mampu memangkas tingkat pemborosan hingga kisaran 30%. Mekanismenya bertumpu pada peranti sensor kelembapan tanah yang disebar di sejumlah titik lahan guna merekam data kelengasan secara real-time. Lewat sistem otomatis ini, pengairan hanya akan berjalan saat kondisi tanah benar-benar kering, sehingga risiko kelebihan pasokan air yang memicu pemborosan serta kerusakan tanaman akibat saturasi air dapat dihindari.

Sinkronisasi antara indikator internal lahan dan eksternal lingkungan ini menghasilkan manajemen pengairan yang sangat responsif terhadap dinamika lapangan. Keberhasilan implementasi teknologi ini telah dirasakan oleh komunitas petani di pedesaan, di mana mereka dapat memantau sekaligus mengendalikan perangkat irigasi dari jarak jauh lewat aplikasi berbasis Internet of Things (IoT),

yang berimplikasi pada peningkatan hasil panen, efisiensi kerja, dan penghematan biaya daya (Priyonggo et al., 2025).

Di sisi lain, meminimalkan penyusutan volume air menjadi fokus utama dalam agenda konservasi. Kombinasi antara metode irigasi curah (sprinkler) maupun tetes dengan sistem kendali digital terbukti mampu membagikan air secara merata, sehingga menekan penguapan ekstrim dan limpasan permukaan yang mubazir. Secara spesifik, irigasi tetes bekerja menyasar langsung zona perakaran tanaman, sebuah metode yang efektif mencegah kelembapan udara berlebih serta menekan ekspansi tumbuhan pengganggu (gulma). Upaya penekanan kehilangan air ini juga didukung secara signifikan melalui perbaikan mutu jaringan saluran irigasi. Secara garis besar, kombinasi inovasi sensor, otomatisasi, dan pemeliharaan sarana fisik tidak sekadar menjamin pasokan air tanaman, melainkan juga menjaga kelestarian jangka panjang cadangan air bumi sekaligus menopang ketahanan pangan berkelanjutan di era perubahan iklim dan kelangkaan air global.

Sebagai solusi strategis menuju irigasi berkelanjutan, pemanfaatan energi bersih seperti tenaga surya untuk menggerakkan mesin pompa air kini mulai digalakkan (Al-Ali et al., 2019 dalam Priyonggo et al., 2025). Penggunaan pompa bersumber surya ini mampu memotong ketergantungan pada bahan bakar fosil yang fluktuatif sekaligus menekan emisi gas rumah kaca. Langkah ini tidak hanya memangkas pengeluaran operasional dalam jangka panjang, tetapi juga memperkuat mitigasi dampak perubahan iklim. Pompa tenaga surya ini pun dapat diintegrasikan dengan sensor kelengasan tanah agar beroperasi secara otomatis hanya saat lahan memerlukan air. Di samping energi surya, potensi angin dan biomassa kini mulai diteliti sebagai opsi tambahan. Sinergi berbagai sumber energi terbarukan ini menjadi semakin krusial mengingat menipisnya cadangan energi konvensional dan tingginya tuntutan sektor agraria terhadap solusi yang ramah lingkungan dan efisien.

7.2 Hubungan Tanah, Air, dan Tanaman

Keberhasilan proses fisiologis pada tumbuhan sangat bergantung pada ketersediaan air. Berbagai aktivitas vital tumbuhan seperti fotosintesis, respirasi, transpirasi, hingga distribusi unsur

hara memerlukan suplai air dalam kondisi yang seimbang. Jika keseimbangan tersebut terganggu, baik akibat defisit maupun surplus air, maka proses pertumbuhan tanaman akan terhambat secara signifikan.

7.2.1 Tanah

Sebagai media tumbuh utama, tanah yang ideal bagi tanaman harus memiliki beberapa karakteristik khusus, seperti tekstur yang remah sehingga mudah diolah, serta kaya akan kandungan unsur hara penting, contohnya tanah humus. Selain itu, tanah yang baik wajib memfasilitasi sirkulasi udara (aerasi) dan air secara optimal, menjaga tingkat kelengasan yang stabil, serta memiliki pori-pori tanah yang fungsional untuk mengabsorpsi air sekaligus nutrisi demi mendukung kesuburan vegetasi.

Keberadaan udara di dalam tanah juga krusial karena memengaruhi kecepatan metabolisme, fotosintesis, respirasi, dan transpirasi tanaman. Di samping itu, aspek udara ini turut memengaruhi regulasi fisiologis penting lainnya, termasuk mekanisme pembukaan stomata serta laju penyerapan air dan nutrisi (Sudirman et al., 2021).

7.2.2 Air

Air yang tertahan di dalam zona aerasi dikenal sebagai lengas tanah. Ketika zona aerasi ini telah melewati ambang batas kapasitas tampungnya, air akan bergerak turun ke zona saturasi di lapisan bawah yang kemudian membentuk air tanah. Karakteristik lengas tanah sendiri diklasifikasikan ke dalam bentuk air gravitasi, air kapiler, dan air higroskopis. Dalam penerapannya, penentuan volume pengairan yang paling ideal bagi komoditas harus mempertimbangkan kombinasi dari berbagai faktor lapangan. Kesuburan fisik suatu lahan secara umum diukur dari struktur tanahnya. Selain itu, tingkat kebutuhan hidrasi setiap tanaman berbeda-beda, tergantung pada karakteristik dan respons spesifik dari masing-masing varietas terhadap ketersediaan air (Sudirman et al., 2021).

7.2.3 Tanaman

Mayoritas struktur tubuh tumbuhan tersusun atas air, di mana kadar air pada sel-selnya sangat fluktuatif, dipengaruhi oleh faktor usia, jenis sel, spesies, serta tipe jaringan tanaman tersebut. Di dalam tingkat sel, air eksis dalam wujud bebas maupun terikat, terutama tersimpan di dalam vakuola sebagai larutan encer. Saat tumbuhan mengalami dehidrasi, molekul air bebas akan menyusut terlebih dahulu sebelum berdampak pada molekul glukosa atau koloid plasma.

Proses absorbsi air dari dalam tanah difasilitasi oleh bulu-bulu akar, di mana air masuk menembus dinding sel menuju ruang bebas melewati membran plasma. Sistem perakaran baru dapat menyerap air apabila mempunyai nilai potensial air negatif yang lebih tinggi dibandingkan dengan potensial larutan tanah melalui mekanisme penyerapan pasif, yang merupakan perpaduan antara proses difusi, osmosis, serta arus massa. Walaupun mayoritas asupan air diserap oleh tanaman melalui akar, terdapat beberapa jenis tumbuhan tertentu yang mampu mengabsorpsi air melewati organ daun maupun batang (Sudirman et al., 2021)

7.3 Klasifikasi Sistim Irigasi

7.3.1 Irigasi permukaan (*surface irrigation*)

Irigasi permukaan merupakan teknik pendistribusian air ke area pertanian dengan memanfaatkan gaya gravitasi untuk mengalirkan air di atas permukaan tanah (Priyonggo et al., 2025). Secara prinsip, metode ini menyalurkan air ke seluruh area budidaya melalui struktur jaringan kanal yang sistematis, mulai dari saluran primer, sekunder, tersier, hingga kuarter, sebelum akhirnya mencapai petak lahan tujuan. Berdasarkan teknis aplikasinya di lapangan, irigasi permukaan dikelompokkan ke dalam beberapa jenis, yaitu:

1. Irigasi genangan (*flooding irrigation*). Metode ini dilakukan dengan mengalirkan air secara merata hingga menggenangi seluruh permukaan lahan. Pendekatan ini sangat populer pada sistem budidaya padi sawah di kawasan Asia Tenggara, termasuk di Indonesia. Nilai tambahnya terletak pada kesederhanaan teknologi yang digunakan serta efektivitasnya

dalam menghambat perkembangbiakan tumbuhan pengganggu (gulma).

2. Irigasi alur (*furrow irrigation*). Teknik ini menerapkan pengaliran air melewati parit-parit kecil yang dibuat di sela-sela barisan tanaman. Umumnya, sistem ini diaplikasikan pada komoditas yang ditanam berbanjar, seperti jagung, tebu, kapas, dan tanaman sayur. Walaupun dinilai lebih efisien dalam penggunaan air ketimbang irigasi genangan, kelemahan utamanya adalah risiko ketidakmerataan sebaran air, khususnya jika diterapkan pada karakter tanah yang bertekstur kasar atau berpasir (Walker & Skogerboe, 1987 dalam Priyonggo et al., 2025).
3. Irigasi border strip (petakan memanjang). Sistem ini beroperasi dengan membagi lahan menjadi beberapa sekat petakan memanjang (*border*) yang dipisahkan oleh pematang atau tanggul berukuran rendah. Metode ini sangat ideal untuk topografi lahan yang cenderung rata maupun yang memiliki kemiringan landai. Tingkat efisiensi airnya tercatat lebih unggul daripada metode genangan total, akan tetapi dalam operasionalnya tetap menuntut ketelitian manajemen yang tinggi (Michael, 2008 dalam Priyonggo et al., 2025).
4. Irigasi basin (cekungan. Pengairan ini dilakukan dengan menyalurkan air ke dalam kolam atau cekungan kecil yang sengaja dibuat mengelilingi batang tanaman. Implementasinya sering dijumpai pada budidaya tanaman tahunan atau perkebunan buah, seperti pohon mangga dan jeruk. Keunggulannya adalah kemampuan mengontrol lokalisasi air tepat di area perakaran, namun memiliki sisi kelemahan berupa tingginya kebutuhan alokasi tenaga kerja untuk mengonstruksi cekungan-cekungan tersebut (Brouwer et al., 1989 dalam Priyonggo et al., 2025)

7.3.2 Irigasi bawah permukaan (*subsurface irrigation*)

Irigasi bawah permukaan merupakan teknik penyediaan air yang dilakukan dengan mengalirkan air secara langsung ke area perakaran tanaman lewat instalasi pipa bawah tanah, saluran khusus, atau lapisan tanah yang berpori. Berdasarkan pandangan

Michael (2008) dalam Priyonggo et al., (2025), fokus utama dari metode ini adalah mempertahankan tingkat kelengasan tanah di sekitar akar tanpa harus membasahi area permukaan lahan secara menyeluruh. Mekanisme operasional dari sistem ini bertumpu pada penyaluran air ke dalam jaringan pipa di bawah tanah, yang kemudian merembes keluar memanfaatkan pori-pori tanah menuju zona akar. Melalui pola distribusi seperti ini, penyusutan volume air yang dipicu oleh penguapan (evaporasi) di permukaan lahan dapat diminimalisasi seminimal mungkin. Keunggulan dari penerapan irigasi bawah permukaan meliputi: 1) pasokan air yang disalurkan langsung ke pusat akar efektif mereduksi risiko kehilangan air akibat penguapan serta perkolasi dalam; 2) kondisi permukaan tanah yang cenderung kering membuat pertumbuhan gulma menjadi sangat terbatas; 3) kelembapan yang stabil di area akar sangat memicu pertumbuhan vegetasi bernilai ekonomi tinggi, seperti kelompok tanaman sayur, buah-buahan, dan komoditas perkebunan; dan 4) metode ini tidak menimbulkan aliran permukaan (run-off) yang deras yang berpotensi merusak struktur tanah.

Di sisi lain, sistem irigasi bawah permukaan juga memiliki sejumlah batasan, antara lain: 1) proses instalasi memerlukan investasi yang besar karena membutuhkan jaringan pipa bawah tanah atau struktur drainase yang rumit; 2) terdapat risiko penyumbatan pada saluran pipa yang dipicu oleh akumulasi endapan partikel atau intrusi akar tanaman.; 3) karena pergerakan air terjadi di dalam tanah dan tidak terlihat di permukaan, evaluasi distribusinya menjadi sulit dilakukan jika tidak dibantu oleh instrumen sensor kelembapan tanah; dan 4) teknik ini kurang efektif jika diaplikasikan pada tipe tanah yang didominasi pasir karena memiliki laju infiltrasi yang terlalu cepat.

7.3.3 Irigasi sprinkler (*sprinkler irrigation*)

Irigasi sprinkler didefinisikan sebagai teknik pengairan lahan melalui penyemprotan air dengan tekanan khusus, sehingga membentuk rintik air yang jatuh ke permukaan tanah layaknya hujan buatan. Mekanisme penyalurannya mengandalkan jaringan pipa bertekanan sebelum air dihembuskan keluar melalui komponen nozzle atau head sprinkler (Priyonggo et al., 2025). Konsep

operasional dari metode ini bertumpu pada konversi energi tekanan air menjadi energi kinetik, yang memungkinkan air tersebar secara proporsional ke seluruh area budidaya pertanian. Efektivitas sebaran air tersebut sangat ditentukan oleh beberapa parameter pendukung, meliputi performa tekanan pompa, tipe nozzle yang digunakan, jarak penempatan antar-sprinkler, dinamika arah angin, hingga dimensi butiran air yang dihasilkan (Howell, 2003 dalam Priyonggo et al., 2025).



Gambar 7.1. Irigasi Sprinkler (sumber: https://lppm.itk.ac.id/detail-berita/pembuatan-sprinkler-penyiram-tanaman-dan-pupuk-cair

Penerapan sistem irigasi sprinkler menawarkan sejumlah keuntungan operasional, antara lain: 1) di bawah tekanan yang stabil, air dapat diaplikasikan secara seragam ke seluruh area lahan, bahkan pada wilayah dengan topografi bergelombang atau tidak rata; 2) dibandingkan dengan sistem irigasi permukaan, metode ini mampu meminimalkan kehilangan air akibat perkolasi dalam yang berlebih, meskipun deviasi akibat penguapan dan embusan angin tetap ada; 3) sangat adaptif untuk diimplementasikan pada beragam vegetasi, seperti padi, jagung, gandum, komoditas hortikultura, area perkebunan, hingga hamparan rumput seperti lapangan golf ; 4) karena air jatuh dalam wujud rintik kecil menyerupai hujan alami, risiko pengikisan unsur hara atau erosi tanah permukaan menjadi lebih rendah daripada model irigasi genangan atau alur; dan 5) memungkinkan integrasi pencampuran pupuk cair atau pestisida secara langsung ke dalam aliran air, sehingga proses distribusinya menjadi lebih efektif dan tepat sasaran (Lamm et al., 2007).

Kendati demikian, sistem ini juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu dipertimbangkan, meliputi: 1) biaya investasi untuk

pengadaan komponen mekanis seperti pompa, pipa, dan unit sprinkler tergolong mahal jika dibandingkan dengan sistem pengairan tradisional; 2) faktor kecepatan angin dapat mengacaukan arah jatuhnya air, sementara temperatur udara yang tinggi berpotensi meningkatkan laju penguapan air di udara; 3) pengoperasian mesin pompa secara konstan memerlukan pasokan daya listrik atau bahan bakar yang intensif; 4) kualitas air yang rendah atau membawa sedimen berisiko menyumbat lubang nozzle, sehingga membutuhkan pembersihan rutin; dan 5) kurang ideal diterapkan pada jenis tanah lempung berat (*heavy clay*) dengan daya serap lambat, karena curahan air dengan debit terlalu besar berisiko menciptakan genangan lokal.

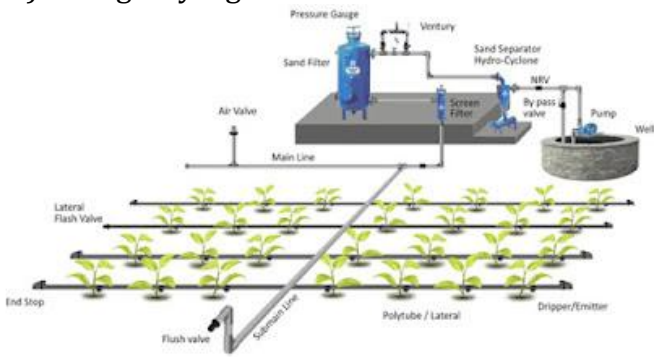
7.3.4 Irigasi Tetes

Irigasi tetes merupakan metode pengairan yang bekerja dengan cara menyalurkan air secara berkala dan perlahan langsung ke area perakaran tanaman menggunakan instalasi pipa, selang, serta komponen emiter (penetes). Merujuk pada Keller & Bliesner (1990), dalam Priyonggo et al., (2025), sistem ini juga kerap disebut sebagai *trickle irrigation* atau *localized irrigation*. Istilah tersebut disematkan karena orientasi pembasihan air hanya dipusatkan secara spesifik di sekitar zona akar tanaman, bukan membasahi seluruh permukaan lahan pertanian.

Implementasi sistem irigasi tetes memberikan sejumlah keuntungan signifikan, meliputi: 1). tingkat efisiensi pemakaian air mampu mencapai kisaran 90–95% karena volume air disalurkan secara presisi dan tepat sasaran; 2) menekan area permukaan tanah di luar lingkar tanaman cenderung tetap kering, sehingga membatasi ruang tumbuh tumbuhan pengganggu; 3) stabilitas kelengasan tanah yang terjaga dengan baik serta peluang integrasi pemupukan langsung lewat sistem fertigation dapat mendongkrak produktivitas tanaman; 4) mampu menekan potensi serangan patogen tanaman, khususnya jenis penyakit yang dipicu oleh tingginya kelembaban pada bagian batang atau daun; dan 5) sangat fleksibel untuk diterapkan pada karakteristik lahan yang menantang, termasuk kawasan dengan tanah kering maupun area berlereng miring.

Kendati demikian, sistem ini memiliki beberapa keterbatasan operasional, antara lain: 1) memerlukan modal awal yang relatif tinggi untuk pengadaan instrumen utama seperti mesin pompa, unit penyaring (filter), dan jaringan pipa distribusinya; 2) lubang emiter memiliki risiko tersumbat yang tinggi akibat akumulasi endapan lumpur, kristal garam, maupun pertumbuhan alga yang terbawa air; 3) memerlukan manajemen pemeliharaan yang ketat, seperti pembersihan filter secara berkala serta monitoring tekanan air; dan 4) kurang efektif jika diaplikasikan pada komoditas yang memiliki sebaran akar sangat luas, kecuali dilakukan modifikasi khusus pada rancangan sistem penyaluran airnya.

Pada era modern, teknologi irigasi tetes terus bertransformasi lewat integrasi sensor kelembapan tanah, sistem otomatisasi berbasis Internet of Things (IoT), hingga pemanfaatan data citra satelit demi mengalkulasi kebutuhan air tanaman secara mutakhir. Di samping itu, implementasi Subsurface Drip Irrigation (SDI), yaitu metode penanaman pipa tetes langsung di bawah permukaan tanah kini menjadi tren baru yang efektif untuk menekan laju penguapan (evaporasi) ke tingkat yang lebih rendah.



Gambar 7.2. Irigasi tetes
(sumber: https://id.wikipedia.org/wiki/Teknik_pertanian dalam Prayogo et al. 2025)

7.3.5 Sistem Irigasi Modern Lainnya

Inovasi teknologi dalam sektor agraria dan manajemen sumber daya air telah memicu transisi ke arah sistem pengairan modern. Tujuan fundamental dari modernisasi ini adalah mengoptimalkan efisiensi pemakaian air, mereduksi potensi kehilangan air, serta

mewujudkan konsep pertanian berkelanjutan di tengah keterbatasan cadangan alam yang ada. Berikut adalah beberapa variasi sistem irigasi modern yang saat ini tengah berkembang:

1. Irigasi otomatis berbasis sensor. Sistem pengairan ini mengintegrasikan soil moisture sensor (sensor kelembapan tanah), sensor iklim, serta infrastruktur *Internet of Things* (IoT) guna meregulasi distribusi air secara real-time. Mekanismenya dimulai dengan merekam parameter aktual di area lahan, yang kemudian dikirimkan langsung ke perangkat komputer atau ponsel pintar milik petani. Saat tingkat kelengasan tanah merosot di bawah batas minimal, mesin pompa akan menyala secara otomatis dan akan berhenti menyuplai air begitu tanah mencapai titik kelembapan ideal. Metode ini terbukti mampu menghemat volume air berkisar antara 30–50% jika disandingkan dengan teknik konvensional, sekaligus mendongkrak produktivitas karena tanaman menerima asupan air yang presisi sesuai kebutuhan biologisnya.
2. Irigasi presisi berbasis satelit dan drone.
   Irigasi presisi (*precision irrigation*) mengandalkan dukungan teknologi satelit, pemindaian citra multispektral, serta wahana drone untuk memantau status air tanah, kondisi vegetasi, dan tingkat hidrasi tanaman. Informasi spasial yang diperoleh kemudian diolah menggunakan perangkat lunak berbasis *Geographic Information System* (GIS) untuk memetakan wilayah petak lahan mana yang membutuhkan suplai air lebih tinggi atau lebih rendah. Melalui strategi site-specific management ini, volume pemberian air dapat dibedakan pada tiap bagian lahan sesuai kebutuhan riilnya. Pendekatan ini tidak hanya menekan pemborosan air, tetapi juga meminimalisasi ketergantungan pada zat kimia seperti pupuk dan pestisida.
3. Irigasi hidroponik dan aeroponik. Kedua metode ini merupakan representasi dari sistem budidaya tanpa media tanah (*soilless cultivation*) yang dikategorikan dalam rumpun irigasi modern. Pada sistem hidroponik, pasokan nutrisi disalurkan lewat cairan bermedium air yang dialirkan

langsung ke area akar tanaman. Sementara pada aeroponik, larutan hara tersebut diembunkan dalam bentuk kabut halus langsung ke bagian akar yang diposisikan menggantung bebas di udara. Sistem ini dinilai sangat hemat air karena hanya mengonsumsi sekitar 10–20% dari total kebutuhan air pada pertanian tradisional, serta sangat potensial diaplikasikan pada keterbatasan lahan seperti konsep pertanian perkotaan (*urban farming*).

4. Irigasi dengan energi terbarukan. Tingginya kebutuhan daya untuk menggerakkan mesin pompa dan mengalirkan air menjadi salah satu tantangan dalam irigasi modern. Sebagai solusinya, kini dikembangkan sistem pengairan berbasis energi bersih, khususnya tenaga surya (*solar-powered irrigation system*). Pemanfaatan panel surya sebagai penggerak utama pompa air efektif memotong ketergantungan terhadap bahan bakar fosil maupun jaringan listrik konvensional. Implementasi teknologi ini terbukti mampu memangkas pengeluaran operasional, memperluas akses pengairan bagi kalangan petani kecil, serta mendukung prinsip pertanian yang ramah lingkungan.
5. Irigasi berbasis *artificial intelligence* (AI) dan big data. Akselerasi teknologi kecerdasan buatan (AI) memberikan peluang tata kelola irigasi lewat pemanfaatan analisis data berskala besar (big data). Sistem ini mengombinasikan berbagai data dari perangkat sensor, satelit, estimasi prakiraan cuaca, hingga rekam jejak pertumbuhan fase tanaman untuk memprediksi volume kebutuhan air secara lebih valid. Melalui kecerdasan buatan, petani bisa mendapatkan rekomendasi mengenai waktu, kapasitas, serta titik koordinat penyiraman secara presisi. Inovasi ini tengah masif diimplementasikan di berbagai negara maju untuk menyokong ekosistem pertanian cerdas (smart farming).

7.4 Kebutuhan Air Untuk Tanaman Padi, Palawija, Tebu, Sayuran, Rumput

Kuantitas kebutuhan air tanaman merupakan parameter krusial dalam mengalkulasi dan mendesain dimensi bangunan serta jaringan

saluran irigasi pada suatu lahan pertanian. Secara prinsip, kebutuhan air irigasi didefinisikan sebagai total volume air yang diperlukan untuk menyuplai kebutuhan penguapan, mengompensasi kehilangan air, dan memenuhi hidrasi tanaman dengan turut mengalkulasi kontribusi air alami dari curah hujan serta sumbangsih air tanah (Sosrodarsono & Takeda, 2003 dalam Sudirman et al., 2021).

7.4.1 Kebutuhan Air Tanaman (*Crop Water Requirement*)

Kebutuhan air tanaman (*Crop Water Requirement*/CWR) merujuk pada ketebalan atau kedalaman total air yang hilang melalui proses evapotranspirasi pada vegetasi yang sehat, bebas penyakit, serta tumbuh pada hamparan lahan luas dengan kecukupan lengas, kesuburan tanah, dan kondisi lingkungan yang optimal (FAO, 1984; Soemarno, 2011). Intervensi pengairan, baik secara alami maupun buatan, diarahkan untuk menjaga kelengasan tanah pada tingkat ideal demi menyokong fase pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Ketepatan sistem pemberian air ini secara langsung berimplikasi pada volume maupun kualitas hasil panen akhir. Dalam skala agrikultur, perhitungan volume air irigasi wajib mengalkulasi variabel penguapan lingkungan, kebocoran saluran, serta pasokan air tanah dan curah hujan efektif (Hadihardjaja dkk., 1997 dalam Sudirman et al., 2021).

7.4.2 Kebutuhan Air Irigasi

Fungsi utama irigasi adalah mengalirkan air secara berkala dan sistematis ke lahan yang diolah, terutama saat ketersediaan air tanah berada di bawah ambang batas kebutuhan biologis tanaman. Sepanjang siklus hidupnya, komoditas pertanian memerlukan pasokan air yang konstan dari fase penyiapan lahan hingga periode pascapanen (Wahyuni, Kendarto & Bafdal, 2019 dalam Sudirman et al., 2021). Aktivitas irigasi mencakup lini penyediaan, tata pengaturan, hingga pembuangan (*drainase*) air irigasi, yang areanya diklasifikasikan ke dalam sistem irigasi permukaan, rawa, air bawah tanah, pompa, serta tambak.

7.4.3 Faktor yang Memengaruhi Kebutuhan Air Tanaman

Alokasi volume air irigasi pada suatu kawasan budidaya sangat bergantung pada interaksi beberapa variabel berikut:

1. Topografi. Lahan dengan kemiringan curam menuntut volume air yang lebih besar daripada lahan datar. Hal ini terjadi karena air bergerak lebih cepat menjadi limpasan permukaan (*run-off*), sehingga memicu tingginya kehilangan air dan memperkecil volume air yang terinfiltrasi ke dalam tanah.
2. Hidrologi. Kuantitas curah hujan berbanding terbalik dengan kebutuhan air irigasi; semakin tinggi intensitas hujan efektif pada suatu wilayah, maka ketergantungan terhadap suplai air irigasi buatan akan semakin rendah.
3. Klimatologi. Kondisi cuaca memengaruhi ketahanan tanaman. Analisis meteorologi yang cermat membantu petani menentukan kalender tanam yang presisi sesuai karakter tanah.
4. Karakteristik komoditas dan tanah. Menurut Yudhiafriansyah (2015) dalam Sudirman et al., (2021), jenis tanaman menentukan volume air yang diserap (misalnya, tanaman padi memerlukan air yang jauh lebih banyak daripada tanaman palawija). Selain itu, tekstur tanah menentukan besarnya tingkat kehilangan air di lapangan.

7.4.4 Parameter Analisis Kehilangan dan Kebutuhan Air

Berdasarkan panduan Dirjen SDA (2013) dalam Sudirman et al., (2021), perhitungan kebutuhan air total harus mengintegrasikan komponen-komponen kehilangan dan kebutuhan teknis berikut:

1. Evapotranspirasi. Ditinjau dari dua kondisi, yakni evapotranspirasi potensial (*potential evapotranspiration*) yang merepresentasikan penguapan optimal saat ketersediaan air melimpah, dan evapotranspirasi sesungguhnya (*actual evapotranspiration*) yang menggambarkan kondisi penguapan riil di lapangan dengan pasokan air seadanya.

2. Curah hujan efektif. Volume hujan yang jatuh selama musim tanam dan dapat diserap langsung oleh vegetasi untuk mendukung pertumbuhannya. Parameter curah hujan efektif ini dihitung sebesar 70% dari rata-rata curah hujan tengah bulanan dengan tingkat risiko kegagalan 20% berbasis Basic Year (Maftuah & Hayati, 2019 dalam Sudirman et al., 2021).
3. Pola tanam. Pengaturan tata letak, sekuens jenis tanaman, dan masa bera lahan bertujuan mengoptimalkan sumber daya serta menekan risiko gagal panen. Polanya dibagi menjadi monokultur (penanaman satu jenis komoditas sejenis, seperti padi atau jagung saja untuk memacu produksi) dan polikultur (penanaman beragam jenis komoditas terencana yang lebih ramah ekosistem).
4. Koefisien tanaman. Nilai indeks karakteristik vegetasi yang menghubungkan nilai evapotranspirasi acuan dengan evapotranspirasi spesifik jenis tanaman tersebut.
5. Perkolasi dan rembesan. Kecepatan perkolasi dipengaruhi oleh karakteristik mekanis tanah. Pada tanah lempung pasca-penggenangan, laju perkolasi normal berkisar antara 1–3 mm/hari. Namun, pada topografi dengan tingkat kemiringan di atas 5%, akumulasi kehilangan air akibat perkolasi dan rembesan antar-petak sawah dapat meningkat hingga minimal 5 mm/hari.
6. Penyiapan lahan. Proses penataan lingkungan tanah agar siap mendukung pertumbuhan benih. Durasi penyiapan lahan idealnya adalah 1,5 bulan untuk petak tersier, atau dipersingkat menjadi 1 bulan jika memanfaatkan mekanisasi pertanian. Kebutuhan air untuk pelumpuran (puddling) tanah bertekstur berat yang tidak ditanami lebih dari 2,5 bulan adalah sebesar 200 mm (mencakup penjenuhan dan penggenangan), ditambah 50 mm saat awal transplatasi. Jika diakumulasikan dengan kebutuhan air persemaian, totalnya mencapai 250 mm.
7. Efisiensi irigasi. Rasio antara volume air yang dimanfaatkan tanaman di zona perakaran setelah dikurangi faktor kehilangan air, terhadap total volume air yang dialirkan dari sumbernya.

8. Sistem rotasi/golongan. Ketika ketersediaan air di bendung terbatas sedangkan areal tanam sangat luas, pemberian air diaplikasikan secara bergilir (rotasi) atau sistem golongan guna menekan titik puncak kebutuhan air irigasi. Waktu rotasi yang disarankan berkisar 2–3 hari dan dibatasi maksimal satu minggu agar tidak mengganggu fisiologi tanaman. Secara ideal, satu Daerah Irigasi (DI) dipisahkan menjadi 3–5 golongan dengan selisih waktu awal tanam antara 2 hingga 3 minggu.

7.4.5 Analisis Kebutuhan Air

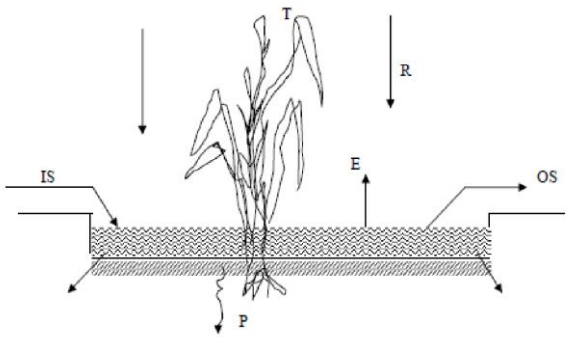
Kalkulasi volume air irigasi di sektor pertanian diproses melalui tiga tahapan komparatif, meliputi kebutuhan air konsumtif (*Crop Water Requirement*/CWR), kebutuhan air di tingkat petak lahan (*Farm Water Requirement*/FWR), dan kebutuhan air untuk skala kawasan secara makro (*Project Water Requirement*/PWR). Merujuk pada Akhmad Faishal (2015) dalam Sudirman et al,m (2021), dinamika kebutuhan air ini dipengaruhi oleh aktivitas penyiapan lahan, volume konsumsi vegetasi, laju perkolasi, serta kebocoran selama proses distribusi. Untuk melakukan pemodelan analisis tersebut, perangkat lunak Cropwat 8.0 dapat diaplikasikan. Akurasi pemodelan ini mensyaratkan ketersediaan data hidrologi yang meliputi debit andalan rata-rata probabilitas 80%, debit minimum-maksimum, serta batas kebutuhan air tertinggi.

7.4.6 Tanaman Padi

Kebutuhan air pada ekosistem sawah padi sangat ditentukan oleh parameter penyiapan lahan, konsumsi evaporasi-transpirasi, tingkat perkolasi dan rembesan, pergantian lapisan air, serta kontribusi curah hujan efektif. Karakteristik budidaya padi sawah menuntut kondisi tanah yang konstan dalam keadaan jenuh melalui penggenangan. Formula keseimbangan air di petak sawah dirumuskan sebagai berikut (Van De Goor, 1968 dalam Sudirman et la., 2021):

Is+ Re + Ig = S + ET + P +).S.
Is = air irigasi yang dimasukkan ke petakan sawah

Re = curah hujan efektif
Ig = air rembesan dari petak lain
S = air yang tersedia dalam tanah atau di permukaan tanah yaitu air untuk penjenuhan tanah dan penggenangan
ET = evapotranspirasi
P = perkolasi baiki perkolasi vertikal ke bawah maupun perkolasi ke samping
OS = air yang keluar dari petakan sawah



Gambar 7.3. Bagan keseimbangan air pada petak sawah

Fase pertumbuhan padi dipengaruhi oleh varietas, umur tanaman, struktur dan tekstur tanah, iklim, serta metode pengairan yang diterapkan. Rentang kebutuhan air padi di beberapa wilayah dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 7.1. Hasil percobaan kebutuhan air tanaman padi di daerah

Daerah	Masa	Kebutuhan Air
Filipina	evapotransprasi pertumbuhan	4,3 mm/hari (awal)
	berbunga	7,5 mm/hari
	periode Pemasakan	5,7 mm;hari
Desa Kalirandu Sub Prosida Pemali Comal	evapotranspirasi perkolasi	6,14 mm/hari 0,65 mm/hari
Daerah Sub Prosida Ciujung	evapotranspirasi periode pertumbuhan	4,14 mm/hari

Daerah	Masa	Kebutuhan Air
	Vegeratiatif	6,41 mm/hari
	Reproduktif/pemasakan	4,89 mm/hari
	Laju perkolasir ata-rata	0,5 mm/hari

Sumber : Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air dan Konstruksi dalam Sudirman et al., 2021

7.4.7 Tanaman Palawija

Sistem pengairan untuk komoditas palawija diaplikasikan secara intermiten (berkala), yaitu dengan membasahi tanah selama beberapa jam, dihentikan, lalu diairi kembali beberapa hari kemudian. Metode lain yang umum digunakan adalah irigasi alur (*furrow irrigation*) melalui sela-sela guludan tanaman. Budidaya palawija sangat memerlukan jaringan drainase yang baik untuk membuang kelebihan air saat intensitas hujan tinggi, karena genangan yang terlalu lama dapat memicu pembusukan akar tanaman.

Tabel 7.2. Kebutuhan air beberapa tanaman palawija

Jenis Tanaman	Masa	Kebutuhan Air
Jagung	pengolahan tanah	60-20 mm
	pertumbuhan tanaman	170-220 mm
	kebtuhan air rata-rata	1,14-1,35 mm/hari
	kebutuhan air pada musim semi	2,2-2,6 mm/hari maksimum (6,0 mm/hari)
	kebutuhan air pada musin gugur	1,3-2,9 mm/hari maksimum (4,5 mm/hari)
Kacang tanah	pertumbuhan musim semi	240-400 mm
	pertumbuhan musim gugur	160-200 mm
	kebutuhan air harian musim semi	2,6-3,1 mm, maksimum 5,6 mm
	kebutuha air musim gugur	1,3-1,5 mm, maksimum 2,9 mm
	pemberian irgiasi musim semi 5-7 kali musim gugur 2-4 kali	
Kentang	pertumbuhan tanaman	170-220 mm

Jenis Tanaman	Masa	Kebutuhan Air
	kebutuhan air rata-rata	1,14-1,35 mm
	pemberian air irigasi rata-rata setiap kali 40-60 mm	
Kedelei	pertumbuhan musim semi	320 mm
	pertumbuhan musim panas	320 mm
	pertumbuhan musim gugur	150 mm
	kebutuhan air harian musim semi	2,4-3,4 mm, maka maksimum 4,7 mm
	kebuthan airharian musimpanas	2,4-3,2 mm, maka maksimum 4,5 mm
	kebuthan air harian musim gugur	1,8 mm, maksimal 3,3 mm

Sumber : Sudirman et al., 2021

Rasio perbandingan pemberian air antartanaman ini dijadikan sebagai dasar regulasi dalam menentukan perencanaan pola tanam dan pembagian luas areal lahan, terutama saat musim kemarau atau untuk sistem giliran komoditas tebu.

Tabel 7.3. Perbandingan pemberian air tersebut di dasarkan tiga jenis tanaman padi sawah, tebu dan palawija di beberapa daerah

Pemberian Air	Perbandingan padu, tebu, palawija
Daerah medium	3: 1 ½:1
Daerah Besuki	2:1:1
Daerah Banyuwangi	3:1:1
Daerah Pekalongan	4:1 ½:1

Sumber : Sudirman et al., 2021

7.4.8 Tanaman Tebu

Tanaman tebu (*Saccharum officinarum L.)* merupakan komoditas utama industri gula yang adaptif di wilayah tropis dan subtropis, dengan kendala agronomi berupa fluktuasi air (kekeringan atau sistem drainase yang buruk). Tanaman ini memerlukan indeks curah hujan yang tinggi untuk mencapai produktivitas optimal (Tim Pengembangan Materi LPP, 2015 dalam Priyonugroho, 2016).

Tebu memiliki tingkat penyerapan hara yang tinggi dan membutuhkan masa kecukupan air selama 9 bulan sebelum memasuki fase kemasakan. Kebutuhan air pada awal fase pertumbuhan tercatat lebih rendah dibandingkan pada fase pemanjangan batang. Berdasarkan laporan FAO, efisiensi pemakaian air pada kondisi kapasitas air tanah 80% mampu memproduksi sekitar 5–8 kg tebu/m^3 air serta 0,6–1 kg sukrosa/m^3 air.

7.4.9 Tanaman Sayuran

Aplikasi air irigasi harus disesuaikan secara presisi berdasarkan volume dan periodisasi kebutuhan tanaman (Salokhe, Babel, & Tantau, 2005). Deviasi pengairan berisiko memicu kematian tanaman, sedangkan surplus air berakibat pada pembusukan akar (Yanto, Tusi, & Triyono, 2014). Penelitian Fauziah, Susila, & Sulistyono (2016) menunjukkan bahwa implementasi teknik irigasi hemat air memberikan hasil produksi yang lebih baik daripada model konvensional.

Pendekatan irigasi hemat air untuk hortikultura sayur umumnya diterapkan melalui sistem irigasi alur, tetes, maupun pancar. Dinamika konsumsi air tanaman cenderung melonjak tajam pada fase vegetatif akibat aktivitas pembelahan sel yang intensif untuk pembentukan organ akar, batang, dan daun.

Tabel 7.4. Kebutuhan Air Tanaman beberapa sayuran

Jenis Tanaman	Waktu	Kebutuhan Air
Tomat	masa pertumbuhan	400-600 mm
Kentang	masa pertumbuhan	500-700 mm
Cabai	fase vegetattif	200 mm/hari/tanamanri/tanaman
	fase generatif	400 ml
	kebutuhan air tertinggi berada pada saat tanaman cabau rawit berumur 75 hari setelah tanam	

Sumber : Sudirman et al., 2021

7.4.10 Tanaman Rumput

Korelasi makro-klimatologi terhadap hidrasi tanaman direpresentasikan melalui nilai evapotranspirasi tanaman referensi, yang didefinisikan sebagai laju penguapan dari hamparan rumput hijau setinggi 8–15 cm yang tumbuh seragam, aktif, menutup tanah secara penuh, dan dalam kondisi kecukupan air. Deviasi tinggi pertumbuhan rumput dalam kajian lapangan sering disebabkan oleh rendahnya curah hujan lokasial (misalnya hanya menyentuh angka 35,5 mm yang dikategorikan sebagai bulan kering karena berada di bawah ambang batas 100 mm).

Pada kondisi ekstrem tersebut, intensitas penyiraman dua kali sehari dinilai belum mampu mencukupi kebutuhan pertumbuhan. Padahal, ketersediaan air tanah yang ideal sangat dibutuhkan untuk memfasilitasi proses transportasi unsur hara dari media tanam menuju jaringan tubuh tanaman demi mencapai pertumbuhan yang optimal.

7.5 Manajemen Air Dan Efisiensi

7.5.1 Manajemen Air

Manajemen air sangat dipengaruhi juga oleh kegiatan pengolahan tanah di areal persawahan. Umumnya, pengolahan tanah persawahan tidak dapat dilakukan secara serentak di seluruh lahan sawah dalam petak tersier. Karena itu diperlukan upaya rotasi atau pergiliran alami, demikian pula penyiapan lahan pada seluruh lahan petak tersier akan dilakukan secara bergiliran (Mahyuddin et al., 2024)

Perhitungan volume air irigasi untuk setiap jenis komoditas sangat bergantung pada tata kelola pemberian atau pemakaian air, varietas tanaman yang dibudidayakan, serta jenis instrumen pengolahan lahan yang diaplikasikan. Secara umum, kebutuhan air irigasi merupakan akumulasi volume air untuk memenuhi proses evaporasi dan mengompensasi kehilangan air, dengan tetap memperhitungkan pasokan alami dari curah hujan serta sumbangsih air tanah.Berdasarkan teori Hansen et al. (1992) dalam Sudirman et al., (2021), terdapat lima metode dalam sistem pengaliran air irigasi, yaitu:

1. Penggenangan (*flooding*);

2. Pemanfaatan alur berskala besar maupun kecil;Pengairan bawah permukaan tanah melalui sistem sub-irigasi;
3. Penyiraman (*sprinkling*); dan
4. Sistem cucuran atau tetes (*trickle*).

Ditinjau dari berbagai literatur, mekanisme pengairan di negara-negara maju umumnya telah mengadopsi sistem yang terintegrasi, seperti surface system, sprinkler system, trickle system, pump system, dan pipeline system. Sebaliknya, aktivitas pertanian di Indonesia sebagian besar masih mengandalkan warisan metode konvensional secara turun-temurun. Dalam menetapkan standarisasi satuan pemakaian air demi mendukung fase pertumbuhan tanaman, Bardan (2014, dalam Sudirman et al., 2021) mengemukakan beberapa parameter acuan, antara lain: a) kuantitas air setara dengan tinggi fluktuasi muka air yang dibutuhkan dikalikan total luas lahan; b) volume kebutuhan air selama siklus pertumbuhan tanaman direpresentasikan dalam satuan m^3/hektar; c) keperluan air dikalkulasikan berdasarkan waktu tertentu per satuan luas wilayah (liter/detik/hektar); dan e) penentuan kapasitas area irigasi yang dapat ditanami dinyatakan lewat indikator volume dan durasi waktu (duty of water). Formula terakhir ini umum diimplementasikan di Amerika, India, dan Mesir, namun tergolong kurang familier di Indonesia.

Di dalam manajemen pengairan, pemilihan metode yang paling efisien menjadi prioritas utama guna menghemat konsumsi air sekaligus memastikan tujuan utama pembangunan irigasi dapat tercapai.

7.5.2 Metode Distribusi Air Irigasi

Pemerintah umumnya menerapkan 3 (tiga) skema dalam merencanakan regulasi pembagian air irigasi, yaitu sistem serentak, sistem golongan, dan sistem rotasi. Pemilihan ketiga strategi ini disesuaikan dengan volume ketersediaan air di bendung:

1. Sistem serentak (bersamaan). Skema ini diaplikasikan apabila pasokan air yang tersedia melimpah untuk mencukupi seluruh kebutuhan lahan. Air didistribusikan secara kolektif dan merata ke seluruh petak sawah dalam

periode waktu yang sama, di mana kuantitasnya disesuaikan dengan fase pertumbuhan vegetasi.

2. Sistem golongan. Penerapan sistem golongan efektif dalam mereduksi titik puncak kebutuhan air irigasi, khususnya saat memasuki musim kemarau ketika ketersediaan air mulai kritis. Melalui metode ini, pasokan air dialokasikan secara selektif kepada wilayah tanam yang telah diprioritaskan dalam perencanaan. Secara ideal, suatu Daerah Irigasi (DI) dipisahkan menjadi tiga hingga lima kelompok golongan dengan selisih waktu awal tanam sekitar dua sampai tiga minggu.
3. Sistem rotasi (bergilir). Metode ini menjadi solusi taktis ketika permintaan air irigasi melonjak tinggi sementara ketersediaan air di sumbernya sangat terbatas. Pengairan diberikan secara bergantian atau berbasis jadwal giliran. Periodisasi giliran yang dianjurkan berkisar antara 2–3 hari dan dibatasi maksimal satu minggu agar tidak mengganggu proses fisiologis serta pertumbuhan tanaman.

7.5.3 Pola Tanam

Pola tanam merupakan suatu sistem pengaturan atau sekuens urutan varietas tanaman yang dibudidayakan pada sebidang area lahan dalam periode waktu spesifik, yang umumnya berbasis siklus satu tahun. Merujuk pada panduan Sosrodimoelyo (1983), dalam Sudirman et al., (2021), terdapat tiga pilar utama yang saling mengikat dalam konseptualisasi pola tanam, yaitu karakteristik komoditas tanaman, ruang lingkup lahan, dan batasan durasi waktu tertentu. Aplikasi pola tanam pada suatu wilayah jaringan irigasi sangat ditentukan oleh interaksi dinamis antara lingkungan fisik, kondisi sosial-ekonomi, serta aspek budaya setempat.

Faktor lingkungan fisik mencakup ketersediaan sistem pengairan, intensitas dan higienitas curah hujan, karakteristik serta tingkat kesuburan tanah, hingga parameter iklim makro seperti elevasi topografi dan fluktuasi suhu udara. Di sisi lain, variabel sosial, ekonomi, dan budaya melibatkan elemen kepercayaan masyarakat, nilai-nilai serta orientasi kelompok, hingga kalkulasi finansial terkait

fluktuasi harga input produksi, harga jual output panen, dan iklim pasar secara makro.

Guna merancang strategi pola tanam yang mampu menghasilkan profitabilitas tinggi, terdapat beberapa parameter krusial yang wajib dipertimbangkan: 1) seleksi komoditas dan urutan tanam dimana pemilihan varietas vegetasi dan penentuan urutan rotasi tanam harus dianalisis secara cermat dengan mengalkulasi kondisi iklim aktual, sifat biologis bawaan tanaman, serta daya serap pasar. 2) minimasi fase tumpang tindih (overlap), periode tumpang tindih antara dua jenis tanaman harus dipersingkat guna menekan potensi kompetisi intraspesifik (persaingan antar-tanaman sejenis) maupun interspesifik (persaingan antar-tanaman berbeda jenis) dalam memperebutkan unsur hara dan ruang. 3) adaptasi teknik agromedi dimana setiap komoditas memerlukan penyesuaian regulasi budidaya secara spesifik, sebab manajemen pemeliharaan tanaman cenderung mengalami pergeseran struktural tergantung pada posisi urutan komoditas tersebut dalam kalender pola tanam.

Dalam konteks manajemen irigasi, perancangan pola tanam yang ideal di area persawahan menjadi instrumen penentu yang sangat vital guna menjamin ketepatan pemenuhan kebutuhan air bagi seluruh tanaman. Tabel 7.1 adalah contoh pola tanam yang dapat di aplikasikan pada setiap daerah layanann irigasi.

Tabel 7.5. Pola Tanam Sawah dalam Satu Tahun

Ketersediaan Air	Pola Tanam
Air yang tersedia cukup banyak	Padi – Padi - Palawija
Air yang tersedia dalam jumlah cukup	Padi – Padi – Bera Padi – Palwaiaja - Palawija
Daerah yang kecenderungannya kekurangan air	Padi – Palawija- Bera Palawija – Padi - Bera

Sumber : Sudirman et al., 2021

7.5.4 Sistem Golongan dan Rotasi

Pembagian air secara merata ke setiap petak tersier dalam jaringan irigasi sangat krusial bagi pertumbuhan dan produktivitas optimal tanaman sawah. Untuk itu, manajemen pengairan dapat

menerapkan sistem rotasi dan golongan guna menekan lonjakan debit puncak kebutuhan air irigasi.

Kondisi sumber daya air yang fluktuatif sering kali tidak mampu menyuplai kebutuhan irigasi secara konstan. Oleh sebab itu, diperlukan perencanaan distribusi yang matang agar alokasi air dapat terbagi secara merata dan berkeadilan. Kebutuhan air tertinggi pada satu petak tersier diindikasikan sebagai debit puncak (Q maks), yang formulasinya ditetapkan sejak tahap perencanaan sistem serta jaringan irigasi. Debit riil yang tersedia di lapangan bersifat dinamis karena sangat dipengaruhi oleh kondisi sumber air dan total luas lahan budidaya. Ketika debit air tidak mampu mencukupi kebutuhan pengairan secara kontinu dan serentak, maka strategi pemberian air dialihkan menggunakan metode bergilir atau rotasi. Pada fase kritis seperti musim kemarau, penyaluran air akan diprioritaskan bagi komoditas tanaman yang telah masuk dalam target perencanaan utama.

Dalam skema pengairan bergilir, kawasan persawahan dikelompokkan ke dalam beberapa golongan dengan jadwal awal masa tanam yang dibuat tidak bersamaan demi mengoptimalkan efisiensi penggunaan air (Kementerian PU Ditjen SDA, 2013 dalam Sudirman et al., 2021).

Ketika wilayah irigasi mengalami defisit air, pengelola dapat mengadopsi teknik rotasi pada level petak sub-tersier yang diatur berdasarkan kondisi topografi dan medan di lapangan, meliputi: 1) rotasi modus 1dengan menutup aliran air pada 1 (satu) pintu petak sub-tersier, sementara petak sub-tersier lainnya tetap menerima pasokan air secara norma; 2) rotasi modus 2vdengan menutup aliran pada 2 (dua) atau lebih pintu petak sub-tersier secara kolektif, sedangkan petak sub-tersier sisanya tetap mendapatkan suplai air.

DAFTAR PUSTAKA

LPPM Institut Teknologi Kalimantan. Pembuatan Sprinkler Penyiram Tanaman dan Pupuk Cair. https://lppm.itk.ac.id/detail-berita/pembuatan-sprinkler-penyiram-tanaman-dan-pupuk-cair. Akses tanggal 10 Mei 2026.

Mahyuddin, Fauzia, A., Rustan, F. R., Agus, I., Iswahyudi, Simarmata, M. M. T., Saidah, H., Mukrim, M. I., Riswal, K., Indrawanto, D., Sari, S. P., & Rahmawati. (2024). Sistem irigasi dan pengairan air (A. Karim, Ed.). Yayasan Kita Menulis.

Priyonggo, B., Azizu, M. N., Annisa, H., Agisaqma, L. O., Ali, A. M., Bachrun, R., Damanik, A. P., Nugroho, E. O., & Nirtha, R. I. N. N. P. S. (2025). Prinsip dasar irigasi dalam pertanian (J. S. Simarmata, Ed.). Yayasan Kita Menulis.

Sudirman, Saidah, H., Tumpu, M., Yasa, I. W., Nenny, Ihsan, M., Nurnawaty, Rustan, F. R., & Tamrin. (2021). Sistem irigasi dan bangunan air (A. Karim, Ed.). Yayasan Kita Menulis

BAB 8
PENGGUNAAN TEKNOLOGI DALAM BUDIDAYA TANAMAN PANGAN

Penggunaan teknologi dalam budidaya tanaman pangan menjadi salah satu pendekatan strategis dalam meningkatkan produktivitas pertanian di tengah meningkatnya kebutuhan pangan global dan keterbatasan sumber daya lahan. Tanaman pangan utama seperti padi, jagung, kedelai, dan gandum memerlukan pengelolaan yang lebih efektif agar mampu memenuhi kebutuhan konsumsi masyarakat yang terus meningkat. Penerapan teknologi pertanian modern, termasuk mekanisasi, sistem pertanian presisi (*precision agriculture*), sensor digital, dan teknologi berbasis data spasial, mampu membantu petani dalam mengoptimalkan penggunaan input pertanian seperti pupuk, air, dan pestisida sehingga produksi menjadi lebih efisien dan berkelanjutan. Selain itu, teknologi juga berkontribusi terhadap peningkatan kualitas hasil panen dan efisiensi biaya produksi melalui pengambilan keputusan berbasis data. Menurut Rodrigues (2022), penggunaan teknologi presisi memberikan peluang besar dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya pertanian melalui integrasi sensor, sistem otomatisasi, dan analisis data untuk menunjang keberlanjutan produksi pertanian.

Perkembangan teknologi digital dalam sektor pertanian saat ini telah mendorong perubahan paradigma budidaya tanaman pangan dari sistem konvensional menuju sistem berbasis teknologi cerdas (*smart farming*). Berbagai inovasi seperti *Internet of Things* (IoT), *drone* pemantau lahan, kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), serta sistem irigasi otomatis mulai diterapkan untuk mendukung pengelolaan tanaman pangan yang lebih tepat dan responsif terhadap kondisi lingkungan. Penggunaan teknologi ini memungkinkan petani melakukan pemantauan kondisi tanah,

kelembapan, serangan hama, hingga kebutuhan air tanaman secara *real time* sehingga risiko kegagalan panen dapat ditekan. DeLay *et al*. (2022), menjelaskan bahwa adopsi teknologi pertanian presisi terbukti meningkatkan efisiensi teknis usaha tani karena membantu petani dalam mengelola input produksi secara lebih akurat dan produktif.

Di sisi lain, penggunaan teknologi dalam budidaya tanaman pangan juga menjadi solusi terhadap berbagai tantangan global, seperti perubahan iklim, keterbatasan air, degradasi tanah, dan meningkatnya kebutuhan pangan penduduk dunia. Sistem pertanian cerdas berbasis sensor, komunikasi nirkabel, dan otomatisasi dinilai mampu membantu petani meningkatkan ketepatan dalam pengelolaan budidaya tanaman, mulai dari persiapan lahan hingga masa panen. Dengan pemanfaatan teknologi tersebut, petani dapat melakukan efisiensi penggunaan air irigasi, pengendalian organisme pengganggu tanaman secara tepat sasaran, serta meningkatkan stabilitas hasil produksi pangan. Prasad *et al*. (2023), menyatakan bahwa penerapan IoT dalam pertanian mampu meningkatkan produktivitas tanaman melalui sistem pemantauan otomatis dan pengelolaan budidaya yang lebih efisien berdasarkan data lingkungan secara langsung.

Penggunaan teknologi dalam budidaya tanaman pangan utama juga berperan penting dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya pertanian secara berkelanjutan. Teknologi berbasis sensor, analisis data besar (*big data*), dan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) memungkinkan petani melakukan pengelolaan lahan secara lebih presisi berdasarkan kondisi tanah, kelembapan, unsur hara, dan kebutuhan tanaman. Dalam budidaya tanaman pangan utama seperti padi, jagung, dan kedelai, teknologi tersebut membantu mengurangi pemborosan pupuk dan air irigasi sehingga mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga kualitas lingkungan. Menurut Alahmad *et al.* (2023), integrasi sensor IoT dan *big data* dalam sistem pertanian presisi mampu meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya serta produktivitas tanaman melalui pengelolaan budidaya yang berbasis data lapangan secara real time.

Selain memberikan manfaat terhadap peningkatan hasil produksi, penggunaan teknologi pada budidaya tanaman pangan juga menghadapi berbagai tantangan, terutama dalam aspek biaya investasi, kemampuan sumber daya manusia, literasi digital petani, serta keterbatasan infrastruktur teknologi di wilayah pedesaan. Meskipun demikian, perkembangan teknologi pertanian cerdas (*smart agriculture*) berbasis *Internet of Things* (IoT), sensor digital, dan sistem otomatisasi tetap menjadi peluang besar untuk meningkatkan ketahanan pangan di masa depan. Oleh karena itu, dukungan pemerintah, lembaga pendidikan, dan penyuluhan pertanian sangat diperlukan untuk mempercepat adopsi teknologi di tingkat petani. Menurut Adli *et al*. (2023), keberhasilan penerapan teknologi pertanian cerdas sangat dipengaruhi oleh kesiapan infrastruktur, kompetensi pengguna, dan integrasi sistem teknologi untuk mendukung keberlanjutan sektor pertanian modern.

8.1 Jenis dan Peran Teknologi dalam Budidaya Tanaman Pangan

8.1.1 Pengertian Teknologi Pertanian dalam Budidaya Tanaman Pangan

Teknologi pertanian dalam budidaya tanaman pangan merupakan penerapan ilmu pengetahuan, alat, metode, dan inovasi modern yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, kualitas hasil, serta keberlanjutan sistem produksi tanaman pangan. Dalam praktik budidaya tanaman pangan, teknologi pertanian mencakup penggunaan mekanisasi pertanian, benih unggul, sistem irigasi modern, sensor digital, teknologi informasi, hingga sistem pertanian presisi (*precision agriculture*) yang bertujuan untuk membantu petani mengelola usaha tani secara lebih efektif dan efisien. Penggunaan teknologi tersebut menjadi sangat penting karena sektor pertanian menghadapi berbagai tantangan, seperti meningkatnya kebutuhan pangan, keterbatasan lahan pertanian, perubahan iklim, serta penurunan kualitas lingkungan akibat eksploitasi sumber daya yang berlebihan. Oleh karena itu, teknologi pertanian menjadi salah satu instrumen penting dalam meningkatkan hasil produksi tanaman pangan secara berkelanjutan (Benos *et al*., 2021).

Teknologi pertanian dalam budidaya tanaman pangan juga diartikan sebagai integrasi antara ilmu agronomi, rekayasa teknik, dan teknologi digital untuk meningkatkan ketepatan pengelolaan tanaman berdasarkan kebutuhan spesifik lahan dan tanaman. Penerapan teknologi modern memungkinkan petani melakukan pengamatan terhadap kondisi tanah, kelembapan, suhu lingkungan, serangan organisme pengganggu tanaman, serta kebutuhan unsur hara secara lebih cepat dan akurat. Sistem berbasis *smart farming* dan *Internet of Things* (IoT) telah berkembang sebagai solusi untuk mendukung pengambilan keputusan dalam kegiatan budidaya tanaman pangan, mulai dari pengolahan lahan, penanaman, pemeliharaan, hingga panen. Dengan demikian, penggunaan teknologi pertanian tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga membantu mengurangi pemborosan penggunaan air, pupuk, dan pestisida sehingga lebih ramah lingkungan (Javaid *et al*., 2022).

Selain berfungsi meningkatkan produktivitas pertanian, teknologi pertanian dalam budidaya tanaman pangan juga memiliki peran penting dalam memperkuat ketahanan pangan nasional dan global. Pemanfaatan teknologi modern memungkinkan peningkatan efisiensi rantai produksi pangan melalui sistem otomatisasi dan digitalisasi pertanian yang mampu mengurangi kehilangan hasil panen serta meningkatkan kualitas produk pertanian. Di berbagai negara berkembang, penggunaan teknologi pertanian menjadi strategi penting dalam menghadapi tantangan ketidakpastian iklim dan peningkatan jumlah penduduk yang berdampak terhadap kebutuhan pangan. Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi pertanian yang tepat guna menjadi salah satu langkah penting dalam mendukung pembangunan pertanian berkelanjutan yang mampu memenuhi kebutuhan pangan masyarakat secara optimal (Zhang *et al.*, 2023).

8.1.2 Perkembangan Teknologi Budidaya Tanaman Pangan Utama

1. Padi (*Oryza sativa*)

Perkembangan teknologi budidaya tanaman padi (*Oryza sativa*) mengalami perubahan yang cukup pesat dalam beberapa tahun terakhir, terutama melalui penerapan teknologi pertanian

presisi (*precision agriculture*), mekanisasi, varietas unggul tahan cekaman, serta sistem pemantauan berbasis digital. Pada budidaya padi modern, petani mulai memanfaatkan sensor tanah, drone, *Global Positioning System* (GPS), dan teknologi citra satelit untuk memantau kondisi pertumbuhan tanaman, kebutuhan air, dan tingkat serangan hama secara lebih akurat. Penggunaan teknologi tersebut memungkinkan petani melakukan pengelolaan lahan secara spesifik lokasi (*site specific management*) sehingga penggunaan pupuk, air, dan pestisida menjadi lebih efisien. Selain itu, perkembangan teknologi irigasi berselang (*alternate wetting and drying*) juga banyak diterapkan untuk menghemat penggunaan air tanpa menurunkan produktivitas tanaman padi. Inovasi teknologi ini dinilai mampu meningkatkan efisiensi budidaya sekaligus mendukung keberlanjutan produksi pangan di tengah tantangan perubahan iklim (Sule *et al*., 2025).

Selain penerapan pertanian presisi, perkembangan teknologi budidaya padi juga diarahkan pada pemanfaatan teknologi bioteknologi dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman terhadap cekaman lingkungan. Pengembangan varietas padi berbasis *genome editing* menggunakan teknologi CRISPR-Cas menjadi salah satu inovasi penting untuk menghasilkan tanaman padi yang lebih tahan terhadap kekeringan, salinitas, penyakit, dan perubahan suhu ekstrem. Di sisi lain, pemanfaatan *drone* (*Unmanned Aerial Vehicles/ UAV*) dan teknologi pembelajaran mesin (*machine learning*) juga mulai digunakan untuk mendeteksi serangan gulma, hama, dan penyakit tanaman secara dini sehingga pengendalian dapat dilakukan secara lebih tepat sasaran. Teknologi ini membantu petani meningkatkan efisiensi pengelolaan budidaya serta meminimalkan kehilangan hasil panen akibat serangan organisme pengganggu tanaman (Gica *et al*., 2026; Saluky *et al*., 2025). Contoh: Pada budidaya *Oryza sativa* (padi), penggunaan sistem tanam jajar legowo yang dipadukan dengan drone pemantau lahan dan sensor kelembapan tanah mampu membantu petani mengoptimalkan kebutuhan irigasi serta mendeteksi serangan hama sejak dini. Selain itu,

penerapan teknologi irigasi berselang (*alternate wetting and drying*) terbukti dapat menghemat penggunaan air sekaligus mempertahankan produktivitas tanaman padi pada berbagai kondisi lingkungan (Sule *et al*., 2025).

2. Jagung (*Zea mays*)

Jagung (*Zea mays*) merupakan salah satu komoditas pangan strategis yang berperan penting sebagai sumber karbohidrat, bahan baku industri pangan, bioenergi, serta pakan ternak. Tanaman ini memiliki kemampuan adaptasi yang cukup luas pada berbagai kondisi lingkungan, namun produktivitasnya sangat dipengaruhi oleh faktor iklim, kesuburan tanah, serta ketersediaan air. Perkembangan teknologi budidaya jagung saat ini banyak diarahkan pada penggunaan varietas unggul toleran kekeringan, pemupukan berimbang, serta penerapan pertanian presisi berbasis teknologi untuk meningkatkan efisiensi produksi dan menjaga stabilitas hasil panen. Sebagai contoh, penggunaan jagung hibrida di Indonesia telah banyak diterapkan pada sentra produksi seperti Jawa Timur, Sulawesi Selatan, dan Lampung untuk memenuhi kebutuhan industri pakan ternak. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pendekatan pemuliaan tanaman dan teknologi adaptif menjadi solusi penting dalam menghadapi tekanan perubahan iklim terhadap produktivitas jagung (El-Sappah *et al*., 2022).

3. Kedelai (*Glycine max*)

Kedelai (*Glycine max*) merupakan tanaman pangan penting dari kelompok leguminosa yang banyak dimanfaatkan sebagai sumber protein nabati untuk berbagai produk pangan seperti tempe, tahu, susu kedelai, dan bahan baku pakan ternak. Produktivitas kedelai dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama suhu, ketersediaan air, serta kesuburan tanah, sehingga pengembangan varietas unggul toleran cekaman lingkungan menjadi fokus penting dalam budidaya modern. Selain itu, kedelai memiliki kemampuan fiksasi nitrogen melalui simbiosis dengan bakteri *Rhizobium* yang membantu meningkatkan kesuburan tanah. Sebagai contoh, budidaya kedelai di Indonesia banyak dikembangkan di wilayah Jawa Timur dan Jawa Tengah untuk memenuhi kebutuhan industri

pangan berbasis kedelai. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa strategi pemuliaan tanaman berbasis toleransi cekaman abiotik dapat membantu meningkatkan stabilitas produksi kedelai di tengah perubahan iklim global (Raza *et al*., 2021).

4. Ubi Kayu (*Manihot esculenta*)

Ubi kayu (*Manihot esculenta*) merupakan tanaman pangan sumber karbohidrat yang memiliki daya adaptasi tinggi terhadap lahan marginal dan kondisi kekeringan, sehingga berperan penting dalam mendukung ketahanan pangan di wilayah tropis. Tanaman ini banyak dimanfaatkan sebagai bahan pangan, tepung tapioka, bioetanol, serta bahan baku industri lainnya. Produktivitas ubi kayu dipengaruhi oleh kualitas bibit, pengelolaan tanah, serta kondisi iklim, terutama curah hujan dan suhu. Sebagai contoh, ubi kayu di Indonesia banyak dibudidayakan di Lampung dan Jawa Tengah untuk memenuhi kebutuhan industri tepung dan pangan olahan seperti gaplek dan keripik singkong. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pengembangan varietas tahan cekaman kekeringan menjadi strategi penting untuk meningkatkan hasil ubi kayu secara berkelanjutan di tengah perubahan iklim (Okogbenin *et al*., 2021).

5. Kacang Tanah (*Arachis hypogaea*)

Kacang tanah (*Arachis hypogaea*) merupakan tanaman leguminosa penting yang berfungsi sebagai sumber protein, lemak nabati, vitamin, dan mineral bagi kebutuhan pangan masyarakat. Tanaman ini banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku makanan ringan, minyak kacang, bumbu pecel, dan berbagai produk olahan pangan lainnya. Produktivitas kacang tanah dipengaruhi oleh kesuburan tanah, ketersediaan air, serta kondisi lingkungan yang mendukung pembentukan polong. Sebagai contoh, budidaya kacang tanah di Indonesia berkembang di Jawa Timur, Jawa Tengah, dan Nusa Tenggara Barat untuk memenuhi kebutuhan konsumsi rumah tangga dan industri pangan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pengelolaan lingkungan tumbuh yang baik dapat membantu meningkatkan ketahanan kacang tanah terhadap cekaman lingkungan dan menjaga kualitas hasil panen (Li *et al*., 2022).

8.1.3 Peran Teknologi dalam Meningkatkan Produktivitas, Efisiensi, dan Kualitas Hasil Panen

1. Peningkatan Produktivitas Melalui Pertanian Presisi

Perkembangan teknologi pertanian berperan penting dalam meningkatkan produktivitas hasil panen melalui penerapan pertanian presisi (*precision agriculture*) yang memanfaatkan sensor, citra satelit, sistem informasi geografis (SIG), dan kecerdasan buatan untuk mengoptimalkan penggunaan input pertanian seperti pupuk, air, dan pestisida. Teknologi ini memungkinkan petani melakukan pemantauan kondisi tanaman secara real-time sehingga keputusan budidaya menjadi lebih tepat sasaran dan mampu meningkatkan hasil produksi secara signifikan. Sebagai contoh, penggunaan *drone* untuk pemetaan lahan dan pemantauan kesehatan tanaman jagung serta padi telah diterapkan di berbagai negara berkembang untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan lahan pertanian. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pertanian presisi mampu meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus mengurangi kehilangan hasil panen akibat kesalahan pengelolaan budidaya (Zhang *et al*., 2023).

2. Peningkatan Efisiensi Produksi Pertanian

Teknologi modern juga berkontribusi dalam meningkatkan efisiensi produksi pertanian melalui mekanisasi dan otomatisasi sistem budidaya yang mampu mengurangi kebutuhan tenaga kerja, waktu operasional, dan biaya produksi. Penggunaan alat mesin pertanian modern seperti traktor otomatis, sistem irigasi pintar, dan *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pengelolaan lahan menjadi lebih efektif dengan pengawasan berbasis data lingkungan secara langsung. Sebagai contoh, peternakan modern kini mulai menggunakan sistem pengontrol kualitas udara berbasis IoT untuk memantau suhu, kelembapan, dan emisi gas di kandang sehingga produktivitas ternak tetap optimal. Kajian terbaru menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi digital dapat meningkatkan efisiensi sumber daya dan menekan risiko kerugian produksi akibat faktor lingkungan yang tidak terkendali (Singh *et al*., 2024).

3. **Peningkatan Kualitas Hasil Panen**

Teknologi pertanian juga berperan dalam meningkatkan kualitas hasil panen melalui pengembangan varietas unggul, sistem pengendalian mutu pascapanen, dan teknologi penyimpanan modern. Penggunaan benih unggul yang tahan terhadap cekaman lingkungan dan serangan penyakit mampu menghasilkan produk pertanian dengan ukuran, kualitas nutrisi, dan daya simpan yang lebih baik. Selain itu, teknologi pascapanen seperti pengering otomatis, penyimpanan suhu terkendali, dan pengemasan modern membantu mempertahankan mutu hasil pertanian hingga sampai ke konsumen. Sebagai contoh, penggunaan teknologi penyimpanan dingin pada komoditas hortikultura mampu mengurangi kerusakan produk selama distribusi dan memperpanjang masa simpan hasil panen. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa modernisasi sistem pascapanen menjadi faktor penting dalam meningkatkan kualitas dan daya saing produk pertanian di pasar global (FAO, 2023).

8.2.4 Modernisasi Pertanian di Era Globalisasi

Modernisasi pertanian di era globalisasi merupakan proses transformasi sistem pertanian tradisional menuju sistem pertanian modern berbasis teknologi, inovasi, dan integrasi pasar global guna meningkatkan produktivitas, efisiensi, serta daya saing sektor pertanian. Perkembangan teknologi digital, mekanisasi, bioteknologi, dan sistem informasi pertanian telah mendorong perubahan besar dalam praktik budidaya, distribusi, hingga pemasaran hasil pertanian. Selain itu, globalisasi membuka peluang akses pasar internasional bagi produk pertanian, namun juga menuntut petani untuk mampu memenuhi standar mutu, keamanan pangan, dan keberlanjutan lingkungan. Sebagai contoh, penggunaan aplikasi digital pertanian untuk memantau kondisi tanaman, memprediksi cuaca, dan menentukan waktu tanam telah diterapkan pada berbagai sentra produksi pangan untuk meningkatkan hasil dan mengurangi risiko gagal panen. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa modernisasi pertanian berbasis teknologi menjadi faktor penting dalam meningkatkan ketahanan pangan dan keberlanjutan sistem

pertanian di tengah dinamika ekonomi global (Reganold & Wachter, 2022).

8.2 Penerapan Teknologi pada Tahapan Budidaya Tanaman Pangan

8.2.1 Teknologi Pengolahan Lahan

1. Penggunaan Traktor dalam Pengolahan Lahan

Teknologi traktor berperan penting dalam meningkatkan efektivitas pengolahan lahan pertanian karena mampu mempercepat proses pembajakan, penggemburan tanah, serta persiapan lahan sebelum tanam dibandingkan metode manual. Penggunaan traktor membantu memperbaiki struktur tanah sehingga aerasi dan penetrasi akar tanaman menjadi lebih optimal. Selain itu, mekanisasi melalui traktor dapat mengurangi kebutuhan tenaga kerja dan biaya operasional dalam jangka panjang. Sebagai contoh, penggunaan traktor roda dua dan roda empat pada lahan sawah padi di Indonesia telah membantu petani mempercepat proses olah tanah sebelum musim tanam, terutama pada skala lahan luas. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa mekanisasi pengolahan tanah dapat meningkatkan efisiensi kerja dan produktivitas pertanian secara signifikan (Jin *et al*., 2021).

2. Penggunaan *Cultivator* untuk Penggemburan Tanah

Teknologi *cultivator* digunakan untuk menggemburkan tanah, membersihkan gulma, serta meningkatkan sirkulasi udara di sekitar zona perakaran tanaman sehingga pertumbuhan tanaman pangan dapat berlangsung lebih optimal. Penggunaan alat ini sangat membantu dalam mengurangi pemadatan tanah dan meningkatkan efisiensi kerja petani dibandingkan pengolahan secara tradisional menggunakan alat manual. Sebagai contoh, *rotary cultivator* banyak digunakan pada lahan jagung dan kedelai untuk mempersiapkan bedengan tanam serta mengendalikan gulma pada fase awal pertumbuhan tanaman. Kajian terbaru menunjukkan bahwa penerapan alat mekanis modern dalam pengolahan tanah dapat meningkatkan

kualitas media tumbuh sekaligus efisiensi penggunaan energi pertanian (Zhang *et al*., 2022).

3. Mekanisasi Pertanian dalam Pengolahan Lahan

Mekanisasi pertanian merupakan penerapan berbagai teknologi mesin pertanian untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi sistem budidaya tanaman pangan, mulai dari pengolahan tanah hingga pemanenan. Pemanfaatan alat mekanis modern memungkinkan proses budidaya dilakukan lebih cepat, tepat waktu, dan mengurangi kehilangan hasil akibat keterlambatan pengolahan lahan. Selain itu, mekanisasi juga mendukung keberlanjutan pertanian melalui efisiensi penggunaan bahan bakar dan tenaga kerja. Sebagai contoh, penggunaan kombinasi traktor, *rotavator*, dan alat penanam otomatis pada budidaya jagung skala besar telah terbukti meningkatkan kapasitas produksi dan menekan biaya operasional. Penelitian terbaru menyatakan bahwa modernisasi mekanisasi menjadi salah satu faktor utama peningkatan produktivitas sektor pertanian di negara berkembang (Javaid *et al*., 2023).

8.2.2 Teknologi Benih Unggul dan Kultur Jaringan

1. Teknologi Benih Unggul

Teknologi benih unggul merupakan inovasi penting dalam budidaya tanaman pangan karena mampu menghasilkan varietas dengan produktivitas tinggi, tahan terhadap hama dan penyakit, serta memiliki kemampuan adaptasi yang lebih baik terhadap perubahan lingkungan. Penggunaan benih unggul dapat meningkatkan keseragaman pertumbuhan tanaman dan kualitas hasil panen sehingga mendukung peningkatan produksi pangan nasional. Sebagai contoh, penggunaan varietas padi unggul tahan kekeringan dan jagung hibrida berproduksi tinggi telah diterapkan di berbagai wilayah Indonesia untuk meningkatkan hasil panen pada kondisi lahan yang beragam. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pengembangan varietas unggul berbasis pemuliaan modern menjadi strategi utama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim terhadap produksi tanaman pangan (Hickey *et al*., 2021).

2. Teknologi Kultur Jaringan

Teknologi kultur jaringan merupakan metode perbanyakan tanaman secara *in vitro* menggunakan bagian jaringan tanaman pada kondisi steril untuk menghasilkan bibit dalam jumlah besar, seragam, dan bebas penyakit. Teknologi ini sangat bermanfaat untuk mempercepat penyediaan bibit unggul, terutama pada tanaman yang sulit diperbanyak secara konvensional atau memiliki tingkat serangan penyakit tinggi. Sebagai contoh, kultur jaringan telah diterapkan pada perbanyakan bibit kentang, pisang, dan singkong unggul guna meningkatkan kualitas bibit sebelum ditanam di lapangan. Kajian terbaru menunjukkan bahwa kultur jaringan menjadi pendekatan penting dalam mendukung konservasi plasma nutfah dan peningkatan kualitas benih tanaman pangan secara berkelanjutan (Cardoso *et al*., 2022).

8.2.3 Teknologi Pemupukan dan Irigasi Modern

1. Teknologi Pemupukan Modern

Teknologi fertigasi merupakan metode pemberian pupuk yang dikombinasikan dengan sistem irigasi sehingga unsur hara dapat langsung disalurkan ke daerah perakaran tanaman secara lebih efisien dan tepat dosis. Sistem ini mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, mengurangi kehilangan unsur hara akibat pencucian, serta mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal karena nutrisi diberikan sesuai kebutuhan tanaman pada fase pertumbuhan tertentu. Selain itu, fertigasi membantu menghemat tenaga kerja dan penggunaan air dibandingkan metode pemupukan konvensional. Sebagai contoh, teknologi fertigasi telah banyak diterapkan pada budidaya hortikultura seperti cabai, tomat, dan melon untuk meningkatkan produktivitas dan kualitas hasil panen. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem fertigasi mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan nitrogen dan hasil produksi tanaman dibandingkan metode pemupukan biasa (Zhang *et al*., 2021).

2. Teknologi Irigasi Modern

Teknologi irigasi modern seperti irigasi tetes (*drip irrigation*) dan *sprinkler* berperan penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air pada budidaya tanaman pangan, terutama di daerah dengan keterbatasan sumber air. Irigasi tetes bekerja dengan menyalurkan air langsung ke daerah akar tanaman secara perlahan sehingga kehilangan air akibat evaporasi dan limpasan dapat diminimalkan, sedangkan sistem *sprinkler* menyiram tanaman menyerupai hujan buatan yang cocok diterapkan pada berbagai jenis tanaman dan kondisi lahan. Sebagai contoh, sistem irigasi tetes banyak diterapkan pada budidaya jagung dan sayuran di wilayah kering untuk menjaga ketersediaan air selama pertumbuhan tanaman. Kajian terbaru menunjukkan bahwa penggunaan teknologi irigasi modern dapat meningkatkan efisiensi air sekaligus mempertahankan produktivitas pertanian secara berkelanjutan (Kang *et al*., 2022).

8.2.4 Penggunaan Teknologi Pengendalian Hama dan Penyakit

1. Penggunaan Pestisida Ramah Lingkungan dan Biopestisida

Teknologi pengendalian hama dan penyakit berbasis pestisida ramah lingkungan dan biopestisida semakin berkembang sebagai alternatif pengganti pestisida kimia sintetis yang berisiko mencemari lingkungan. Biopestisida umumnya berasal dari mikroorganisme, ekstrak tumbuhan, atau bahan alami yang mampu mengendalikan organisme pengganggu tanaman tanpa merusak keseimbangan ekosistem pertanian. Penggunaan teknologi ini membantu mengurangi residu kimia pada hasil panen dan meningkatkan keamanan pangan. Sebagai contoh, pestisida berbahan dasar ekstrak nimba (*Azadirachta indica*) dan mikroba antagonis banyak digunakan untuk mengendalikan serangan hama pada tanaman hortikultura dan pangan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa biopestisida efektif meningkatkan keberlanjutan sistem pertanian dengan tetap menjaga produktivitas tanaman (Marrone *et al*., 2023).

2. Penggunaan Perangkap Digital dalam Monitoring Hama

Perkembangan teknologi digital telah mendorong penggunaan perangkap hama berbasis sensor dan kamera pintar untuk mendeteksi populasi organisme pengganggu tanaman secara cepat dan akurat. Perangkap digital memungkinkan petani memantau perkembangan hama secara real-time sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan lebih tepat waktu dan mengurangi penggunaan pestisida berlebihan. Teknologi ini biasanya diintegrasikan dengan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) dan *Internet of Things* (IoT) untuk mengidentifikasi jenis hama secara otomatis. Sebagai contoh, perangkap digital berbasis kamera telah digunakan pada budidaya padi dan jagung untuk mendeteksi serangan wereng dan ulat secara dini. Kajian terbaru menunjukkan bahwa sistem monitoring digital dapat meningkatkan efisiensi pengendalian hama dan mengurangi risiko kehilangan hasil panen (Ebrahimi *et al*., 2024).

8.2.5 Teknologi Panen dan Pascapanen

1. Teknologi Panen Modern

Teknologi panen modern berperan penting dalam meningkatkan efisiensi kerja dan mengurangi kehilangan hasil pertanian melalui penggunaan alat dan mesin panen yang lebih cepat, akurat, dan hemat tenaga kerja. Penggunaan mesin panen membantu memastikan waktu panen yang tepat sehingga kualitas hasil pertanian dapat dipertahankan. Selain itu, mekanisasi panen dapat mengurangi kerusakan hasil akibat keterlambatan pemanenan dan kesalahan penanganan manual. Sebagai contoh, penggunaan *combine harvester* pada budidaya padi di berbagai daerah Indonesia mampu mempercepat proses pemanenan sekaligus mengurangi kehilangan gabah di lapangan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa mekanisasi panen meningkatkan produktivitas dan efisiensi ekonomi usaha tani secara signifikan (Javaid *et al*., 2023).

2. Teknologi Pascapanen Modern

Teknologi pascapanen modern digunakan untuk mempertahankan kualitas hasil panen melalui proses

pengeringan, penyimpanan, pengemasan, dan distribusi yang lebih baik guna mengurangi kehilangan hasil (*post harvest losses*). Teknologi seperti ruang pendingin (*cold storage*), pengering otomatis, dan pengemasan vakum mampu menjaga kualitas fisik, kandungan nutrisi, serta umur simpan produk pertanian sebelum dipasarkan. Sebagai contoh, penggunaan *cold storage* pada buah dan sayuran segar telah membantu menjaga kesegaran produk selama distribusi ke pasar modern. Kajian terbaru menunjukkan bahwa inovasi teknologi pascapanen memiliki kontribusi besar terhadap peningkatan kualitas dan daya saing hasil pertanian di pasar global (Kumar *et al*., 2022).

8.3 Manfaat, Tantangan, dan Pengembangan Teknologi Budidaya Tanaman Pangan

8.3.1 Manfaat Penggunaan Teknologi bagi Petani dan Ketahanan Pangan

1. Meningkatkan Produktivitas dan Pendapatan Petani

Penggunaan teknologi dalam budidaya tanaman pangan memberikan manfaat besar bagi petani melalui peningkatan produktivitas dan efisiensi usaha tani. Teknologi seperti benih unggul, mekanisasi pertanian, sistem irigasi modern, dan pertanian presisi membantu meningkatkan hasil panen dengan penggunaan input yang lebih efektif sehingga biaya produksi dapat ditekan. Selain itu, teknologi memungkinkan petani melakukan pengelolaan tanaman secara lebih tepat berdasarkan kondisi lingkungan dan kebutuhan tanaman. Sebagai contoh, penggunaan varietas padi unggul dan mesin tanam modern di berbagai daerah sentra pangan Indonesia mampu meningkatkan hasil panen sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa adopsi teknologi pertanian berkontribusi positif terhadap peningkatan produktivitas pertanian dan pendapatan rumah tangga petani di negara berkembang (Aryal *et al*., 2021).

2. Mendukung Ketahanan Pangan dan Stabilitas Produksi

Teknologi pertanian juga berperan penting dalam mendukung ketahanan pangan melalui peningkatan stabilitas

produksi dan kemampuan adaptasi terhadap perubahan iklim serta gangguan lingkungan lainnya. Penggunaan teknologi modern seperti sistem prediksi cuaca, irigasi cerdas, serta varietas tahan cekaman membantu menjaga produktivitas tanaman pangan meskipun terjadi perubahan kondisi lingkungan. Selain itu, digitalisasi sektor pertanian memungkinkan pengelolaan rantai pasok pangan menjadi lebih efektif sehingga distribusi pangan dapat berjalan lebih efisien. Sebagai contoh, pemanfaatan sistem pemantauan cuaca berbasis aplikasi digital telah membantu petani menentukan waktu tanam yang lebih tepat untuk mengurangi risiko gagal panen. Kajian terbaru menunjukkan bahwa inovasi teknologi pertanian menjadi komponen penting dalam memperkuat ketahanan pangan global di tengah meningkatnya ancaman perubahan iklim (FAO, 2023).

8.3.2 Kendala Penerapan Teknologi

1. Kendala Biaya Investasi Teknologi

Salah satu kendala utama dalam penerapan teknologi pertanian adalah tingginya biaya investasi awal yang diperlukan untuk membeli alat dan mesin modern seperti traktor, sistem irigasi otomatis, drone pertanian, maupun perangkat sensor digital. Banyak petani kecil mengalami keterbatasan modal sehingga sulit mengakses teknologi yang sebenarnya mampu meningkatkan produktivitas usaha tani mereka. Selain biaya pembelian, petani juga harus mempertimbangkan biaya perawatan, bahan bakar, dan pelatihan penggunaan teknologi tersebut. Sebagai contoh, penggunaan *combine harvester* dan sistem pertanian presisi masih lebih banyak diterapkan pada usaha pertanian skala besar dibandingkan petani kecil karena faktor keterbatasan finansial. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa hambatan ekonomi menjadi faktor utama rendahnya tingkat adopsi teknologi pertanian modern di berbagai negara berkembang (Daum & Birner, 2020).

2. Keterbatasan Sumber Daya Manusia

Keterbatasan kemampuan sumber daya manusia, terutama dalam memahami dan mengoperasikan teknologi

modern, menjadi tantangan penting dalam modernisasi sektor pertanian. Banyak petani, khususnya di daerah pedesaan, masih menghadapi kesulitan dalam mengoperasikan alat digital atau membaca data pertanian berbasis teknologi informasi. Rendahnya keterampilan teknis menyebabkan pemanfaatan teknologi tidak optimal meskipun alat tersedia. Sebagai contoh, sebagian petani masih mengalami kesulitan menggunakan aplikasi pertanian berbasis telepon pintar untuk memantau cuaca, harga pasar, atau kondisi tanaman. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas petani melalui pelatihan dan pendampingan teknis sangat diperlukan untuk mempercepat adopsi teknologi pertanian (Javaid *et al*., 2023).

3. Keterbatasan Akses terhadap Teknologi

Akses yang terbatas terhadap teknologi pertanian modern juga menjadi kendala besar, terutama bagi petani di wilayah terpencil yang memiliki infrastruktur terbatas. Ketersediaan jaringan internet, listrik, layanan teknis, serta distribusi alat pertanian yang belum merata menyebabkan banyak petani sulit memperoleh manfaat dari perkembangan teknologi pertanian digital. Selain itu, kesenjangan akses informasi menyebabkan adopsi inovasi pertanian berlangsung lebih lambat di daerah tertentu. Sebagai contoh, petani di wilayah pedalaman sering mengalami hambatan dalam menggunakan sistem pertanian berbasis Internet of Things (IoT) karena keterbatasan koneksi internet dan biaya perangkat. Kajian terbaru menunjukkan bahwa pembangunan infrastruktur digital menjadi faktor penting untuk memperluas akses teknologi pertanian secara inklusif (Klerkx *et al*., 2021).

4. Rendahnya Tingkat Pendidikan Petani

Tingkat pendidikan petani yang masih relatif rendah menjadi faktor penghambat dalam penerapan teknologi budidaya tanaman pangan karena memengaruhi kemampuan memahami inovasi, mengakses informasi, dan mengelola teknologi modern secara efektif. Kurangnya pemahaman terhadap manfaat teknologi sering menyebabkan petani enggan beralih dari metode tradisional yang telah lama digunakan. Selain itu, keterbatasan literasi digital juga memengaruhi

kemampuan petani dalam mengakses informasi pertanian berbasis internet. Sebagai contoh, sebagian petani masih lebih mengandalkan pengalaman turun-temurun dibandingkan rekomendasi berbasis data digital dalam menentukan pola budidaya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pendidikan dan penyuluhan pertanian memiliki peran penting dalam meningkatkan kesiapan petani terhadap transformasi pertanian modern (Eastwood *et al*., 2022).

8.3.3 Dampak Teknologi terhadap Lingkungan dan Keberlanjutan Pertanian

1. Dampak Positif Teknologi terhadap Efisiensi Sumber Daya dan Keberlanjutan Pertanian

Penerapan teknologi pertanian modern memberikan dampak positif terhadap lingkungan melalui peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya seperti air, pupuk, dan pestisida sehingga dapat mengurangi pencemaran lingkungan dan degradasi lahan. Teknologi seperti pertanian presisi, sistem irigasi tetes, sensor tanah, dan pemupukan berbasis kebutuhan tanaman memungkinkan penggunaan input pertanian dilakukan secara lebih tepat sasaran sehingga mengurangi pemborosan dan emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian. Selain itu, teknologi ramah lingkungan seperti biopestisida dan sistem pengolahan limbah pertanian turut mendukung keberlanjutan agroekosistem. Sebagai contoh, penggunaan sistem irigasi tetes pada budidaya hortikultura mampu menghemat penggunaan air secara signifikan dibandingkan metode penggenangan tradisional. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa digitalisasi pertanian dan penerapan teknologi presisi berkontribusi besar dalam menciptakan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan efisien sumber daya (Zhang *et al*., 2023).

2. Dampak Negatif Teknologi terhadap Lingkungan

Di sisi lain, penggunaan teknologi pertanian yang tidak terkendali dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, terutama apabila disertai penggunaan bahan kimia sintetis secara berlebihan dan mekanisasi intensif tanpa mempertimbangkan aspek konservasi. Penggunaan pupuk dan

pestisida kimia secara berlebihan dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air, menurunkan biodiversitas organisme tanah, serta memicu resistensi hama. Selain itu, penggunaan mesin pertanian berbahan bakar fosil dapat meningkatkan emisi karbon yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Sebagai contoh, praktik pemupukan nitrogen berlebihan pada lahan pertanian dapat meningkatkan emisi gas amonia dan nitrogen oksida yang berdampak terhadap kualitas udara dan kesehatan lingkungan. Kajian terbaru menunjukkan bahwa keberlanjutan pertanian memerlukan keseimbangan antara inovasi teknologi dan prinsip konservasi lingkungan agar dampak ekologis dapat diminimalkan (Pan *et al*., 2022).

8.3.4 Strategi Pengembangan Teknologi Pertanian Berkelanjutan di Masa Depan

Strategi pengembangan teknologi pertanian berkelanjutan di masa depan perlu diarahkan pada integrasi inovasi digital, efisiensi sumber daya, dan pendekatan ramah lingkungan untuk meningkatkan produktivitas tanpa merusak ekosistem pertanian. Penggunaan teknologi berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), *Internet of Things* (IoT), pertanian presisi, benih unggul tahan cekaman iklim, serta energi terbarukan di sektor pertanian menjadi langkah penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan peningkatan kebutuhan pangan global. Selain itu, penguatan pendidikan petani, akses teknologi yang merata, dan dukungan kebijakan pemerintah menjadi faktor utama dalam mempercepat transformasi pertanian modern yang berkelanjutan. Sebagai contoh, penggunaan sistem pertanian cerdas berbasis sensor untuk memantau kebutuhan air dan unsur hara tanaman dapat membantu meningkatkan hasil panen sekaligus mengurangi pemborosan sumber daya. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pendekatan inovasi berkelanjutan menjadi kunci utama dalam membangun sistem pertanian yang tangguh, produktif, dan berwawasan lingkungan di masa depan (Javaid *et al*., 2023).

DAFTAR PUSTAKA

Adli, H.K., Remli, M.A., Wong, K.N.S.W.S., Ismail, N.A., González-Briones, A., Corchado, J.M. & Mohamad, M.S. 2023. Recent Advancements and Challenges of AIoT Application in Smart Agriculture: A Review. *Sensors*, 23(7), pp.1–35. https://doi.org/10.3390/s23073752.

Alahmad, T., Neményi, M. & Nyéki, A. 2023. Applying IoT Sensors and Big Data to Improve Precision Crop Production: A Review. *Agronomy*, 13(10), pp.1–28. https://doi.org/10.3390 /agronomy13102603.

Aryal, J.P., Rahut, D.B., Maharjan, S., Erenstein, O. & Stirling, C. 2021. Factors Affecting the Adoption of Multiple Climate-Smart Agricultural Practices in South Asia. *Natural Resources Forum*, 45(2), pp.153–168. https://doi.org/10.1111/1477-8947.122 03.

Benos, L., Tsaopoulos, D. & Bochtis, D. 2021. A Review on Ergonomics in Agriculture. Part I: Manual Operations. *Applied Sciences*, 11(4), pp.1–22. https://doi.org/10.3390/ app11041908.

Cardoso, J.C., Martinelli, A.P., Latado, R.R., Fráguas, C.B. & Pasqual, M. 2022. Advances and Challenges in Tissue Culture Techniques for Crop Improvement. *Plants*, 11(14), p.1874. https://doi.org/10.3390/plants11141874.

Daum, T. & Birner, R. 2020. *Agricultural Mechanization in Africa: Myths, Realities and an Emerging Research Agenda*. Global Food Security, 26, p.100393. https://doi.org/10.1016/ j.gfs.2020.100393.

DeLay, N.D., Thompson, N.M. & Mintert, J.R. 2022. Precision Agriculture Technology Adoption and Technical Efficiency. *Journal of Agricultural Economics*, 73(1), pp.195–219. https://doi.org/10.1111/1477-9552.12440.

Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M. & Dela Rue, B. 2022. Managing Socio-Ethical Challenges in the Development of Smart Farming: From a Fragmented to a Comprehensive Approach for Responsible Research and Innovation. *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 35(2), pp.1–29. https://doi.org/10.1007/s10806-021-09887-1.

Ebrahimi, M.A., Khosravi, M.R., Zhang, Y. & Sharma, S. 2024. Artificial Intelligence and Smart Pest Monitoring Systems in Precision Agriculture: A Review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 218, p.108637. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108637.

El-Sappah, A.H., Rather, S.A., Wani, S.H., Elrys, A.S., Bilal, M., Huang, Q., Dar, Z.A., Elashtokhy, M.M.A., Soaud, N., Koul, M., Mir, R.R., Yan, K., Li, J., El-Tarabily, K.A. & Abbas, M.A. 2022. Heat Stress-Mediated Constraints in Maize (*Zea mays*) Production: Challenges and Solutions. *Frontiers in Plant Science*, 13, p.879366. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.879366.

FAO. 2023. The State of Food and Agriculture 2023: Revealing the True Cost of Food to Transform Agrifood Systems. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/cc7724en

Gica, N.G.M., Gica, W.T., La, H., Mi, Y. & Zhou, Y. 2026. Precision Breeding for a Global Staple Food: A Systematic Review with a Strategic Framework for CRISPR-Cas Applications in Rice (*Oryza sativa* L.). *Genes*, 17(2), p.165. https://doi.org/10.3390/genes17020165.

Hickey, L.T., Hafeez, A.N., Robinson, H., Jackson, S.A., Leal-Bertioli, S.C.M., Tester, M., Gao, C., Godwin, I.D., Hayes, B.J. & Wulff, B.B.H. 2021. Breeding Crops to Feed 10 Billion. *Nature Biotechnology*, 37(7), pp.744–754. https://doi.org/10.1038 /s41587-019-0152-9.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R. & Rab, S. 2022. Significance of Smart Farming for Agricultural Sustainability. *Sustainable Operations and Computers*, 3, pp.119–131. https://doi.org/10.1016/j.susoc.2021.10.002.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R. & Rab, S. 2023. Significance of Smart Farming and Agricultural Mechanization for Sustainable Agriculture. *Smart Agricultural Technology*, 3, p.100103. https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100103

Jin, X., Yang, G., Xu, X., Yang, H., Feng, H., Li, Z., Lan, Y. & Zhou, C. 2021. Combined Multi-Temporal UAV Imagery and Ground Data for Estimating Crop Yield in Precision Agriculture. *Computers and*

Electronics in Agriculture, 182, p.106033. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106033.

Kang, Y., Wang, F., Liu, H. & Yuan, B. 2022. Advances in Drip Irrigation Technology and Water Use Efficiency for Sustainable Agriculture. *Agricultural Water Management*, 263, p.107467. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107467.

Klerkx, L., Jakku, E. & Labarthe, P. 2021. A Review of Social Science on Digital Agriculture, Smart Farming and Agriculture 4.0: New Contributions and a Future Research Agenda. *NJAS: Impact in Agricultural and Life Sciences*, 93(1), p.100315. https://doi.org/10.1016/j.njas.2020.100315.

Kumar, P., Kumar, V., Kumar, A. & Singh, J. 2022. Postharvest Technologies for Reducing Food Losses and Improving Agricultural Sustainability. *Sustainability*, 14(18), p.11487. https://doi.org/10.3390/su141811487.

Li, M., Guo, S., Ho, C.T. & Bai, N. 2022. Review on Chemical Compositions and Biological Activities of Peanut (Arachis hypogaea L.). *Journal of Food Biochemistry*, 46(7), e14119. https://doi.org/10.1111/jfbc.14119.

Marrone, P.G., Wraight, S.P. & Loyd, A.L. 2023. Biopesticides: State of the Art and Future Opportunities for Sustainable Agriculture. Biological Control, 179, p.105143. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2023.105143.

Okogbenin, E., Setter, T.L., Ferguson, M., Mutegi, R., Ceballos, H., Olasanmi, B. & Fregene, M. 2021. Mechanisms and Approaches Towards Enhanced Drought Tolerance in Cassava (*Manihot esculenta*). *Current Plant Biology*, 28, p.100227. https://doi.org/10.1016/j.cpb.2021.100227.

Pan, S.Y., He, K.H., Lin, K.T. & Fan, C.T. 2022. Addressing Nitrogenous Gases from Croplands Toward Low Emission Agriculture. npj *Climate and Atmospheric Science*, 5, p.43. https://doi.org/10.1038/s41612-022-00265-3.

Prasad, G.D.S., Vanathi, A. & Kiruthika Devi, B.S. 2023. A Review on IoT Applications in Smart Agriculture. *Recent Developments in Electronics and Communication Systems*, pp.1–15. https://doi.org/10.3233/ATDE221332.

Raza, A., Tabassum, J., Fakhar, A.Z., Sharif, R., Chen, H., Zhang, C., Ju, L., Ashraf, M., Mubarik, M.S., Atif, R.M. & Hasanuzzaman, M. 2021. Smart Re-Breeding for Abiotic Stress Tolerance in Soybean (*Glycine max* L.). *International Journal of Molecular Sciences*, 22(18), p.9835. https://doi.org/10.3390/ijms22189835.

Reganold, J.P. &Wachter, J.M. 2022. Organic Agriculture in the 21st Century. *Nature Plants*, 8(4), pp.1–10. https://doi.org/ 10.1038/s41477-022-01123-4.

Rodrigues, G.C. 2022. Precision Agriculture: Strategies and Technology Adoption. *Agriculture*, 12(9), pp.1–17. https://doi. org/10.3390/agriculture12091474.

Saluky, S., Yoni, M. & Fatimah, A. 2025. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Pest and Disease Detection in Rice Cultivation: A Systematic Review. International Journal of Technology and Modeling, 4(3), pp.1–18. https://doi.org/10.63876/ijtm .v4i3.158.

Singh, H., Wang, S., Gu, J., Xie, Q., Dong, W., Sun, C., Li, J., Ma, C., Dong, J. & Liu, H. 2024. IoT-Based Smart Environmental Control and Air Emission Management in Animal Farming: A Systematic Review. Information Processing in Agriculture. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2026.02.00.

Sule, M.I.S., Siswanto, S.Y., Suriadikusumah, A. & Banerjee, S. 2025. Advancing Innovative Climate-Resilient and Net-Zero Technologies to Enhance Rice Productivity and Sustainability Amidst Climate Change. *Sustainability*, 17(20), p.9322. https://doi.org/10.3390/su17209322.

Zhang, H., Wang, X., You, M. & Liu, C. 2021. Effects of Fertigation Management on Crop Yield and Nutrient Use Efficiency: A Review. *Agricultural Water Management*, 245, p.106635. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106635.

Zhang, X., Wang, M., Chen, Y. & Li, H. 2022. Advances in Agricultural Mechanization and Soil Preparation Technologies for Sustainable Crop Production. *Agriculture*, 12(9), p.1458. https://doi.org/10.3390/agriculture12091458.

Zhang, Y., Li, X. & Wang, J. 2023. Precision Agriculture and Emission Reduction Technologies. *Computers and Electronics in*

Agriculture, 206, pp.107–125. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107890.

Zhang, Y., Wang, G., Duan, Y. & Huang, S. 2023. Digital Agriculture and Sustainable Food Production: Current Status and Future Perspectives. *Agriculture*, 13(8), pp.1–21. https://doi.org/10.3390/agriculture13081562.

BAB 9
BUDIDAYA TANAMAN PANGAN BERKELANJUTAN

9.1 Konsep dan Prinsip Budidaya Tanaman Pangan Berkelanjutan

Budidaya tanaman pangan berkelanjutan merupakan pendekatan sistem produksi pertanian yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan pangan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya. Konsep ini menekankan keseimbangan antara aspek produktivitas, kelestarian lingkungan, dan kesejahteraan sosial ekonomi petani. Menurut Food and Agriculture Organization (FAO, 2018), pertanian berkelanjutan harus mampu menjaga kualitas sumber daya alam sekaligus meningkatkan efisiensi produksi. Pendekatan ini menjadi semakin relevan di tengah meningkatnya tekanan terhadap sumber daya lahan dan air akibat pertumbuhan populasi. Budidaya berkelanjutan juga mencerminkan integrasi antara ilmu pengetahuan, teknologi, dan kearifan lokal dalam praktik pertanian. Dengan demikian, konsep ini tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencakup dimensi sosial dan ekonomi yang luas.

Prinsip utama dalam budidaya tanaman pangan berkelanjutan meliputi efisiensi penggunaan sumber daya, konservasi lingkungan, dan peningkatan kesejahteraan petani. Efisiensi sumber daya ditunjukkan melalui penggunaan input produksi secara tepat guna, seperti pupuk, air, dan energi. Tilman et al. (2017) menjelaskan bahwa efisiensi input dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan tanpa menurunkan produktivitas. Konservasi lingkungan mencakup upaya menjaga kesuburan tanah, keanekaragaman hayati, dan kualitas air. Peningkatan kesejahteraan petani menjadi indikator

penting karena keberlanjutan tidak dapat tercapai tanpa dukungan aspek ekonomi yang memadai. Prinsip-prinsip ini saling terkait dan harus diterapkan secara terpadu dalam sistem budidaya.

Pendekatan keberlanjutan dalam pertanian sering dikaitkan dengan konsep triple bottom line yang mencakup aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial. Elkington (2018) menyatakan bahwa keberhasilan suatu sistem produksi tidak hanya diukur dari keuntungan ekonomi, tetapi juga dari dampaknya terhadap lingkungan dan masyarakat. Aspek ekonomi mencakup profitabilitas usaha tani dan stabilitas pendapatan petani. Aspek lingkungan berkaitan dengan pengelolaan sumber daya alam yang bijaksana. Aspek sosial meliputi keadilan akses terhadap sumber daya dan peningkatan kualitas hidup masyarakat pertanian. Integrasi ketiga aspek tersebut menjadi landasan dalam merancang sistem budidaya yang berkelanjutan. Pendekatan ini mendorong transformasi sistem pertanian menuju praktik yang lebih bertanggung jawab.

Keterkaitan antara budidaya tanaman pangan berkelanjutan dan ketahanan pangan global menjadi isu penting dalam pembangunan pertanian modern. Godfray et al. (2019) menekankan bahwa peningkatan produksi pangan harus dilakukan tanpa memperluas lahan secara signifikan. Intensifikasi berkelanjutan menjadi solusi untuk meningkatkan hasil produksi dengan tetap menjaga kelestarian lingkungan. Sistem budidaya yang berkelanjutan juga mampu meningkatkan resilien terhadap perubahan iklim dan gangguan lingkungan lainnya. Penerapan praktik pertanian yang adaptif dan inovatif menjadi kunci dalam menghadapi tantangan tersebut. Dengan demikian, keberlanjutan menjadi elemen penting dalam upaya mencapai ketahanan pangan jangka panjang.

Peran kebijakan dan regulasi sangat penting dalam mendukung implementasi budidaya tanaman pangan berkelanjutan. Pemerintah dan lembaga terkait memiliki tanggung jawab dalam menyediakan kerangka kebijakan yang mendorong praktik pertanian ramah lingkungan. Menurut Pretty et al. (2018), insentif ekonomi dan dukungan kelembagaan dapat

mempercepat adopsi teknologi berkelanjutan oleh petani. Regulasi yang tepat juga dapat mengendalikan penggunaan input kimia yang berlebihan. Selain itu, program penyuluhan dan pendidikan pertanian berperan dalam meningkatkan kapasitas petani. Dukungan kebijakan yang konsisten akan memperkuat sistem pertanian berkelanjutan secara nasional.

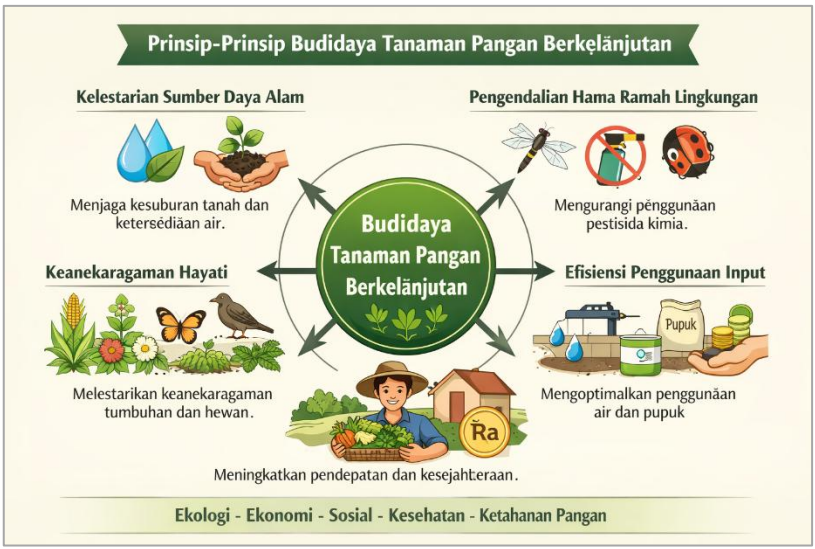
Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi memberikan kontribusi signifikan dalam mendukung budidaya tanaman pangan berkelanjutan. Teknologi modern memungkinkan pemantauan kondisi lahan dan tanaman secara lebih akurat. Menurut Zhang et al. (2021), penerapan teknologi berbasis data dapat meningkatkan efisiensi produksi sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Inovasi dalam bidang bioteknologi juga berperan dalam pengembangan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap cekaman lingkungan. Integrasi teknologi dengan praktik tradisional menciptakan sistem pertanian yang adaptif dan berkelanjutan. Oleh karena itu, pemanfaatan teknologi menjadi salah satu pilar penting dalam konsep budidaya berkelanjutan.

9.2 Pendekatan Agroekologi dalam Budidaya Tanaman Pangan

Pendekatan agroekologi merupakan salah satu landasan utama dalam pengembangan sistem budidaya tanaman pangan berkelanjutan. Agroekologi mengintegrasikan prinsip-prinsip ekologi ke dalam praktik pertanian untuk menciptakan sistem produksi yang seimbang dengan lingkungan. Altieri (2018) menjelaskan bahwa agroekologi menekankan hubungan antara tanaman, tanah, organisme hidup, dan lingkungan fisik. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada hasil produksi, tetapi juga pada stabilitas ekosistem pertanian. Agroekologi juga mengedepankan pemanfaatan sumber daya lokal secara optimal. Dengan demikian, sistem ini mampu meningkatkan keberlanjutan dalam jangka panjang.

Prinsip dasar agroekologi mencakup diversifikasi, efisiensi sumber daya, dan interaksi biologis yang saling menguntungkan. Diversifikasi tanaman menjadi strategi penting untuk

meningkatkan ketahanan sistem pertanian terhadap gangguan lingkungan. Gliessman (2015) menyatakan bahwa sistem pertanian yang beragam cenderung lebih stabil dibandingkan sistem monokultur. Efisiensi penggunaan sumber daya dapat dicapai melalui pemanfaatan siklus alami dalam ekosistem. Interaksi biologis antara tanaman dan organisme lain juga berperan dalam meningkatkan produktivitas. Prinsip-prinsip ini menjadi dasar dalam penerapan agroekologi di berbagai wilayah.



Gambar 9.1. Prinsip-Prinsip Budidaya Tanaman Pangan Berkelanjutan

Diversifikasi sistem tanam merupakan salah satu praktik utama dalam agroekologi yang banyak diterapkan pada budidaya tanaman pangan. Sistem tumpangsari dan rotasi tanaman menjadi contoh nyata dari diversifikasi tersebut. Menurut Lithourgidis et al. (2017), tumpangsari dapat meningkatkan efisiensi penggunaan lahan dan mengurangi risiko kegagalan panen. Rotasi tanaman juga membantu dalam memutus siklus hama dan penyakit. Keanekaragaman tanaman dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang bermanfaat. Praktik ini memberikan keuntungan baik secara ekologis

maupun ekonomis. Oleh karena itu, diversifikasi menjadi komponen penting dalam sistem agroekologi.

Peran biodiversitas dalam agroekologi sangat penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem pertanian. Biodiversitas mencakup keanekaragaman tanaman, hewan, dan mikroorganisme yang hidup dalam sistem pertanian. Menurut FAO (2019), peningkatan biodiversitas dapat memperkuat fungsi ekosistem seperti penyerbukan dan pengendalian hama alami. Keberadaan musuh alami dapat mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia. Selain itu, biodiversitas juga meningkatkan ketahanan sistem terhadap perubahan lingkungan. Sistem pertanian yang kaya biodiversitas cenderung lebih resilien. Hal ini menjadikan biodiversitas sebagai elemen kunci dalam agroekologi.

Pengelolaan tanah dalam pendekatan agroekologi menekankan pada peningkatan kesehatan tanah secara alami. Tanah yang sehat memiliki kandungan bahan organik yang tinggi dan aktivitas biologi yang baik. Lal (2020) menyebutkan bahwa peningkatan bahan organik tanah dapat memperbaiki struktur tanah dan kapasitas menahan air. Penggunaan pupuk organik dan kompos menjadi bagian penting dalam sistem ini. Pengolahan tanah minimum juga diterapkan untuk menjaga struktur tanah. Praktik ini membantu mengurangi degradasi tanah yang sering terjadi pada sistem konvensional. Dengan demikian, pengelolaan tanah agroekologis mendukung produktivitas jangka panjang.

Pengendalian hama dalam agroekologi dilakukan dengan pendekatan ekosistem yang memanfaatkan interaksi alami antarorganisme. Penggunaan pestisida kimia diminimalkan dan digantikan dengan metode biologis. Menurut Nicholls dan Altieri (2018), konservasi musuh alami merupakan strategi efektif dalam pengendalian hama. Tanaman refugia dapat digunakan untuk menarik predator alami hama. Pola tanam yang beragam juga dapat menghambat perkembangan populasi hama. Pendekatan ini tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga lebih berkelanjutan. Sistem ini memberikan alternatif yang lebih aman bagi kesehatan manusia dan lingkungan.

Agroekologi juga berperan dalam meningkatkan ketahanan pertanian terhadap perubahan iklim. Sistem yang beragam dan berbasis ekologi memiliki kemampuan adaptasi yang lebih tinggi terhadap kondisi ekstrem. IPCC (2022) menyatakan bahwa praktik agroekologi dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian. Penggunaan input eksternal yang lebih rendah turut menekan jejak karbon. Selain itu, peningkatan bahan organik tanah membantu dalam penyerapan karbon. Sistem agroekologi juga lebih tahan terhadap kekeringan dan banjir. Hal ini menjadikan agroekologi sebagai solusi strategis dalam menghadapi perubahan iklim.

Aspek sosial dalam agroekologi menekankan pada peran petani sebagai pelaku utama dalam sistem pertanian. Pengetahuan lokal dan kearifan tradisional menjadi bagian penting dalam pengembangan agroekologi. Wezel et al. (2020) menjelaskan bahwa agroekologi tidak hanya merupakan pendekatan teknis, tetapi juga gerakan sosial. Partisipasi petani dalam pengambilan keputusan menjadi faktor penting dalam keberhasilan implementasi. Sistem ini juga mendorong kemandirian petani dalam pengelolaan usaha tani. Penguatan kelembagaan petani turut mendukung keberlanjutan sistem. Dengan demikian, agroekologi memiliki dimensi sosial yang kuat.

Implementasi agroekologi dalam budidaya tanaman pangan menghadapi berbagai tantangan, termasuk keterbatasan pengetahuan dan akses teknologi. Beberapa petani masih bergantung pada sistem konvensional yang berbasis input kimia. Menurut Pretty et al. (2018), transisi menuju agroekologi memerlukan dukungan kebijakan dan penyuluhan yang intensif. Edukasi dan pelatihan menjadi kunci dalam meningkatkan pemahaman petani. Dukungan pasar untuk produk pertanian berkelanjutan juga sangat diperlukan. Kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan petani dapat mempercepat adopsi agroekologi. Upaya ini akan mendorong terciptanya sistem pertanian pangan yang lebih berkelanjutan.

9.3 Pengelolaan Sumber Daya Tanah Secara Berkelanjutan

Pengelolaan sumber daya tanah secara berkelanjutan merupakan aspek penting dalam mendukung sistem budidaya tanaman pangan yang produktif dan ramah lingkungan. Tanah berfungsi sebagai media tumbuh tanaman sekaligus penyedia unsur hara dan air yang dibutuhkan dalam proses pertumbuhan. Menurut Lal (2016), degradasi tanah akibat praktik pertanian intensif dapat menurunkan produktivitas secara signifikan. Pengelolaan tanah yang tidak tepat juga dapat menyebabkan erosi, penurunan kesuburan, dan kerusakan struktur tanah. Pendekatan berkelanjutan bertujuan untuk menjaga fungsi tanah dalam jangka panjang. Upaya ini dilakukan melalui kombinasi teknik konservasi dan pemanfaatan sumber daya secara bijaksana.

Konservasi tanah menjadi salah satu strategi utama dalam pengelolaan tanah berkelanjutan. Praktik konservasi dilakukan untuk mencegah kehilangan lapisan tanah atas yang kaya akan bahan organik. Pimentel dan Burgess (2018) menyatakan bahwa erosi tanah merupakan ancaman serius bagi ketahanan pangan global. Teknik konservasi seperti terasering, penanaman penutup tanah, dan pengolahan kontur dapat mengurangi laju erosi. Penutup tanah juga berfungsi melindungi permukaan tanah dari dampak langsung air hujan. Praktik ini membantu mempertahankan kelembapan tanah dan meningkatkan aktivitas biologis. Dengan demikian, konservasi tanah berperan penting dalam menjaga produktivitas lahan.

Kesehatan tanah merupakan indikator utama dalam sistem pengelolaan tanah berkelanjutan. Tanah yang sehat memiliki keseimbangan antara sifat fisik, kimia, dan biologi. Menurut Doran dan Zeiss (2015), kesehatan tanah mencerminkan kemampuan tanah dalam mendukung produktivitas tanaman tanpa merusak lingkungan. Kandungan bahan organik menjadi faktor kunci dalam menentukan kualitas tanah. Aktivitas mikroorganisme tanah juga berperan dalam siklus hara. Tanah yang sehat mampu meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk.

Oleh karena itu, pengelolaan kesehatan tanah menjadi prioritas dalam sistem budidaya berkelanjutan.

Penggunaan bahan organik menjadi salah satu pendekatan penting dalam meningkatkan kualitas tanah. Bahan organik seperti kompos, pupuk kandang, dan residu tanaman dapat meningkatkan kandungan karbon tanah. Menurut FAO (2017), peningkatan bahan organik dapat memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kapasitas menahan air. Penggunaan bahan organik juga dapat mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia. Mikroorganisme tanah akan lebih aktif dalam menguraikan bahan organik menjadi unsur hara yang tersedia bagi tanaman. Praktik ini mendukung siklus nutrisi yang lebih alami. Dengan demikian, penggunaan bahan organik menjadi bagian integral dalam pengelolaan tanah berkelanjutan.

Pengolahan tanah konservasi merupakan pendekatan yang bertujuan untuk meminimalkan gangguan terhadap struktur tanah. Sistem tanpa olah tanah atau olah tanah minimum banyak diterapkan dalam pertanian berkelanjutan. Hobbs et al. (2015) menjelaskan bahwa pengolahan tanah konservasi dapat meningkatkan kandungan karbon tanah dan mengurangi erosi. Praktik ini juga membantu mempertahankan kelembapan tanah. Selain itu, pengolahan tanah minimum dapat mengurangi biaya produksi. Penggunaan alat pertanian yang sesuai menjadi faktor penting dalam penerapan teknik ini. Pendekatan ini memberikan manfaat ekologis dan ekonomis bagi petani.

Pengelolaan unsur hara secara berkelanjutan juga menjadi bagian penting dalam pengelolaan tanah. Pemupukan yang tepat harus memperhatikan kebutuhan tanaman dan kondisi tanah. Menurut Zhang et al. (2019), pemupukan berimbang dapat meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi dan mengurangi pencemaran lingkungan. Penggunaan pupuk organik dan anorganik secara terpadu menjadi strategi yang efektif. Analisis tanah diperlukan untuk menentukan dosis pupuk yang tepat. Pengelolaan hara yang baik dapat meningkatkan hasil produksi secara optimal. Pendekatan ini mendukung keberlanjutan sistem pertanian.

Peran teknologi dalam pengelolaan tanah semakin berkembang seiring dengan kemajuan ilmu pengetahuan. Teknologi modern memungkinkan pemantauan kondisi tanah secara lebih akurat dan efisien. Precision agriculture menjadi salah satu inovasi yang mendukung pengelolaan tanah berkelanjutan. Menurut Gebbers dan Adamchuk (2017), teknologi ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan input pertanian. Sensor tanah dan sistem informasi geografis membantu dalam pengambilan keputusan yang tepat. Teknologi ini juga memungkinkan pengelolaan lahan secara spesifik lokasi. Dengan demikian, teknologi berperan penting dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan tanah.

Tantangan dalam pengelolaan tanah berkelanjutan masih cukup besar, terutama terkait dengan keterbatasan pengetahuan dan akses terhadap teknologi. Banyak petani yang masih menggunakan praktik konvensional yang kurang ramah lingkungan. Menurut Pretty et al. (2018), perubahan perilaku petani memerlukan dukungan kebijakan dan penyuluhan yang berkelanjutan. Keterbatasan sumber daya ekonomi juga menjadi hambatan dalam penerapan teknologi baru. Edukasi dan pelatihan menjadi langkah penting dalam meningkatkan kapasitas petani. Dukungan dari berbagai pihak diperlukan untuk mendorong adopsi praktik berkelanjutan. Upaya ini akan memperkuat sistem pertanian yang lebih resilien dan produktif.

9.4 Efisiensi Penggunaan Air dan Energi dalam Sistem Budidaya

Efisiensi penggunaan air dan energi merupakan komponen penting dalam sistem budidaya tanaman pangan berkelanjutan. Air dan energi menjadi faktor produksi utama yang sangat menentukan keberhasilan usaha tani. Menurut FAO (2020), sektor pertanian merupakan pengguna air terbesar secara global, sehingga efisiensi penggunaannya menjadi prioritas. Penggunaan air yang tidak efisien dapat menyebabkan pemborosan dan degradasi sumber daya air. Energi juga berperan dalam berbagai kegiatan pertanian seperti pengolahan tanah dan irigasi. Pendekatan efisiensi bertujuan untuk meningkatkan

produktivitas dengan penggunaan input yang minimal. Dengan demikian, efisiensi menjadi kunci dalam keberlanjutan sistem pertanian.

Pengelolaan air yang efisien dapat meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus mengurangi tekanan terhadap sumber daya air. Konsep *water use efficiency* (WUE) menjadi indikator penting dalam sistem pertanian modern. Menurut Molden et al. (2017), peningkatan efisiensi penggunaan air dapat dilakukan melalui teknologi irigasi yang tepat. Sistem irigasi yang efisien mampu mengurangi kehilangan air akibat evaporasi dan perkolasi. Penggunaan air yang tepat waktu dan jumlah juga sangat penting. Pendekatan ini membantu meningkatkan hasil panen tanpa meningkatkan konsumsi air. Oleh karena itu, efisiensi air menjadi fokus utama dalam budidaya berkelanjutan.

Teknologi irigasi modern menjadi solusi dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air di sektor pertanian. Sistem irigasi tetes dan sprinkler banyak digunakan karena mampu mendistribusikan air secara merata. Menurut Fereres dan Soriano (2017), irigasi tetes dapat meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga lebih dari 90%. Teknologi ini memungkinkan pemberian air secara langsung ke zona perakaran tanaman. Kehilangan air akibat limpasan dapat diminimalkan. Penggunaan teknologi ini juga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk melalui fertigation. Dengan demikian, teknologi irigasi modern mendukung produktivitas dan keberlanjutan.

Praktik irigasi hemat air juga dapat diterapkan pada budidaya tanaman pangan seperti padi. Sistem *alternate wetting and drying* (AWD) menjadi salah satu metode yang efektif dalam mengurangi penggunaan air. Menurut Bouman et al. (2015), metode AWD dapat menghemat penggunaan air hingga 30% tanpa menurunkan hasil panen. Teknik ini dilakukan dengan mengatur periode penggenangan dan pengeringan lahan. Praktik ini juga dapat mengurangi emisi gas metana dari lahan sawah. Pengelolaan air yang tepat sangat penting dalam penerapan metode ini. Oleh karena itu, AWD menjadi salah satu inovasi dalam budidaya padi berkelanjutan.

Efisiensi energi dalam budidaya tanaman pangan juga menjadi perhatian penting dalam sistem pertanian modern. Energi digunakan dalam berbagai kegiatan seperti penggunaan alat mesin pertanian dan pemompaan air. Menurut Pimentel (2015), penggunaan energi yang berlebihan dapat meningkatkan biaya produksi dan emisi gas rumah kaca. Penggunaan energi yang efisien dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan keuntungan petani. Pemilihan teknologi yang hemat energi menjadi langkah strategis. Selain itu, efisiensi energi juga berkaitan dengan penggunaan bahan bakar yang ramah lingkungan. Dengan demikian, efisiensi energi mendukung sistem pertanian yang lebih berkelanjutan.

Pemanfaatan energi terbarukan dalam sektor pertanian menjadi salah satu solusi dalam meningkatkan efisiensi energi. Energi surya dan biomassa banyak dikembangkan untuk mendukung kegiatan pertanian. Menurut IRENA (2019), penggunaan energi surya untuk pompa air dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Teknologi ini juga lebih ramah lingkungan dan ekonomis dalam jangka panjang. Biomassa dari limbah pertanian dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif. Penggunaan energi terbarukan juga mendukung pengurangan emisi karbon. Oleh karena itu, integrasi energi terbarukan menjadi bagian penting dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Integrasi manajemen air dan energi menjadi pendekatan yang efektif dalam meningkatkan efisiensi sistem budidaya. Penggunaan teknologi berbasis data memungkinkan pengelolaan air dan energi secara lebih optimal. Menurut Smith et al. (2018), sistem irigasi cerdas dapat mengatur penggunaan air berdasarkan kebutuhan tanaman. Teknologi sensor dan *Internet of Things* (IoT) dapat membantu dalam pemantauan kondisi lahan secara real-time. Pendekatan ini dapat mengurangi pemborosan input. Selain itu, sistem ini juga meningkatkan produktivitas tanaman. Integrasi ini menjadi inovasi penting dalam pertanian modern.



Gambar 9.2. Pengelolaan Tanah, Air, dan Energi Secara Berkelanjutan dalam Sistem Budidaya Tanaman Pangan

Perubahan iklim menjadi tantangan besar dalam pengelolaan air dan energi di sektor pertanian. Variabilitas curah hujan dan peningkatan suhu dapat mempengaruhi ketersediaan air. IPCC (2022) menyatakan bahwa sektor pertanian perlu beradaptasi terhadap perubahan iklim melalui peningkatan efisiensi sumber daya. Pengelolaan air yang adaptif menjadi sangat penting dalam kondisi iklim yang tidak menentu. Efisiensi energi juga berperan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca. Sistem pertanian yang efisien akan lebih resilien terhadap perubahan lingkungan. Oleh karena itu, adaptasi menjadi bagian penting dalam strategi keberlanjutan.

Tantangan dalam penerapan efisiensi air dan energi meliputi keterbatasan akses teknologi dan rendahnya kapasitas petani. Banyak petani masih menggunakan metode tradisional yang kurang efisien. Menurut Pretty et al. (2018), adopsi teknologi memerlukan dukungan kebijakan dan penyuluhan yang intensif. Investasi awal yang tinggi juga menjadi hambatan dalam penerapan teknologi modern. Edukasi dan pelatihan

sangat diperlukan untuk meningkatkan pemahaman petani. Dukungan pemerintah dan sektor swasta dapat mempercepat adopsi inovasi. Upaya ini akan mendukung terciptanya sistem budidaya tanaman pangan yang berkelanjutan.

9.5 Pengelolaan Hama dan Penyakit Ramah Lingkungan

Pengelolaan hama dan penyakit ramah lingkungan merupakan bagian penting dalam sistem budidaya tanaman pangan berkelanjutan. Pendekatan ini bertujuan untuk mengendalikan organisme pengganggu tanaman tanpa merusak keseimbangan ekosistem. Menurut FAO (2018), penggunaan pestisida kimia secara berlebihan dapat menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Pengendalian yang tidak bijaksana juga dapat menyebabkan resistensi hama. Pendekatan ramah lingkungan mengutamakan metode alami dan penggunaan input yang minimal. Dengan demikian, sistem ini mendukung keberlanjutan pertanian dalam jangka panjang.

Konsep pengendalian hama terpadu atau *Integrated Pest Management* (IPM) menjadi dasar dalam pengelolaan hama berkelanjutan. IPM mengombinasikan berbagai teknik pengendalian untuk menjaga populasi hama di bawah ambang ekonomi. Menurut Kogan (2019), IPM menekankan penggunaan metode biologis, mekanis, dan kultur teknis sebelum penggunaan pestisida kimia. Pendekatan ini juga memperhatikan dinamika ekosistem pertanian. Pengambilan keputusan dalam IPM didasarkan pada pemantauan lapangan secara berkala. Strategi ini mampu mengurangi ketergantungan terhadap pestisida sintetis. Oleh karena itu, IPM menjadi pendekatan utama dalam pengelolaan hama modern.

Pengendalian hayati merupakan salah satu metode penting dalam sistem pengelolaan hama ramah lingkungan. Metode ini memanfaatkan musuh alami seperti predator, parasitoid, dan patogen untuk mengendalikan hama. Menurut van Lenteren et al. (2018), penggunaan agen hayati dapat menekan populasi hama secara efektif dan berkelanjutan. Introduksi musuh alami harus

dilakukan dengan mempertimbangkan keseimbangan ekosistem. Habitat yang mendukung keberadaan musuh alami juga perlu dipertahankan. Tanaman refugia dapat meningkatkan keberagaman organisme menguntungkan. Dengan demikian, pengendalian hayati menjadi solusi yang aman dan efektif.

Penggunaan pestisida nabati dan biopestisida menjadi alternatif dalam mengurangi dampak negatif pestisida kimia. Pestisida nabati berasal dari bahan alami seperti tumbuhan yang memiliki sifat insektisida atau fungisida. Menurut Isman (2017), pestisida nabati memiliki tingkat toksisitas yang lebih rendah terhadap lingkungan. Biopestisida juga memiliki spesifisitas yang tinggi terhadap organisme target. Penggunaan bahan alami ini dapat mengurangi residu kimia pada hasil pertanian. Aplikasi yang tepat sangat penting untuk mencapai efektivitas yang optimal. Pendekatan ini mendukung sistem pertanian yang lebih sehat dan aman.

Teknik kultur teknis juga berperan penting dalam pengelolaan hama dan penyakit secara ramah lingkungan. Praktik seperti rotasi tanaman, penggunaan varietas tahan, dan pengaturan waktu tanam dapat mengurangi serangan hama. Menurut Nicholls dan Altieri (2018), diversifikasi tanaman dapat mengganggu siklus hidup hama. Sanitasi lahan juga membantu mengurangi sumber inokulum penyakit. Pengelolaan lingkungan tumbuh yang baik dapat meningkatkan ketahanan tanaman. Pendekatan ini bersifat preventif dan mudah diterapkan oleh petani. Oleh karena itu, teknik kultur teknis menjadi bagian penting dalam strategi pengendalian.

Tantangan dalam penerapan pengelolaan hama ramah lingkungan meliputi keterbatasan pengetahuan dan akses terhadap teknologi. Banyak petani masih bergantung pada pestisida kimia karena dianggap lebih praktis. Menurut Pretty et al. (2018), perubahan menuju sistem ramah lingkungan memerlukan dukungan edukasi dan kebijakan. Penyuluhan pertanian menjadi sarana penting dalam meningkatkan pemahaman petani. Dukungan pasar terhadap produk ramah lingkungan juga perlu diperkuat. Kolaborasi antara berbagai pihak sangat diperlukan dalam mendorong adopsi praktik ini.

Upaya tersebut akan mendukung keberlanjutan sistem budidaya tanaman pangan.

9.6 Inovasi Teknologi untuk Pertanian Berkelanjutan

Inovasi teknologi memegang peranan penting dalam mendukung budidaya tanaman pangan berkelanjutan. Perkembangan teknologi memungkinkan peningkatan efisiensi produksi sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Menurut Zhang et al. (2021), teknologi pertanian modern dapat meningkatkan produktivitas melalui pemanfaatan data dan otomatisasi. Inovasi ini mencakup berbagai aspek mulai dari pengolahan lahan hingga panen. Teknologi juga membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih tepat dan berbasis informasi. Penerapan teknologi yang tepat dapat meningkatkan daya saing sektor pertanian. Dengan demikian, inovasi teknologi menjadi pilar penting dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Pertanian presisi merupakan salah satu inovasi yang banyak dikembangkan dalam sistem pertanian modern. Pendekatan ini menggunakan teknologi untuk mengelola variabilitas lahan secara spesifik lokasi. Menurut Gebbers dan Adamchuk (2017), pertanian presisi dapat meningkatkan efisiensi penggunaan input seperti air, pupuk, dan pestisida. Teknologi ini memanfaatkan sensor, GPS, dan sistem informasi geografis. Data yang diperoleh digunakan untuk menentukan kebutuhan tanaman secara akurat. Pendekatan ini mampu mengurangi pemborosan input dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, pertanian presisi menjadi solusi dalam meningkatkan efisiensi produksi.

Pemanfaatan teknologi digital dan *Internet of Things* (IoT) semakin berkembang dalam sektor pertanian. Teknologi ini memungkinkan pemantauan kondisi tanaman dan lingkungan secara real-time. Menurut Wolfert et al. (2017), IoT dapat meningkatkan efisiensi manajemen pertanian melalui pengumpulan dan analisis data. Sensor tanah dan cuaca membantu petani dalam menentukan waktu tanam dan irigasi. Sistem ini juga dapat memberikan peringatan dini terhadap serangan hama dan penyakit. Penggunaan teknologi digital

meningkatkan akurasi dalam pengambilan keputusan. Dengan demikian, digitalisasi pertanian mendukung keberlanjutan sistem budidaya.



Gambar 9.3. Inovasi Teknologi untuk Pertanian Berkelanjutan

Bioteknologi menjadi inovasi penting dalam pengembangan tanaman pangan yang lebih adaptif terhadap lingkungan. Teknologi ini digunakan untuk menghasilkan varietas unggul yang tahan terhadap cekaman biotik dan abiotik. Menurut Qaim (2020), tanaman hasil bioteknologi dapat meningkatkan produktivitas dan ketahanan terhadap perubahan iklim. Pengembangan varietas tahan hama dan kekeringan menjadi fokus utama. Teknologi ini juga dapat meningkatkan efisiensi penggunaan input pertanian. Penggunaan bioteknologi harus memperhatikan aspek keamanan dan regulasi. Dengan

demikian, bioteknologi berkontribusi dalam mendukung pertanian berkelanjutan.

Mekanisasi pertanian juga merupakan bagian dari inovasi teknologi yang mendukung efisiensi produksi. Penggunaan alat dan mesin pertanian dapat meningkatkan produktivitas tenaga kerja. Menurut FAO (2019), mekanisasi yang tepat dapat mengurangi kehilangan hasil dan meningkatkan efisiensi operasional. Mesin pertanian modern dirancang untuk menghemat energi dan waktu. Mekanisasi juga membantu dalam pengolahan lahan yang lebih efisien. Pemilihan teknologi harus disesuaikan dengan kondisi lahan dan kebutuhan petani. Dengan demikian, mekanisasi berperan dalam meningkatkan efektivitas sistem budidaya.

Sistem informasi pertanian menjadi salah satu inovasi yang mendukung pengelolaan usaha tani secara berkelanjutan. Teknologi ini menyediakan informasi terkait cuaca, harga pasar, dan praktik budidaya. Menurut FAO (2018), akses terhadap informasi yang akurat dapat meningkatkan kemampuan petani dalam mengambil keputusan. Platform digital memungkinkan penyebaran informasi secara cepat dan luas. Petani dapat memanfaatkan aplikasi pertanian untuk meningkatkan efisiensi usaha tani. Sistem ini juga mendukung transparansi dalam rantai pasok pertanian. Oleh karena itu, sistem informasi menjadi komponen penting dalam pertanian modern.

Pengembangan teknologi ramah lingkungan menjadi fokus utama dalam inovasi pertanian berkelanjutan. Teknologi ini dirancang untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Menurut Pretty et al. (2018), inovasi yang berkelanjutan harus mempertimbangkan efisiensi sumber daya dan konservasi lingkungan. Penggunaan energi terbarukan dan teknologi hemat air menjadi contoh penerapan teknologi ramah lingkungan. Teknologi ini juga mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca. Integrasi teknologi dengan prinsip keberlanjutan menjadi kunci dalam sistem pertanian modern. Dengan demikian, inovasi teknologi harus selaras dengan tujuan keberlanjutan.

Tantangan dalam penerapan inovasi teknologi di sektor pertanian meliputi keterbatasan akses dan kapasitas petani. Banyak petani kecil yang belum mampu mengadopsi teknologi modern secara optimal. Menurut World Bank (2020), kesenjangan teknologi menjadi hambatan dalam peningkatan produktivitas pertanian. Biaya investasi yang tinggi juga menjadi faktor pembatas dalam adopsi teknologi. Dukungan kebijakan dan pembiayaan sangat diperlukan untuk mengatasi hambatan tersebut. Program pelatihan dan penyuluhan dapat meningkatkan kapasitas petani. Upaya ini akan mempercepat transformasi menuju pertanian yang lebih berkelanjutan.

9.7 Aspek Sosial dan Ekonomi dalam Budidaya Berkelanjutan

Aspek sosial dan ekonomi memiliki peran penting dalam keberhasilan penerapan budidaya tanaman pangan berkelanjutan. Sistem pertanian tidak hanya ditentukan oleh faktor teknis, tetapi juga oleh kondisi sosial dan ekonomi petani. Menurut FAO (2018), keberlanjutan pertanian harus mampu meningkatkan kesejahteraan petani dan masyarakat pedesaan. Kesejahteraan ini mencakup pendapatan yang layak, akses terhadap sumber daya, dan stabilitas usaha tani. Ketimpangan sosial dapat menjadi hambatan dalam penerapan praktik berkelanjutan. Oleh karena itu, pendekatan sosial ekonomi menjadi bagian integral dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Kesejahteraan petani merupakan indikator utama dalam menilai keberlanjutan sistem budidaya tanaman pangan. Pendapatan yang stabil dan mencukupi menjadi faktor penting dalam mendorong adopsi teknologi berkelanjutan. Menurut World Bank (2020), petani dengan akses ekonomi yang baik cenderung lebih mudah mengadopsi inovasi pertanian. Risiko usaha tani yang tinggi sering menjadi penghambat dalam penerapan praktik baru. Sistem pertanian berkelanjutan harus mampu memberikan keuntungan ekonomi yang kompetitif. Dukungan terhadap akses pembiayaan juga menjadi faktor penting. Dengan demikian, aspek ekonomi menjadi pendorong utama keberlanjutan.

Akses terhadap pasar merupakan faktor penting dalam mendukung keberlanjutan budidaya tanaman pangan. Petani membutuhkan jaminan pasar untuk hasil produksi yang dihasilkan. Menurut Barrett et al. (2019), keterhubungan dengan pasar dapat meningkatkan pendapatan dan efisiensi usaha tani. Rantai pasok yang efisien juga membantu mengurangi kehilangan hasil. Produk pertanian berkelanjutan memiliki nilai tambah yang dapat meningkatkan daya saing. Sertifikasi produk ramah lingkungan juga dapat membuka akses pasar yang lebih luas. Oleh karena itu, penguatan akses pasar menjadi strategi penting dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Peran kelembagaan petani sangat penting dalam mendukung implementasi budidaya berkelanjutan. Kelompok tani dan koperasi dapat menjadi wadah dalam meningkatkan kapasitas petani. Menurut Pretty et al. (2018), kelembagaan yang kuat dapat mempercepat adopsi inovasi pertanian. Kelembagaan juga membantu dalam akses terhadap informasi, teknologi, dan pembiayaan. Kerja sama antarpetani dapat meningkatkan efisiensi produksi dan pemasaran. Penguatan kelembagaan menjadi faktor penting dalam meningkatkan daya tawar petani. Dengan demikian, kelembagaan berperan dalam mendukung keberlanjutan sistem pertanian.

Aspek sosial dalam pertanian berkelanjutan juga mencakup partisipasi masyarakat dan keadilan akses terhadap sumber daya. Partisipasi petani dalam pengambilan keputusan menjadi faktor penting dalam keberhasilan program pertanian. Menurut Wezel et al. (2020), pendekatan partisipatif dapat meningkatkan keberhasilan implementasi agroekologi. Keadilan dalam distribusi sumber daya seperti lahan dan air juga harus diperhatikan. Pemberdayaan kelompok rentan seperti petani kecil dan perempuan menjadi bagian penting dalam pembangunan pertanian. Pendekatan sosial yang inklusif akan memperkuat sistem pertanian berkelanjutan. Oleh karena itu, dimensi sosial harus menjadi perhatian utama.

Tantangan dalam aspek sosial dan ekonomi meliputi keterbatasan akses sumber daya, rendahnya pendidikan petani, dan fluktuasi harga pasar. Banyak petani masih menghadapi

kesulitan dalam memperoleh modal dan teknologi. Menurut IFAD (2019), peningkatan kapasitas petani menjadi kunci dalam menghadapi tantangan tersebut. Kebijakan pemerintah yang mendukung sangat diperlukan untuk menciptakan lingkungan yang kondusif. Program pelatihan dan penyuluhan dapat meningkatkan kemampuan petani. Kolaborasi antara berbagai pihak juga penting dalam mengatasi hambatan yang ada. Upaya ini akan mendorong terciptanya sistem budidaya tanaman pangan yang berkelanjutan dan inklusif.

9.8 Indikator, Evaluasi, dan Implementasi Sistem Pertanian Berkelanjutan

Penilaian keberlanjutan dalam budidaya tanaman pangan memerlukan indikator yang jelas dan terukur. Indikator keberlanjutan digunakan untuk mengevaluasi kinerja sistem pertanian dari aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial. Menurut FAO (2017), indikator tersebut harus mampu mencerminkan kondisi nyata di lapangan. Aspek lingkungan mencakup kualitas tanah, penggunaan air, dan keanekaragaman hayati. Aspek ekonomi meliputi produktivitas dan pendapatan petani. Aspek sosial mencakup kesejahteraan dan partisipasi masyarakat. Dengan demikian, indikator keberlanjutan menjadi alat penting dalam evaluasi sistem pertanian.

Pengukuran keberlanjutan dapat dilakukan dengan berbagai pendekatan ilmiah yang terintegrasi. Salah satu metode yang banyak digunakan adalah *Life Cycle Assessment* (LCA). Menurut Notarnicola et al. (2017), LCA digunakan untuk menilai dampak lingkungan dari seluruh siklus produksi pertanian. Pendekatan ini mencakup tahap produksi, distribusi, hingga konsumsi. Analisis ini membantu dalam mengidentifikasi sumber dampak lingkungan terbesar. Hasil evaluasi dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi sistem produksi. Dengan demikian, metode ini memberikan dasar ilmiah dalam pengambilan keputusan.

Evaluasi keberlanjutan juga dapat dilakukan melalui pendekatan indikator komposit yang menggabungkan berbagai parameter. Indikator ini memberikan gambaran menyeluruh

tentang kondisi sistem pertanian. Menurut Pretty et al. (2018), penggunaan indikator komposit memudahkan dalam membandingkan kinerja antar sistem pertanian. Penilaian ini dapat digunakan sebagai dasar dalam perumusan kebijakan. Penggunaan indikator harus disesuaikan dengan kondisi lokal. Data yang akurat menjadi kunci dalam proses evaluasi. Pendekatan ini membantu dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan pertanian.

Implementasi sistem pertanian berkelanjutan memerlukan strategi yang terencana dan terintegrasi. Penerapan praktik berkelanjutan harus disesuaikan dengan kondisi agroekosistem setempat. Menurut IPCC (2022), pendekatan berbasis lokasi sangat penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim. Dukungan teknologi dan inovasi menjadi faktor penting dalam implementasi. Keterlibatan petani dalam proses perencanaan juga sangat diperlukan. Pendekatan partisipatif dapat meningkatkan keberhasilan implementasi. Dengan demikian, strategi implementasi harus bersifat adaptif dan inklusif.

Peran kebijakan dan kelembagaan sangat penting dalam mendukung implementasi pertanian berkelanjutan. Kebijakan yang mendukung dapat mendorong adopsi praktik ramah lingkungan oleh petani. Menurut World Bank (2020), insentif ekonomi dan regulasi yang tepat dapat mempercepat transformasi sistem pertanian. Kelembagaan yang kuat juga membantu dalam penyebaran inovasi dan teknologi. Program penyuluhan menjadi sarana penting dalam meningkatkan kapasitas petani. Sinergi antara pemerintah, akademisi, dan sektor swasta sangat diperlukan. Dukungan ini akan memperkuat sistem pertanian berkelanjutan.

Tantangan dalam evaluasi dan implementasi keberlanjutan meliputi keterbatasan data, kapasitas sumber daya manusia, dan akses teknologi. Banyak sistem pertanian yang belum memiliki data yang memadai untuk evaluasi. Menurut IFAD (2019), peningkatan kapasitas petani dan penyuluh menjadi kunci dalam mengatasi tantangan tersebut. Keterbatasan infrastruktur juga menjadi hambatan dalam implementasi teknologi. Edukasi dan pelatihan perlu ditingkatkan secara berkelanjutan. Kolaborasi

lintas sektor dapat mempercepat adopsi sistem berkelanjutan. Upaya ini akan mendukung terciptanya sistem budidaya tanaman pangan yang tangguh dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Altieri, M. A. (2018). Agroecology: The science of sustainable agriculture. CRC Press.

Badan Pusat Statistik. (2023). *Statistik pertanian Indonesia 2023*. BPS RI.

Balai Penelitian Tanah. (2018). *Petunjuk teknis pengelolaan tanah berkelanjutan*. Kementerian Pertanian RI.

Barrett, C. B., Reardon, T., & Swinnen, J. (2019). Agri-food value chain revolutions in low- and middle-income countries. *Journal of Economic Literature, 57*(4), 1–47.

Bouman, B. A. M., Lampayan, R. M., & Tuong, T. P. (2015). Water management in irrigated rice: Coping with water scarcity. *International Rice Research Institute*.

Direktorat Jenderal Tanaman Pangan. (2020). *Pedoman budidaya tanaman pangan berkelanjutan*. Kementerian Pertanian RI.

Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2015). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology, 15*(1), 3–11.

Elkington, J. (2018). 25 years ago I coined the phrase "triple bottom line." Here's why it's time to rethink it. *Harvard Business Review*.

FAO. (2017). *Voluntary guidelines for sustainable soil management*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2018). *The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2019). *The state of the world's biodiversity for food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2020). *Water use in agriculture and food security*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Fereres, E., & Soriano, M. A. (2017). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany, 58*(2), 147–159.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2017). Precision agriculture and food security. *Science, 327*(5967), 828–831.

Gliessman, S. R. (2015). Agroecology: The ecology of sustainable food systems (3rd ed.). CRC Press.

Godfray, H. C. J., Beddington, J. R., Crute, I. R., Haddad, L., Lawrence, D., Muir, J. F., & Toulmin, C. (2019). Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science, 327*(5967), 812–818.

Hidayat, A., & Mulyani, A. (2016). Pengelolaan lahan kering untuk pertanian berkelanjutan. *Jurnal Sumberdaya Lahan, 10*(2), 75–88.

Hobbs, P. R., Sayre, K., & Gupta, R. (2015). The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B, 363*(1491), 543–555.

IFAD. (2019). *Rural development report 2019: Creating opportunities for rural youth*. International Fund for Agricultural Development.

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Cambridge University Press.

IRENA. (2019). *Renewable energy in agriculture: A pathway to sustainability*. International Renewable Energy Agency.

Isman, M. B. (2017). Botanical insecticides in the twenty-first century. *Annual Review of Entomology, 62*, 45–63.

Kementerian Pertanian RI. (2021). *Strategi pembangunan pertanian berkelanjutan 2020–2024*. Kementan RI.

Kogan, M. (2019). Integrated pest management: Historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology, 43*, 243–270.

Lal, R. (2016). Soil health and carbon management. *Food and Energy Security, 5*(4), 212–222.

Lal, R. (2020). Soil organic matter and water retention. *Agronomy Journal, 112*(5), 3265–3277.

Lithourgidis, A. S., Dordas, C. A., Damalas, C. A., & Vlachostergios, D. N. (2017). Annual intercrops: An alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science, 5*(4), 396–410.

Molden, D., Oweis, T., Pasquale, S., Kijne, J., Hanjra, M. A., Bindraban, P., & Cook, S. (2017). Improving agricultural water productivity. *International Journal of Water Resources Development, 26*(4), 555–574.

Mulyani, A., & Sarwani, M. (2017). Karakteristik dan potensi lahan pertanian di Indonesia. *Jurnal Litbang Pertanian, 36*(1), 1–10.

Nicholls, C. I., & Altieri, M. A. (2018). Pathways for the amplification of agroecology. *Agroecology and Sustainable Food Systems, 42*(10), 1170–1193.

Notarnicola, B., Sala, S., Anton, A., McLaren, S. J., Saouter, E., & Sonesson, U. (2017). The role of life cycle assessment in supporting sustainable agri-food systems. *Journal of Cleaner Production, 140*, 399–409.

Nugroho, A., & Suryanto, A. (2019). Penerapan pertanian berkelanjutan pada sistem budidaya tanaman pangan. *Jurnal Agronomi Indonesia, 47*(3), 256–264.

Pimentel, D. (2015). Environmental and economic costs of soil erosion. *Science of the Total Environment, 267*(1–3), 111–119.

Pimentel, D., & Burgess, M. (2018). Soil erosion threatens food production. *Agriculture, 3*(3), 443–463.

Prasetyo, B. H., & Suriadikarta, D. A. (2016). Pengelolaan tanah untuk meningkatkan produktivitas lahan. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian, 35*(2), 45–54.

Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V., Flora, C. B., Godfray, H. C. J., & Wratten, S. (2018). Global assessment of agricultural system redesign. *Nature Sustainability, 1*(8), 441–446.

Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan. (2020). *Inovasi teknologi budidaya tanaman pangan*. Kementerian Pertanian RI.

Qaim, M. (2020). Role of biotechnology in sustainable agriculture. *Global Food Security, 25*, 100–107.

Rachman, A., & Dariah, A. (2015). Konservasi tanah dan air dalam pertanian berkelanjutan. *Jurnal Sumberdaya Lahan, 9*(2), 61–70.

Smith, P., Soussana, J. F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. P., & McNeill, S. (2018). How to measure, report and verify soil carbon change. *Global Change Biology, 26*(1), 219–241.

Sutanto, R. (2019). *Pertanian organik: Menuju pertanian berkelanjutan*. Kanisius.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2017). Global food demand and sustainable intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 108*(50), 20260–20264.

Utomo, W. H. (2016). *Konservasi tanah di Indonesia*. Rajawali Press.

van Lenteren, J. C., Bolckmans, K., Köhl, J., Ravensberg, W. J., & Urbaneja, A. (2018). Biological control using invertebrates and microorganisms. *Biological Control, 63*(1), 39–59. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2012.01.001

Wezel, A., Herren, B., Kerr, R. B., Barrios, E., Rodrigues Gonçalves, A. L., & Sinclair, F. (2020). Agroecological principles and elements. *Agronomy for Sustainable Development, 40*(6), 1–13.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming. *Agricultural Systems, 153*, 69–80.

World Bank. (2020). *Agriculture and food global practice report*. World Bank Publications.

Yuliani, N., & Sudaryono. (2021). Efisiensi penggunaan air pada budidaya padi. *Jurnal Irigasi, 16*(1), 23–34.

Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2021). Precision agriculture technology for sustainable farming. *Computers and Electronics in Agriculture, 36*(2–3), 113–132.

BAB 10
PENGEMBANGAN VARIETAS TANAMAN PANGAN UNGGUL

10.1 Pengantar dan Urgensi Varietas Unggul

Varietas unggul merupakan suatu kelompok tanaman yang memiliki sifat genetik superior hasil proses pemuliaan tanaman dan telah melalui serangkaian pengujian pada berbagai kondisi lingkungan sebelum dilepas secara resmi oleh pemerintah untuk dibudidayakan. Konsep unggul pada suatu varietas tidak hanya mengacu pada tingginya produktivitas, melainkan mencakup kemampuan varietas tanaman pangan dalam mempertahankan hasilnya secara stabil pada berbagai kondisi lingkungan seperti tahan terhadap adanya cekaman biotik (hama dan penyakit), toleran terhadap cekaman abiotik (kekeringan, salinitas, rendaman air), serta efisien dalam memanfaatkan sumber daya (Rostini et al., 2018).

Berbeda dengan varietas lokal yang berkembang secara alami melalui adaptasi jangka penjang, varietas unggul sengaja dirakit melalui kegiatan pemuliaan tanaman. Pengembangan varietas unggul didasarkan pada prinsip-prinsip genetika dari tanaman. Pemulia tanaman berupaya untuk menggabungkan sifat-sifat yang diinginkan dalam satu genotipe sehingga tanaman hasil yang didapatkan memiliki performa yang lebih baik dibandingkan dengan varietas tanaman yang sudah ada (Mayasari & Alimuddin, 2020).

Varietas unggul umumnya memiliki berbagai karakter yang menguntungkan seperti produktivitas tinggi, umur genjah, serta kemampuan beradaptasi terhadap cekaman (Kustiani et al., 2019). Karakter umur genjah pada tanaman memungkinkan peningkatan indeks pertanaman dari yang semula hanya satu atau dua kali tanam dalam setahun, menjadi tiga atau empat kali tanam tergantung pada ketersediaan air dan kondisi agroekosistem (Aristya & Mada, 2019). Selain itu, tanaman pangan varietas unggul lebih responsif terhadap

pemupukan (Nasir et al., 2023). Karakter batang yang kuat dan tahan rebah memungkinkan tanaman memanfaatkan unsur hara dengan lebih efisien tanpa menimbulkan kerusakan fisik. Karakter-karakter ini menjadikan pemanfaatan sarana produksi pertanian yang lebih efisien dalam meningkatkan *output* panen yang berdampak pada penurunan impor serta memperkuat stabilitas pangan dari hulu ke hilir.

Peningkatan produktivitas yang dihasilkan oleh varietas unggul didasarkan pada faktor genetik pada tanaman. Keberhasilan varietas unggul untuk dapat menghasilkan produktivitas panen yang lebih tinggi sangat berkaitan dengan potensi genetik yang dimilikinya. Kemampuan produksi setiap tanaman ditentukan oleh susunan genetik atau DNAnya. Kemampuan maksimum ini disebut sebagai potensi genetik. Pemulia tanaman berupaya untuk meningkatkan potensi tersebut sehingga tanaman yang dihasilkan lebih baik dan sesuai dengan kebutuhan petani. Potensi tanaman yang unggul pada tanaman dapat dilihat dari bagaimana tanaman tersebut mengonversi energi matahari, air, dan unsur hara menjadi biji atau buah secara maksimal (Aznur & Purnamawati, 2017). Peningkatan populasi manusia yang sangat besar menjadikan pemanfaatan potensi genetik menjadi satu-satunya cara yang paling rasional untuk menyediakan kebutuhan pangan yang cukup di masa mendatang.

Dalam membuat varietas yang unggul terutama terhadap tanaman pangan utama seperti padi, jagung, dan kedelai, pemulia tanaman berfokus pada empat parameter arsitektur dan fisiologis sebagai berikut:

1. **Potensi hasil yang tinggi**

   Parameter ini diukur melalui peningkatan *harvest index* (indeks panen), yaitu perbandingan antara bobot ekonomis bji kering dibandingkan dengan total biomassa tanaman. Pemulia tanaman berfokus untuk memaksimalkan translokasi asimilat (hasil fotosintesis) ke organ reproduktif seperti bulir per malai padi, volume tongkol jagung, serta jumlah polong isi pada kedelai.

2. **Arsitektur tanaman yang ideal**
   Pada parameter ini, pemulia berfokus pada morfologi tanaman yang lebih efisien. Misalnya, pada padi arsitektur yang ideal identik dengan padi yang kokoh dan pendek (*semidwarf*) dengan daun tegak (*erect*) agar tanaman tidak mudah rebah. Pada jagung, karakter yang disukai yaitu sudut daun yang tegak. Karakter ini memungkinkan tanaman ditanam dengan populasi yang lebih rapat tanpa menimbulkan kompetisi cahaya yang berlebihan.
3. **Efisiensi fotosintesis**
   Fotosintesis menjadi mekanisme biologis utama yang menentukan produktivitas tanaman. Laju asimilasi karbon yang tinggi mampu menghasikan biomassa yang lebih besar. Karakter daun yang tegak, serta warna yang hijau gelap mencerminkan kandungan klorofil tinggi yang berperan dalam menangkap cahaya dan aktivitas fotosintesis.
4. **Kualitas nutrisi (biofortifikasi)**
   Selain berorientasi pada kuantitas hasil, pemuliaan tanaman juga melakukan pendekatan pada peningkatan kualitas nutrisi tanaman pangan. Salah satunya melalui biofortifikasi. Pada padi, biofortifikasi difokuskan pada peningkatan kandungan seng (Zn) dan zat besi (Fe) untuk mencegah stunting dan anemia, misalnya pada varietas Inpari IR Nutrizinc. Pada jagung, biofortifikasi dilakukan dengan meningkatkan kandungan provitamin A.

10.2 Metode Pemuliaan Tanaman Pangan: Konvensional dan Modern

10.2.1 Pemuliaan Konvensional

Pemuliaan konvensional merupakan pendekatan klasik yang bertumpu pada karakter fenotip alami yang ada pada tanaman. Berbeda dengan pendekatan bioteknologi modern yang bekerja pada tingkat DNA, pemuliaan ini memnafaatkan proses reproduksi alami dengan intervensi manusia melalui seleksi dan persilangan. Keberhasilan pemuliaan konvensional sangat bergantung pada keterampilan pemulia.

1. Introduksi Tanaman

Introduksi tanaman merupakan langkah paling awal dalam sejarah pemuliaan. Metode ini dilakukan melalui cara mendatangkan varietas, galur, atau plasma nutfah dari wilayah lain yang memiliki karakter unggul tertentu untuk dibudidayakan di lingkungan baru (Tasma, 2013).

Tujuan utama introduksi yaitu pemulia memiliki lebih banyak sumber sifat genetik yang dapat dimanfaatkan seperti potensi hasil yang tinggi, tahan hama dan penyakit, toleran terhadap cekaman lingkungan (Paczos-grz, 2023). Keberhasilkan metode ini tidak hanya didasarkan pada keunggulan genetik tanaman saja, melainkan juga kemampuannya dalam beradaptasi dengan kondisi agroekosistem setempat. Sehingga, dalam melakukan metode introduksi harus dilakukukan aklimatisasi dan uji adaptasi (Rahman et al., 2023). Proses ini bertujuan untuk mencegah masuknya organisme pengganggu tanaman atau patogen baru yang dapat menimbulkan permasalahan bagi sistem pertanian lokal.

2. Seleksi Massa (*Mass Selection*)

Seleksi massa merupakan metode pemuliaan yang relatif sederhana, namun sudah sering digunakan oleh pemulia tanaman. Prinsip dasar metode ini yaitu memilih sejumlah tanaman yang memiliki fenotip terbaik dari suatu populasi yang beragam, kemudian mencampurkan benih hasil panennya untuk ditanam kembali pada generasi berikutnya. Dengan adanya seleksi berulang kali, frekuensi gen-gen yang mengendalikan sifat unggul akan meningkat dalam populasi. Metode ini paling efektif diterapkan pada karakter yang memiliki heritabilitas tinggi, yaitu sifat yang ekspresinya lebih banyak dipengaruhi oleh faktor genetik dibandingan faktor lingkungan, seperti umur berbunga maupun tinggi tanaman (Reynolds, 2023). Meskipun sederhana dan murah, seleksi massa memiliki keterbatasan dalam memperbaiki sifat-sifat tanaman yang kompleks seperti hasil panen, yang tidak hanya dipengaruhi oleh faktor genetik saja, melainkan juga interaksinya dengan lingkungan.

3. Hibridisasi (Persilangan)

Hibridisasi merupakan metode pemuliaan yang bertujuan mengombinasikan karakter unggul dari dua atau lebih tetua dengan genetik yang berbeda. Teknik ini dilakukan melalui penyerbukan silang terkontrol sehingga pemulia menentukan secara spesifik induk jantan dan betina yang akan disilangkan, tujuannya untuk menghasilkan kobinasi genetik baru yang tidak ditemukan pada tetuanya. Misalnya, suatu galur padi yang memiliki potensi hasil panen tinggi tetapi rentan terhadap penyakit dapat disilangkan dengan galur lainnya yang tahan terhadap penyakit namun produktivitasnya rendah. Melalui proses segregasi dan rekombinasi genetik, diharapkan anakan yang dihasilkan produktivitasnya tinggi dan tahan terhadap penyakit. Metode hibridisasi memanfaatkan adanya efek heterosis yaitu kondisi ketika keturunan hasil persilangan menunjukkan karakter atau performa yang lebih baik dibandingkan dengan kedua tetuanya (Labroo et al., 2021).

10.2.2 Pemuliaan Modern

Keterbatasan metode pemuliaan konvensional yang umumnya memerlukan waktu panjang (8-12 tahun), serta ketidakpastiannya karena sangat dipengaruhi oleh variasi genetik alami dalam segregasi, mendorong berkembangnya pendekatan pemuliaan modern. Pemuliaan modern dilakukan melalui intervensi yang lebih terarah pada tingkat seluler, biokimia, maupun molekuler yang memungkinkan percepatan perakitan varietas unggul dengan tingkat akurasi yang tinggi. Beberapa teknik pemuliaan modern yang dilakukan oleh pemulia tanaman:

1. **Kultur Jaringan**

   Kultur jaringan tanaman merupakan teknik kultur aseptis terhadap sel, jaringan, organ dan komponen-komponennya yang terkontrol secara *in vitro*. Pada kultur jaringan, bagian dari tanaman diletakkan pada media buatan yang steril dan mengandung nutrisi serta zat pengatur tumbuh yang dibutuhkan tanaman. Teknik ini dimanfaatkan dalam memodifikasi serta perbaikan tanaman, produksi tanaman yang bebas patogen, perbanyakan klonal.

Dalam program pemuliaan tanaman, teknik ini dimanfaatkan untuk memperbanyak genotip unggul secara massal dalam waktu yang relatif singkat, bebas dari patogen, serta mendukung produksi tanaman haploid ganda melalui kultur anter atau mikrospora, memungkinkan pembentukan galur murni secara cepat dibandingkan dengan metode konvensional.

Teknik kultur jaringan telah banyak digunakan untuk perbanyakan bibit pisang, kentang, tebu, anggrek, dan kelapa sawit. Kultur anter telah dimanfaatkan dalam program pemuliaan padi untuk menghasilkan galur haploid ganda yang homozigot dalam satu generasi. Teknik ini digunakan dalam pengembangan varietas padi unggul karena mampu mempercepat proses pembentukan galur murni yang sebelumnya memerlukan beberapa generasi seleksi (Lata & Sasirekhamani, 2025).

Salah satu penerapan kultur anter untuk menghasilkan tanaman haploid ganda dilakukan pada persilangan pada galur padi berdaya hasil tinggi dan padi toleran salinitas IR77674/Inpari 29 dengan kemampuan regenerasi tanaman hijau sebesar 3,1% dari total antera yang dikultur. Penelitian tersebut menghasilkan 125 tanaman dihaploid dari tanaman hijau yang diaklimatisasi yang selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai sumber galur murni dalam perakitan varietas padi unggul toleran salinitas (Safitri et al., 2016)

2. Seleksi Marka Molekuler (*Marker-Assisted Selection*/*MAS*)

Seleksi marka molekuler merupakan pendekatan yang memanfaatkan penanda DNA untuk mengidentifikasi keberadaan gen atau lokus yang berasosiasi dengan karakter tertentu. Berbeda dengan seleksi konvensional yang bergantung pada pengamatan fenotip dan memerlukan fase pertumbuhan tanaman di tahap tertentu, seleksi molekuler dengan MAS memungkinkan identifikasi sifat sejak tahap awal perkembangan tanaman.

Marka molekuler telah digunakan untuk menyeleksi gen tahan penyakit hawar daun bakteri dan blas. MAS juga telah dimanfaatkan dalam pengembangan varietas padi yang toleran

terhadap rendaman karena adanya gen *Sub1*, sehingga seleksi dapat dilakukan dengan lebih cepat dan akurat (Oladosu *et al.*, 2020).

3. Rekayasa Genetika (*Genetically Modified Organism*/*GMO*)

Rekayasa genetika merupakan teknik dalam pemuliaan dengan cara mengintroduksikan gen asing (transgen) ke dalam genom tanaman untuk mendapatkan karakter-karakter tanaman yang tidak dapat dilakukan melalui persilangan konvensional. Umumnya, transfer gen dilakukan menggunakan vektor biologis seperti bakteri *Agrobacterium tumifaciens*, atau dengan menggunakan metode fisik seperti penembakan partikel (*gene gun*).

Penelitian mengenai padi transgenik telah banyak dilakukan. Salah satunya pada tanaman padi yaitu untuk meningkatkan kandungan provitamin A, ketahanan terhadap hama, dan toleransi terhadap cekaman lingkungan. Penerapan rekayasa genetika pada tanaman pangan adalah pengembangan *golden rice*, yaitu padi transgenik yang direkayasa untuk menghasilkan β-karoten (provitamin A) pada endosperma bijinya. Karakter ini tidak dapat diperoleh melalui pemuliaan konvensional karena melibatkan introduksi dan ekspresi gen yang mengaktifkan jalur biosintesis β-karoten pada bagian biji yang secara alami tidak menghasilkan senyawa tersebut.

Di Indonesia, pengembangan *golden rice* telah diikuti dengan program pemuliaan lanjutan untuk meningkatkan karakter agronomis dan ketahanan terhadap penyakit. Salah satunya adalah galur Golden Rice F8 PAC Nagdong/IR36/IR64 yang telah menunjukkan kestabilan genetik serta karakter agronomis yang baik, seperti tinggi tanaman pendek (*semidwarf*), jumlah anakan produktif tinggi, dan bobot gabah per rumpun mencapai 42,94 gram. Selain itu, galur tersebut juga teridentifikasi membawa gen tahan penyakit blas (*Pi54*, *Pi-ta*, dan *Pik-s*) serta hawar daun bakteri (*Xa4* dan *Xa7*). Pengembangan ini menunjukkan bahwa teknologi rekayasa genetika dapat dikombinasikan dengan pemuliaan konvensional untuk menghasilkan padi yang tidak

hanya memiliki nilai gizi tinggi, akan tetapi juga tahan terhadap berbagai serangan pathogen (Wibisono et al., 2022).

Gen ketahanan seperti *Pi54*, *Pi-ta*, dan *Pik-s* sering dimanfaatkan sebagai target seleksi karena mampu memberikan ketahanan terhadap penyakit blas pada lingkungan tertentu. Efektivitas masing-masing gen dapat berbeda sesuai dengan keberadaan ras patogen yang ada di suatu wilayah, sehingga identifikasi dan seleksi gen menjadi sangat penting. Di samping penggunaan varietas tahan, pengelolaan budidaya yang meliputi penggunaan benih sehat, pengaturan waktu tanam, sanitasi lingkungan, pengaturan jarak tanam, dan pemupukan berimbang tetap diperlukan untuk menekan perkembangan penyakit blas (Wibisono et al., 2022).

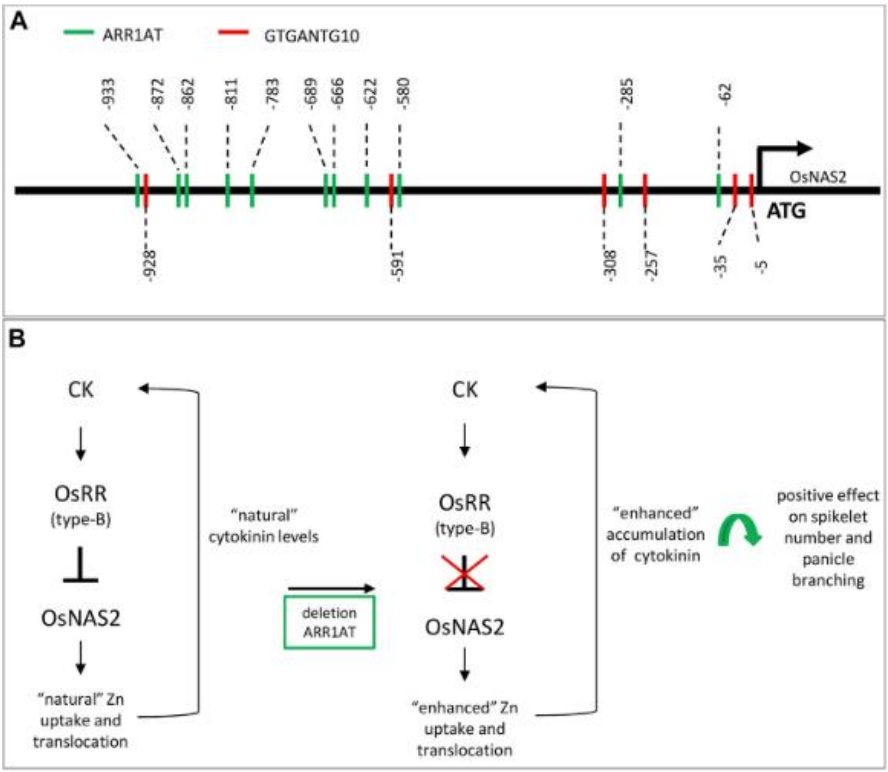
Penelitian pada jagung transgenik yang mengandung gen *Bacillus thuringiensis* (Bt) untuk ketahanan hama juga telah banyak dilakukan. Gen Bt dari bakteri *Bacillus thuringiensis* memiliki senyawa toksik terhadap serangga hama, namun relatif aman bagi manusia dan lingkungan. Gen Bt mengode protein kristal insektisidal atau cry protein yang dapat mengganggu sistem pencernaan serangga target sehingga menyebabkan kematian hama. Berbagai gen *cry* yang berhadil diidentifikasi dikelompokkan berdasarkan spektrum aktivitasnya terhadap kelompok serangga seperti gen *cryI*, *cryIX*, dan *cryX* yang efektif untuk mengatasi Lepidoptera. Perkembangan teknologi rekayasa genetika telah menghasilkan generasi baru, melalui pendekatan *gene stacking*, yaitu penggabungan lebih dari satu gen *Bt* dalam satu varietas tanaman, maupun melalui modifikasi gen yang telah ada, salah satunya YielGard Plus yang dikembangkan oleh Monsanto dengan gen *cry1Ab* dan *cry3Bb1*. Kombinasi gen ini memberikan perlindungan terhadap hama penggerek batang dan penggerek akar jagung (Amelia et al., 2025).

4. Penyuntingan Gen (*Gene Editing*)

Perkembangan terkini dalam bioteknologi tanaman ditandai dengan adanya teknologi penyuntingan gen berbasis CRISPR/Cas9. Teknologi ini memungkinkan modifikasi genom secara spesifik melalui pemotongan, penghapusan, penyisipan,

atau perbaikan urutan DNA pada lokasi yang telah ditentukan. Berbeda dengan rekayasa genetik transgenik yang melibatkan introduksi DNA asing, CRISPR/Cas9 dapat menghasilkan perubahan genetik dengan memodifikasi gen yang telah terdapat dalam genom tanaman itu sendiri. Melaui pendekatan ini, gen yang berkontribusi terhadap kerentanan tanaman terhadap cekaman lingkungan seperti kekeringan atau salinitas dapat dinonaktifkan tanpa mempengaruhi karakter unggul lain. Tingkat presisi yang tinggi serta kemungkinan menghasilkan varietas tanpa DNA asing menjadikan teknologi ini lebih dapat diterima masyarakat.

Penerapan penyuntingan gen pada tanaman pangan salah satunya peningkatan kandungan seng (Zn) dan produktivitas padi menggunakan teknologi CRISPR/Cas9. Penelitian ini menargetkan gen *OsNAS2* (*Oryza sativa Nicotianamine Synthase 2*) yang berperan dalam mengatur transportasi mikronutrien seperti seng (Zn) dan besi (Fe) di dalam tanaman. Penyuntingan dilakukan pada daerah promoter gen dengan menghapus elemen regulator ARR1AT pada posisi -933 menggunakan sistem CRISPR/Cas9. Modifikasi ini meningkatkan ekspresi gen *OsNAS2*, sehingga akumulasi seng pada tanaman dan gabah menjai lebih tinggi. Selain meningkatkan kandungan seng, hasil dari penyuntingan gen juga meningkatkan jumlah bulir per malai utama yang berkontribusi terhadap kenaikan hasil per tanaman. Karakter tersebut diwariskan secara stabil pada generasi berikutnya dan diperoleh tanaman yang telah bebas dari kontruksi transgen. Temuan ini menunjukkan bahwa teknologi penyuntingan gen dapat digunakan untuk memperbaiki kualitas gizi sekaligus produktivitas tanaman melalui perubahan yang sangat spesifik pada genom tanpa memasukkan DNA asing dari organisme lain (Ludwig et al., 2024).



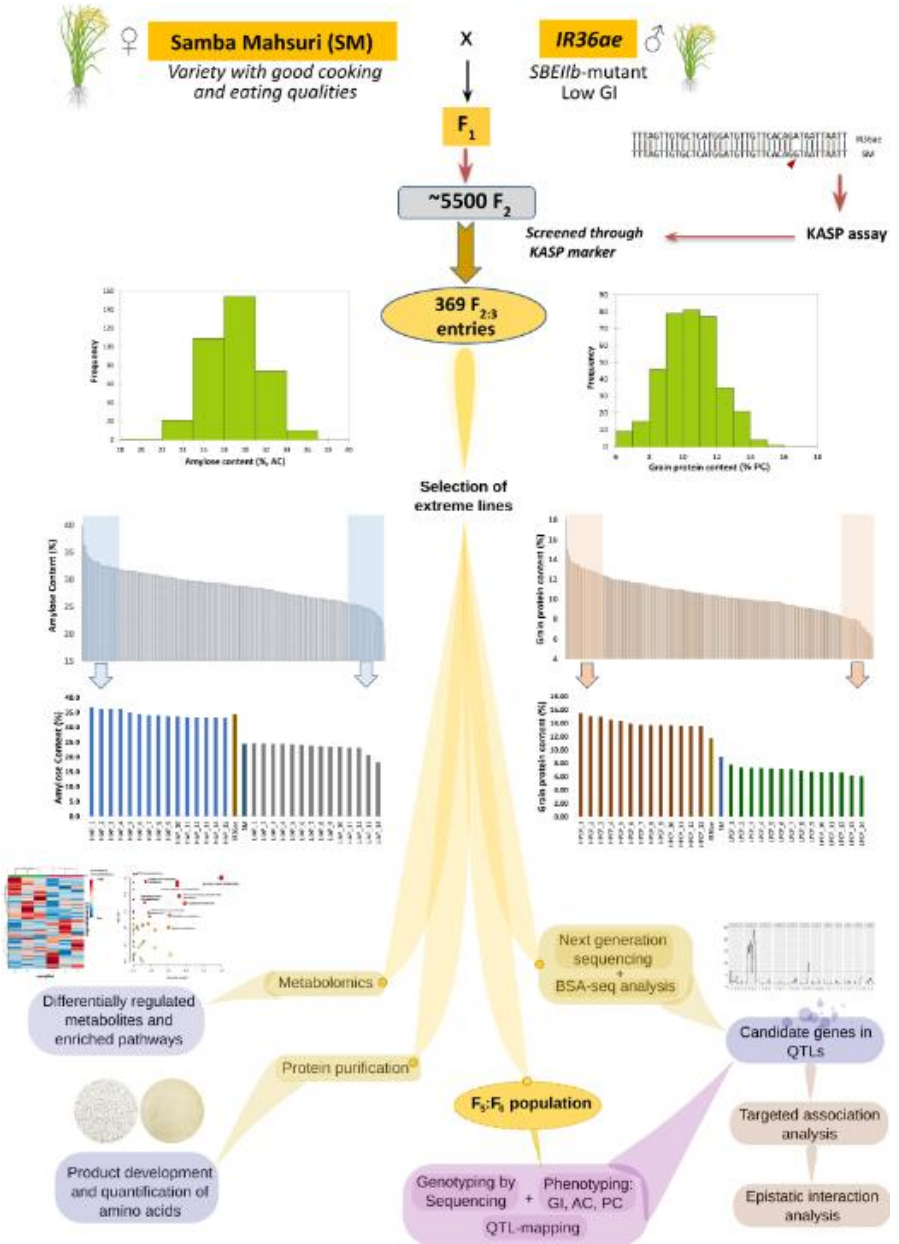
Gambar 10.1. Struktur promoter OsNAS2 dan mekanisme peningkatan akumulasi Zn pada biji padi IR64 (Sumber : Ludwig *et al.*, 2024)

Gambar 10.1 menjelaskan struktur promoter gen OsNAS2 pada padi varietas IR64 serta mekanisme yang diduga berperan dalam peningkatan akumulasi Zn pada biji. Pada wilayah promoter sepanjang 1 kb, ditemukan elemen cis-regulatory (CRE) berupa ARR1AT dan GTGANTG10 yang berfungsi sebagai bagian dari regulator ekspresi gen OsNAS2. Adanya elemen ini berpengaruh terhadap tingkat aktivitas gen dalam penyerapan dan translokasi unsur hara, khususnya Zn, pada tanaman. Perubahan ARR1AT di bagian promoter OsNAS2 dapat mengganggu regulasi hormon sitokinin melalui jalur OsRR (*Oryza sativa response regulators*). Gangguan regulasi ini menyebabkan peningkatan aktivitas ekspresi OsNAS2 yang menyebabkan meningkatnya kemampuan tanaman dalam mengakumulasi Zn pada biji. Aktivtas gen tersebut juga

berasosiasi dengan perubahan karakter agronomis tanaman seperti peningkatan jumlah biji dan percabangan malai.

Teknologi penyuntingan gen berbasis CRISPR/Cas9 juga digunakan untuk mengatasi penyakit pada tanaman, khususnya *cytidine base editor dan adenine base editor*, digunakan untuk memodifikasi elemen pengikat efektor TalC pada daerah promoter gen *SWEET14*. Penyuntingan ini dilakukan untuk mengatasi penyakit hawar daun yang disebabkan oleh *Xanthomonas oryzae pv. Oryzae* (*Xoo*) pada tanaman padi di kawasan Asia dan Afrika Barat. Gen *SWEET14* menjadi target utama interaksi antara tanaman padi dan efektor TalC dari bakteri Xoo. Upaya pengendalian penyakit dilakukan dengan pencegahan aktivasi gen tersebut oleh bakteri. Salah satu pendekatan yang dilakukan yaitu memodifikasi elemen pengikat efektor (*effector binding element/EBE*) pada daerah promoter SWEET14, sehingga efektor TalC tidak mampu lagi mengikat situs tersebut. Modifikasi berupa subtitusi basa C ke T pada EBE terbukti menurunkan induksi ekspresi *SWEET14* oleh strain Xoo yang bergantung pada TalC, sehingga menghasilkan karakter tanaman yang tahan terhadap isolat bakteri tersebut. Sebaliknya, subtitusi A ke G tidak menghilangkan kemampuan induksi gen, sehingga tanaman tetap rentan terhadap infeksi (Li et al., 2025).

Penerapan teknologi CRISPR/Cas9 juga dilakukan dalam pengembangan tanaman pangan unggul yaitu varietas padi dengan indeks glikemik rendah dan kandungan protein yang tinggi. Penelitian yang dilakukan berfokus gen *starch branching enzyme IIb* (*sbeIIb*), yang berperan dalam pembentukan struktur pati dan biji padi. Melalui penyuntingan gen, komposisi pati dapat dimodifikasi sehingga menghasilkan beras dengan kandungan amilosa yang lebih tinggi dan indeks glikemik yang lebih rendah. Galur padi yang telah disunting diharapkan dapat mendukung pola konsumsi sehat khususnya bagi masyarakat yang berisiko mengalami diabetes. Beberapa galur unggul juga menunjukkan peningkatan kandungan protein serta asam amino esensial seperti lisin (Badoni & Pasion, 2024).



Gambar 10.2. Analisis Genomik Pemuliaan Padi Pengembangan Beras Indeks Glikemik Rendah
(Sumber :Badoni and Pasion, 2024)

Gambar 10.2 menjelaskan alur pemuliaan padi berbasis genomik. Padi varietas Samba Mahsuri yang memiliki kualitas beras baik disilangkan dengan padi varietas IR36ae (mutan dengan indeks glikemik rendah). Dari hasil persilangan diperoleh populasi F2 sampai Fr. Tanaman kemudian disaring dengan marka DNA (KASP) untuk memilih individu dengan karakter terbaik. Analisis lebih lanjut seperti BSA-seq dan QTL mapping dilakukan untuk mencari gen yang mengontrol sifat pati. Analisis *phenotyping* juga dilakukan untuk mengukur sifat seperti indeks glikemik, amilosa, dan pati resisten. Kandungan senyawa dalam beras dianalisis melalui analisis protein dan metabolomik. Tujuannya, untuk mendapatkan galur padi yang memiliki indeks glikemik rendah, amilosa tingg, dan pati resisten tinggi yang cocok untuk dikonsumsi penderita diabetes (Badoni & Pasion, 2024).

10.3 Prosedur Pengujian, Pelepasan, dan Sertifikasi Varietas

10.3.1 Pengujian Varietas

1. Uji Observasi

Uji observasi berdasarkan Permentan Nomor 61 Tahun 2011 merupakan tahap awal evaluasi lapang yang dilakukan terhadap galur-galur yang diharapkan hasil program pemuliaan tanaman sebelum melalui pengujian yang lebih luas. Pada tahap ini, seluruh galur kandidat ditanam pada plot percobaan dengan skala terbatas untuk diamati berbagai karakter morfologi, agronomi, dan fenologi yang menjadi indikator potensi varietas unggul. Tujuan tahapan ini yaitu sebagai seleksi awal terhadap galur-galur yang menunjukkan performa terbaik serta mengidentifikasi galur yang lemah secara agronomis sehingga tidak layak lanjut ke tahapan selanjutnya. Evaluasi dilakukan terhadap tinggi tanaman, jumlah anakan atau cabang produktif, umur berbunga dan umur panen, bentuk dan ukuran organ tanaman, serta komponen hasil yang berkontribusi terhadap produktivitas.

2. **Uji multi-lokasi**

Galur harapan yang menunjukkan performa unggul pada tahap observasi dan uji daya hasil lanjutan harus dianjutkan dengan uji multi lokasi yang penting untuk mengevaluasi varietas sebelum tanaman siap untuk dilepas. Uji ini dirancang untuk mengkaji stabilitas fenotipik, daya adaptasi, serta pola interaksi antara faktor genetik dan lingkungan. Interaksi ini menunjukkan bagaimana respon suatu genotip pada lingkungan yang berbeda, sehingga karakter-karakter varietas yang dibuat dapat berbeda pada kondisi agroekologi yang berbeda. Kondisi agroekologi yang dipilih sebagai lokasi pengujian dipilih berdasarkan variasi faktor lingkungan seperti ketinggian tempat, kesuburan tanah, curah hujan, suhu, sistem budidaya. Pengujian juga dilakukan pada beberapa musim tanam untuk mengetahui pengaruh variasi iklim antar musim yang berpengaruh terhadap karakter tanaman.

Uji multi lokasi menjadi salah satu dasar dalam pelepasan varietas. Oleh karena itu uji ini berperan dalam memastikan bahwa setiap klaim dari suatu varietas telah diuji secara objektif, terukur, dan dapat dipertanggungjawabkan.

3. **Uji ketahanan terhadap hama dan penyakit**

Setiap varietas yang akan dilepas harus diuji terhadap hama dan penyakit yang berpotensi menyebabkan kegagalan produksi. Pengujian dilakukan baik dalam skala laboratorium maupun di lapangan. Ketahanan tanaman terhadap hama dapat mengurangi penggunaan pestisida oleh petani sehingga mendukung sistem pertanian yang berkelanjutan.

10.3.2 Prosedur Pelepasan Varietas

Pelepasan varietas menjadi tanda pengakuan resmi pemerintah terhadap suatu varietas yang telah memenuhi persyaratan teknis maupun administratif. Sebelum varietas hasil pemuliaan digunakan oleh petani, pemulia tanaman maupun instansi pengusul mengajukan permohonan pelepasan varietas kepada instansi yang berwenang dengan melampirkan deskripsi varietas, data hasil pengujian, informasi asal-usul varietas, keunggulan varietas. Kemudian, tim penilai akan melakukan evaluasi terhadap

seluruh data yang diajukan baik keunggulan hasil tanaman, stabilitas karakter hasil pemuliaan, keseragaman, ketahanan terhadap cekaman, maupun kualitas panen. Apabila hasil telah memenuhi kriteria, maka dapat direkomendasikan untuk dilepas.

Calon varietas yang telah lolos evaluasi akan dibahas dalam sidang pelepasan varietas. Sidang ini melibatkan para ahli dari berbagai bidang termasuk pemuliaan tanaman, agronomi, perlindungan tanaman, maupun perbenihan. Hasil sidang ini menjadi dasar dalam pemberian rekomendasi pelepasan varietas. Varietas yang telah disetujui ditetapkan melalui keputusan resmi pemerintah dan selanjutnya diumumkan kepada masyarakat. Varietas hasil pemuliaan dapat diproduksi dan diedarkan secara legal.

10.3.3 Sertifikasi Benih

Sertifkasi merupakan proses pengawasan dan pengujian untuk menjamin mutu benih yang diproduksi dari varietas yang telah dilepas. Tujuan sertifikasi benih yaitu untuk menjamin kemurnian genetik varietas, menjamin mutu fisik dan fisiologis benih, melindungi petani sebagai pengguna benih, dan mendukung peningkatan produktivitas tanaman (Kurniawati et al., 2025).

Tahapan dalam proses sertifikasi benih yaitu:

1. Pendaftaran pertanaman benih
   Produsen benih wajib mendaftarkan lahan produksi benih kepada lembaga sertifikasi untuk dilakukan pengawasan
2. Pemeriksaan lapangan
   Petugas melakukan inspeksi lapangan pada berbagai fase pertumbuhan tanaman untuk memastikan kemurnian varietas, kondisi pertanaman, bebas dari campuran lain, tingkat serangan hama dan penyakit
3. Pengawasan panen dan pengolahan
   Panen, pengeringan, pembersihan, dan penyimpanan benih diawasi untuk menjaga mutu benih
4. Pengambilan contoh benih
   Sampel benih diambil secara representatif untuk dilakukan pengujian laboratorium

5. Pengujian laboratorium
   Pengujian laboratorium meliputi daya kecambah, kadar air, kemurnian fisik, kesehatan benih, dan kemurnian varietas
6. Pemberian label sertifikasi
   Benih yang telah memenuhi seluruh persyaratan akan memperoleh label sertifikasi sesuai kelas benihnya. Label ini menjadi bukti bahwa benih telah memenuhi standar mutu yang ditetapkan.

Proses perbanyakan dilakukan secara bertahap melalui sistem kelas benih dan diawasi secara ketat untuk menjamin kemurnian genetik varietas. Setiap kelas benih memiliki fungsi dan peran yang berbeda dalam rantai produksi benih. Tahap pertama adalah benih penjenis, yang ditandai dengan label kuning. Benih ini menjadi benih generasi awal yang diproduksi dan dikendalikan oleh pemulia tanaman atau lembaga pemuliaan yang mengembangkan varietas tersebut. Benih penjenis memiliki tingkat kemurnian genetik paling tinggi karena bersumber langsung dari sumber genetik asli.

Dari benih penjenis kemudian dihasilkan benih dasar berlabel putih. Produksi benih dasar dilakukan melalui persyaratan teknis yang ketat seperti isolasi jarak dan waktu tanam untuk mencegah terjadinya kontaminasi serbuk sari dari varietas lain serta mempertahankan keseragaman sifat dan genetik varietas.

Tahap selanjutnya yaitu benih pokok yang ditandai dengan label ungu. Benih ini merupakan hasil perbanyakan dari benih dasar yang umumnya diproduksi oleh penangkar benih resmi atau lembaga perbenihan yang telah memenuhi persyaratan sertifikasi. Benih pokok berfungsi sebagai sumber utama dalam produksi benih yang akan dipasarkan kepada petani.

Perbanyakan berikutnya menghasikan benih sebar yang berlabel biru. Benih ini merupakan turunan dari benih pokok dan diproduksi dalam skala besar untuk didistribusikan kepada petani sebagai bahan tanam dalam budidaya tanaman pangan maupun komoditas pertanian lain (Suprayogi, 2023).

Tabel 10.1. Kelas dan Syarat Mutu Benih

Kelas Benih	Kadar Air Max (%)	Benih Murni Min (%)	Kotoran Benih Max (%)
Benih Penjenis (BS)	13	99	1
Benih Dasar (BD)	13	99	1
Benih Pokok (BP)	13	99	1
Benih Sebar (BR)	13	98	2

Sumber: Suprayogi, 2023)

10.4 Manajemen Plasma Nutfah dan *Gene Bank*

10.4.1 Plasma Nutfah Lokal sebagai *Pool* Genetik

Plasma nutfah merupakan keseluruhan sumber daya genetik yang mengandung informasi pewarisan sifat pada suatu organisme. Plasma nutfah mencakup berbagai bentuk keragaman genetik yang terdapat pada varietas lokal, galur hasil pemuliaan, varietas introduksi, maupun koleksi genetik lainnya yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam program pemuliaan tanaman.

Plasma nutfah dapat dipandang sebagai suatu *gene pool* yang menyimpan keragaman alel dalam jumlah besar. Keragaman alel menjadi peluang munculnya kombinasi genetik baru yang menghasilkan karakter unggul. Semakin luas keragaman genetik yang tersedia, semakin besar sifat-sifat tanaman yang dapat dirakit. Varietas lokal memiliki nilai yang sangat penting sebagai reservoir keragaman genetik. Varietas tersebut terbentuk melalui proses seleksi alami yang berlangsung selama beberapa generasi dalam kondisi lingkungan yang spesifik. Varietas lokal seringkali menyimpan alel-alel langka yang berperan dalam ketahanan tanaman terhadap hama dan penyakit, toleransi terhadap cekaman, tanah masam, maupun berbagai cekaman lingkungan lain. Keberadaan sumber plasma genetik menjadi semakin penting pada era perubahan iklim global. Peningkatan cuaca ekstrim, perubahan pola curah hujan, munculnya ras baru patogen, serta degradasi kualitas lahan pertanian menuntut pengembangan varietas yang lebih adaptif dan resilien.

10.4.2 Konservasi dan Pengelolaan Plasma Nutfah

Pelestarian sumber daya genetik tanaman memerlukan sistem pengelolaan yang terencana dan berkelanjutan, baik pada tingkat nasional seperti BRIN maupun internasional seperti IRRI. Lembaga-lembaga ini menjalankan fungsi krusial melalui dua strategi utama yaitu konservasi *in-situ* dan *ex-situ* serta karakterisasi dan evaluasi genetik.

Konservasi sumber daya genetik melalui pendekatan *in-situ* dilakukan dengan mempertahankan keberadaan varietas lokal dan kerabat liar tanaman di habitat asalnya sehingga proses evolusi dan adaptasi alami tetap berlangsung. Konservasi *ex-situ* dilakukan dengan mengoleksi dan menyimpan material genetik di luar habitat aslinya, seperti *gene bank*, kebun koleksi, kultur jaringan, maupun penyimpanan kriogenik. Pada gene bank, benih disimpan dalam kondisi lingkungan yang dikendalikan secara ketat, terutama suhu dan kelembaban, untuk memperlambat proses metabolisme dan penuaan benih. Melalui teknologi tersebut, viabilitas benih dapat dipertahankan dalam jangka waktu yang sangat panjang sehingga sumber daya genetik dapat tetap tersedia meskipun populasi aslinya mengalami penurunan atau bahkan hilang dari habitat asli.

Peran *gene bank* tidak terbatas pada penyimpanan koleksi plasma nutfah semata. Setiap aksesi yang dikoleksi di *gene bank*, umumnya dikarakterisasi secara sistematis berdasarkan morfologi, agronomi, fisiologi, biokimia, sampai karakter molekulernya. Perkembangan teknologi genomik modern memungkinkan dilakukan identifikasi marka DNA, pemetaan keragaman genetik, serta analisis hubungan kekerabatan antar aksesi secara lebih akurat. Dengan adanya data pada *gene bank*, pemulia tanaman dapat menelusuri sumber gen tertentu secara lebih efisien, misalnya gen yang tahan penyakit maupun toleran cekaman.

10.5 Diseminasi dan Adopsi Varietas Unggul

10.5.1 Strategi dan Metode Diseminasi

Tahap akhir sekaligus penentu pengembangan varietas unggul yaitu diseminasi dan adopsi varietas oleh petani. Pada fase ini, hasil inovasi telah melalui rangkaian proses panjang hingga teknologi yang adadapat diterapkan secara nyata oleh petani. Keberhasilan suatu

varietas unggul tidak hanya karena keunggulan karakter genetiknya saja, melainkan ketercapaian tingkat adopsi di petani (Kadar et al., 2016).

Diseminasi bertujan untuk mempercepat transfer hasil penelitian dari lebaga pengembangan teknologi pertanian ke petani sehingga inovasi yang dihasilkan dapat diimplementasikan secara nyata. Diseminasi tidak hanya berfokus pada memberikan informasi ke petani saja terkait adanya varietas yang telah dikembangkan, melainkan juga mendorong perubahan perilaku petani terhadpa penggunaan varietas baru.

Salah satu metode yang banyak digunakan dalam pengenalan varietas unggul yaitu metode demplot. Metode ini dilakukan melalui pengamatan secara langsung terhadap hasil yang ada di lapangan. Dalam pelaksanaannya, varietas unggul yang ditanam di lahan percontohan akan melibatkan petani pelopor di lokasi tersebut. Keberadaan demplot memungkinkan petani untuk dapat melihat secara langsung visual berbagai karakter penting seperti bagaimana pertumbuhan tanaman, umur panennya, ketahanan tanaman terhadap serangan hama dna penyakit, produktivitas, serta kualitas hasil panen dibandingkan dengan varietas yang umum dibudidayakan. Saat ini, strategi diseminasi varietas unggul semakin didukung oleh adanya teknologi informasi dan komunikasi. Adanya berbagai media sosial dan platform digital dapat membantu petani untuk mendapatkan informasi dengan lebih cepat.

10.5.2 Proses Adopsi Varietas Unggul

Adopsi benih unggul oleh petani melalui serangkaian proses yang bertahap. Secara umum, adopsi varietas unggul memiliki lima tahapan yaitu kesaradaran petani, minat, evaluasi, uji coba, sampai kemudian varietas baru dapat diadopsi oleh petani.

Tahap awal dalam adopsi varietas unggul yaitu kesadaran petani. Petani mulai mengetahui adanya suatu varietas unggul baru melalui berbagai sumber informasi seperti penyuluh pertanian, media massa, kelompok tani, maupun komunikasi antar petani. Pada tahapan ini, pengetahuan yang dimiliki oleh petani masih umum dan terbatas pada pengenalan awal terhadap inovasi yang ditawarkan.

Setelah keberadaan varietas unggul tersebut diketahui oleh petani, tahapan selanjutnya yaitu petani mulai memiliki minat terhadap varietas baru. Petani mulai menunjukkan ketertarikan untuk memperoleh informasi dengan lebih rinci. Informasi yang dicari umumnya berkaitan dengan karakter agronomis varietas, potensi hasilnya, ketahanan tanaman terhadap hama dan penyakit, kebutuhan input produksi, serta aspek ekonomi seperti harga dan ketersediaan benih.

Tahap selanjutnya yaitu evaluasi. Pada tahap ini, petani mulai melakukan penilaian terhadap kelayakan inovasi. Petani mempertimbangkan mengenai manfaat yang diperoleh, kebutuhan modal, kesesuaian dengan kondisi agroekologi yang ada, risiko yang mungkin muncul akibat adanya varietas baru. Petani perlu melakukan anaisis biaya dan manfaat sebelum memutuskan untuk mencoba inovasi.

Tahap selanjutnya yaitu tahap uji coba. Tahapan ini ditandai dengan penerapan varietas unggul pada skala terbatas. Petani umumnya menanam benih baru pada sebagian kecil lahan sebagai sarana untuk melihat bagaimana varietas baru tersebut jika ditanam pada kondisi yang nyata di lingkungan usaha tani. Dengan adanya pengalaman langsung inilah, petani dapat menilai produktivitas, daya adaptasi, serta keuntungan ekonomi yang dihasilkan dengan membandingkan varietas yang telah digunakan sebelumnya.

Tahap terakhir yaitu adopsi. Jika hasil uji coba menunjukkan hasil yang memuaskan dan memberikan keuntunga yang lebih besar, petani akan mengambil keputusan untuk mengadopsi varietas unggul secara keseluruhan. Pada tahapan ini, berarti inovasi yang telah dibuat diterima sebagai bagian dari sistem usaha tani yang dapat digunakan di musim-musim tanam selanjutnya.

Kendala dalam proses adopsi dan diseminasi varietas baru yaitu seringkali realias di lapangan hilirisasi benih terhambat oleh berbagai hal seperti petani tidak mau mengalami risiko, tidak sesuai dengan preferensi pasar dan konsumen, teknologi memiliki input yang harus presisi. Petani seringkali lebih memilih untuk menanam varietas lama yang hasilnya sedang namun sudah pasti mereka kuasai cara budidayanya, dibandingkan dengan menanam varietas baru dengan risiko yang belum mereka ketahui. Kemudian, seringkali

varietas baru tidak sesuai dengan yang disukai oleh konsumen. Seperti misalnya varietas yang baru dengan berbagai macam keunggulan dalam budidaya, akan tetapi tekstur nasi tidak sesuai dengan lidah masyarakat lokal, misal nasi terlalu pera padahal masyarakat di daerah tertentu lebih suka terhadap nasi dengan tekstur pulen. Ketidaksesuaian pasar ini dapat menjadi penyebab utama petani menolak adopsi benih baru.

DAFTAR PUSTAKA

Amelia, E., Cahyana, U., & Hala, Y. (2025). *Rekayasa Genetik Tanaman dengan Gen Bt : Implikasi Bagi Keamanan Pangan dan Kesehatan*. *8*, 5027–5035.

Aristya, V. E., & Mada, G. (2019). *Pemuliaan Tanaman Partisipatif untuk Meningkatkan Peran Varietas Padi Unggul dalam Mendukung Swasembada Pangan Nasional*. *2*(1), 26–35.

Aznur, F., & Purnamawati, H. (2017). *Efisiensi Penggunaan Cahaya Matahari dan Partisi Karbohidrat Tanaman Sorgum pada Berbagai Tingkat Pemupukan Nitrogen*. *45*(3), 278–284.

Badoni, S., & Pasion, E. A. (2024). *Multiomics of a rice population identifies genes and genomic regions that bestow low glycemic index and high protein content*. 1–9. https://doi.org/10.1073/pnas.

Kadar, L., Siregar, H., & Kumala, I. (2016). *Faktor-Faktor Yang Berpengaruh Terhadap Adopsi Varietas Unggul Jagung Putih Di Kabupaten Grobogan-Jawa Tengah*. 215–220.

Kurniawati, E., Handoko, V. R., Widodo, J., Studi, P., Ilmu, M., & Publik, A. (2025). *Implementasi Program Sertifikasi Benih Pada Dinas Pertanian Dan Ketahaan Pangan Provinsi Jawa Timur*. *11*(2), 185–197.

Kustiani, E., Rahardjo, T. P., & Laamou, V. (2019). *Karakteristik Beberapa Nomor Pemuliaan pada Tanaman Jagung Hibrida (Zea mays L .)*. *3*(2), 83–91.

Labroo, M. R., Studer, A. J., & Rutkoski, J. E. (2021). *Heterosis and Hybrid Crop Breeding : A Multidisciplinary Review*. *12*(February), 1–19. https://doi.org/10.3389/fgene.2021.643761

Lata, S., & Sasirekhamani, M. (2025). *Advances in Haploid and Doubled Haploid Technology for Accelerating Breeding Cycles in Crop Improvement*. *26*(7), 61–77.

Li, C., Liu, B., Dong, H., & Yang, B. (2025). Enhancing resistance to bacterial blight in rice using CRISPR-based base editing technology. *The Crop Journal*, *13*(1), 115–124. https://doi.org/10.1016/j.cj.2024.09.003

Ludwig, Y., Jr, C. D., Arcillas, E., Macalalad-cabral, R. J., Kohli, A., Reinke,

R., & Slamet-loedin, I. H. (2024). *CRISPR-mediated promoter editing of a cis -regulatory element of OsNAS2 increases Zn uptake / translocation and plant yield in rice*. *January*. https://doi.org/10.3389/fgeed.2023.1308228

Mayasari, R. E., & Alimuddin, N. H. (2020). *Analisis hukum perkembangan perlindungan varietas tanaman di indonesia*. *2*(4), 1–14.

Nasir, M., S, E. T., Purnomo, D., & Jaenudin, A. (2023). *Effect Of Rhizobium Inoculation And Phosphate Fertilizer On The Growth Of Soybean (Glycine max L) Grobogan Variety*. *13*, 161–167.

Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Arolu, F., Chukwu, S. C., Muhammad, I., Kareem, I., Salisu, M. A., & Arolu, I. W. (n.d.). *Submergence Tolerance in Rice : Review of Mechanism , Breeding and , Future Prospects*. 1–16.

Paczos-grz, E. (2023). *Germplasm Resources Exploration and Genetic Breeding of Crops*.

Rahman, N., Ding, J., Nawab, S., Ali, A., Alam, Y., Qadir, A., & K, S. (2023). *Molecular evaluation and geographical adaptation of plants : A literature review*.

Rostini, N., Setiawati, M. R., Simarmata, T., Stoeber, S., & Adinata, K. (2018). *Preferensi petani terhadap keragaan padi (Oryza sativa) unggul untuk lahan sawah di wilayah Pangandaran dan Cilacap*. *17*(1), 523–530.

Safitri, H., Purwoko, B. S., Dewi, I. S., & Ardie, W. (2016). *Kultur Antera untuk Mendapatkan Galur Padi Toleran Salinitas Anther Culture to Obtain Rice Lines Tolerant to Salinity*. *44*(3), 221–227.

Tasma, I. M. (2013). *Gen dan QTL Pengendali Umur pada Kedelai*. *9*(2), 85–96.

Wibisono, V. B., Mai, D., Imam, A., & Dyanshah, D. A. (2022). *Karakterisasi Morfologi dan Molekuler Galur Padi Introduksi Golden Rice F 8 terhadap Penyakit Blas dan Hawar Daun Bakteri*. *50*(3), 242–248.

BAB 11
DAMPAK PERUBAHAN IKLIM TERHADAP BUDI DAYA TANAMAN PANGAN

Perubahan iklim telah menjadi ancaman eksistensial paling serius bagi ketahanan pangan global di abad ke-21. Fenomena ini mengganggu seluruh dimensi pangan, mulai dari ketersediaan, aksesibilitas, hingga stabilitas pasokan secara sistemik (Janni et al., 2024; Mutale et al., 2025). Pergeseran pola cuaca ekstrem, termasuk peningkatan frekuensi gelombang panas, kekeringan yang berkepanjangan, dan anomali curah hujan, berdampak langsung pada penurunan produktivitas tanaman pangan utama seperti padi, jagung, dan gandum yang menyumbang mayoritas konsumsi kalori dunia *(Cheah* et al., 2025*; Hultgren* et al., 2025). Ketidakpastian iklim ini melemahkan ketahanan sistem pangan dan meningkatkan risiko kelaparan, terutama di wilayah yang sangat bergantung pada pertanian tadah hujan (Begna dan Wakweya, 2026).

Secara fisiologis, perubahan iklim memberikan tekanan biotik dan abiotik yang signifikan terhadap tanaman. Peningkatan suhu rata-rata global tidak hanya memperpendek periode pertumbuhan tanaman, tetapi juga menyebabkan degradasi klorofil dan penurunan laju fotosintesis, yang pada akhirnya mengurangi akumulasi biomasa dan hasil panen (Budiastuti, 2020). Selain itu, perubahan suhu dan kelembapan memicu perubahan dinamika serangan hama dan penyakit invasif, yang memperburuk risiko gagal panen di berbagai ekosistem pertanian (Naik et al., 2024). Tanpa upaya mitigasi yang transformatif, hasil panen biji-bijian di beberapa wilayah diproyeksikan dapat mengalami penurunan hingga 15,8% atau lebih dalam beberapa dekade mendatang (Qu et al., 2026).

Di Indonesia, dampak perubahan iklim sangat terasa melalui fenomena *El Niño Southern Oscillation* yang menyebabkan variabilitas curah hujan ekstrem, mengganggu pola tanam, dan merusak produksi padi serta palawija (Malau et al., 2023). Proyeksi menunjukkan bahwa kenaikan suhu sebesar 1°C yang disertai perubahan curah hujan 5% dapat menurunkan produktivitas padi di Indonesia hingga 0,33 ton/ha (Perdinan et al., 2019). Kerentanan ini diperparah oleh kenaikan permukaan air laut yang mengancam lahan sawah di wilayah pesisir, dengan potensi kehilangan luas lahan yang sangat besar menjelang tahun 2050 (Konyep, 2020). Dampak ini tidak hanya merugikan secara ekonomi, tetapi juga mengancam kesejahteraan petani kecil yang memiliki keterbatasan akses terhadap teknologi dan modal adaptasi (Rahma *et al.,* 2025).

Sebagai respons terhadap tantangan ini, penerapan *Climate-Smart Agriculture* menjadi strategi kunci untuk membangun resiliensi sistem pertanian. CSA mengintegrasikan peningkatan produktivitas dengan upaya adaptasi dan mitigasi emisi gas rumah kaca melalui manajemen air dan nutrisi yang presisi, konservasi lahan, serta penggunaan varietas tanaman yang toleran terhadap cekaman lingkungan (Kabato *et al.,* 2025). Inovasi dalam pemuliaan tanaman, termasuk penggunaan teknologi seperti CRISPR/Cas9 untuk mengembangkan kultivar yang tahan kekeringan dan panas, menjadi sangat krusial untuk memastikan keberlanjutan produksi pangan di tengah ketidakpastian iklim masa depan (Biswas *et al.,* 2025).

11.1 Konsep Perubahan Iklim dan Sistem Pertanian

Sistem pertanian secara fundamental saling terkait dengan kondisi iklim, di mana parameter lingkungan seperti suhu, pola curah hujan, dan konsentrasi karbon dioksida (CO_2) atmosfer menentukan batas-batas biofisik produksi pangan (Janni *et al.,* 2024). Perubahan iklim mengganggu keseimbangan sistemik ini melalui pergeseran musim tanam dan peningkatan frekuensi fenomena cuaca ekstrem, yang secara langsung mengancam stabilitas serta keberlanjutan pasokan pangan global (Hultgren *et al.,* 2025; Mutale *et al.*, 2025). Dampaknya melampaui penurunan hasil panen secara fisik, karena turut mempengaruhi aspek aksesibilitas pangan, pilihan pola makan,

dan ketahanan ekonomi masyarakat agraris yang sangat bergantung pada stabilitas iklim (Cheah *et al.,* 2025).

Secara teknis, interaksi antara perubahan iklim dan sistem pertanian mencakup tekanan abiotik yang kompleks, seperti cekaman panas dan kekeringan yang menurunkan laju fotosintesis serta kualitas nutrisi tanaman (Janmohammadi dan Sabaghnia, 2023). Selain itu, perubahan suhu dan kelembapan global memicu dinamika baru dalam persebaran hama serta penyakit tanaman invasif, yang menambah tantangan dalam sistem perlindungan tanaman (Naik *et al.,* 2024). Tanpa adanya intervensi adaptif, sistem pertanian diproyeksikan akan mengalami penurunan produktivitas yang signifikan, dengan potensi penurunan hasil biji-bijian utama hingga 15,8% di berbagai wilayah pada dekade mendatang (Biswas *et al.,* 2025).

Dalam konteks Indonesia, sistem pertanian sangat rentan terhadap variabilitas curah hujan ekstrem yang sering menyebabkan kegagalan panen dan ketidakpastian kalender tanam (Malau *et al.,* 2023). Kenaikan suhu rata-rata lokal dan ancaman intrusi air laut pada lahan pertanian pesisir menuntut adanya transformasi menuju sistem yang lebih tangguh melalui pendekatan *Climate-Smart Agriculture* (Perdinan *et al.,* 2019). Konsep CSA ini mengintegrasikan praktik budi daya yang adaptif—seperti manajemen air presisi, penggunaan varietas tanaman toleran cekaman, dan agroforestri—guna menjaga produktivitas sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian (Budiastuti, 2020).

11.2 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produktivitas Tanaman Pangan

11.2.1 Peningkatan Suhu Udara

Perubahan iklim telah menjadi faktor penentu utama yang membatasi potensi hasil tanaman pangan secara global melalui pergeseran pola cuaca yang tidak menentu dan peningkatan frekuensi kejadian ekstrem (Janni *et al.,* 2024; Mutale *et al.,* 2025). Gangguan terhadap stabilitas iklim ini memengaruhi seluruh rantai sistem pangan, mulai dari penurunan ketersediaan kalori hingga ancaman terhadap ketahanan ekonomi petani (Cheah *et al.,* 2025; Hultgren *et al.,* 2025). Tanpa upaya adaptasi yang sistemik,

perubahan iklim diproyeksikan akan terus menurunkan hasil panen biji-bijian utama dunia, yang berisiko memperburuk krisis pangan global pada dekade-dekade mendatang (Begna dan Wakweya, 2026).

Peningkatan suhu udara global merupakan komponen perubahan iklim yang memberikan tekanan abiotik paling langsung terhadap fisiologi tanaman pangan. Cekaman panas (*heat stress*) akibat kenaikan suhu rata-rata dapat menyebabkan degradasi klorofil dan gangguan pada proses fotosintesis, yang secara kumulatif menurunkan akumulasi biomasa dan hasil akhir tanaman (Janmohammadi dan Sabaghnia, 2023). Selain itu, suhu yang lebih tinggi cenderung mempercepat fase fenologi tanaman, yang berarti periode pengisian biji menjadi lebih pendek. Hal ini sering kali menghasilkan biji dengan kualitas nutrisi yang lebih rendah dan bobot yang lebih ringan dibandingkan dengan tanaman yang tumbuh pada suhu optimal (Biswas *et al.*, 2025; Naik *et al.,* 2024).

Di wilayah tropis seperti Indonesia, peningkatan suhu udara yang disertai dengan variabilitas curah hujan yang ekstrem sangat memengaruhi produktivitas padi dan palawija (Malau *et al.,* 2023). Kenaikan suhu sebesar 1°C saja telah diidentifikasi mampu menurunkan produktivitas padi secara signifikan akibat peningkatan laju evapotranspirasi dan risiko sterilitas serbuk sari (Perdinan et al., 2019). Tantangan ini menuntut transformasi dalam sistem budi daya melalui penerapan *Climate-Smart Agriculture* dan pengembangan varietas unggul yang lebih toleran terhadap cekaman panas guna menjaga keberlanjutan produksi pangan nasional (Kabato *et al.,* 2025; Konyep, 2020).

11.2.2 Perubahan Pola Curah Hujan

Perubahan pola curah hujan merupakan salah satu manifestasi paling nyata dari perubahan iklim yang berdampak langsung pada sektor pertanian, khususnya tanaman pangan dan hortikultura (Sudarma dan As-syakur, 2018). Ketidakpastian waktu dimulainya musim hujan dan musim kemarau menyebabkan petani sulit memprediksi jadwal tanam secara akurat, yang sering kali berujung pada kegagalan panen awal atau penurunan produktivitas (Yulianto, 2016). Variabilitas curah hujan ini tidak hanya memengaruhi ketersediaan air tanah, tetapi juga mengubah dinamika sistem

penggunaan lahan dan teknologi pengelolaan tanaman yang telah ada (Adetama *et al.,* 2023).

Dampak fisik dari perubahan pola hujan mencakup dua spektrum ekstrem: kelebihan air (banjir) dan kekurangan air (kekeringan). Curah hujan yang berlebihan dapat menyebabkan erosi tanah yang parah, pencucian nutrisi (*nutrient runoff*), serta kondisi jenuh air (*waterlogging*) yang menghambat pernapasan akar dan pertumbuhan tanaman (Harahap *et al.,* 2023). Sebaliknya, penurunan curah hujan yang drastis, terutama pada periode El Niño, memicu cekaman kekeringan yang menurunkan hasil panen padi secara signifikan akibat kerusakan sel dan gangguan metabolisme tanaman (Harahap *et al.,* 2023; Nasrudin dan Firmansyah, 2020). Secara global, kondisi iklim ekstrem ini diperkirakan mampu menurunkan produksi pertanian hingga 5–20% jika tidak disertai mitigasi yang tepat (Nasrudin dan Firmansyah, 2020).

Di wilayah Indonesia, distribusi curah hujan menunjukkan tren yang kontras antarwilayah; Sumatera bagian utara dan Kalimantan diprediksi mengalami peningkatan frekuensi hujan, sementara wilayah selatan seperti Jawa dan Bali cenderung mengalami musim hujan yang lebih pendek dengan risiko kekeringan yang lebih lama (Yulianto, 2016). Musim hujan yang makin pendek di wilayah selatan menyulitkan upaya peningkatan Indeks Pertanaman, sehingga diperlukan inovasi varietas tanaman yang memiliki umur pendek (*short-cycle*) serta rehabilitasi jaringan irigasi (Yulianto, 2016). Selain itu, peningkatan kelembapan akibat pola hujan yang tidak menentu turut memicu ledakan populasi organisme pengganggu tanaman yang mengancam kesehatan tanaman secara sistemik *(*Prilyscia *et al.,* 2018).

Untuk menghadapi tantangan ini, strategi adaptasi yang terintegrasi sangat diperlukan guna menjaga stabilitas produksi pangan. Pembangunan kolam penampungan air hujan (*embung*), sumur bor, dan reservoir air menjadi krusial untuk menyimpan kelebihan air saat musim hujan agar dapat digunakan selama periode kekeringan. Selain itu, penggunaan teknologi konservasi tanah seperti mulsa jerami terbukti efektif dalam menjaga kelembapan tanah dan mengurangi penguapan selama cuaca panas. Diversifikasi pertanian dengan menanam berbagai jenis tanaman serta penerapan

sistem agroforestri juga disarankan untuk meminimalkan risiko kerugian ekonomi akibat fluktuasi iklim yang ekstrem (Susanto *et al.,* 2023).

11.2.3 Peningkatan Frekuensi Cuaca Ekstrem

Peningkatan frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem merupakan salah satu tantangan paling mendesak bagi keberlanjutan budi daya tanaman di seluruh dunia. Kejadian cuaca ekstrem, yang didefinisikan sebagai fenomena atmosfer yang tidak biasa dan berpotensi menimbulkan bencana, telah menunjukkan peningkatan signifikan selama 30 tahun terakhir. Studi terbaru menunjukkan bahwa sekitar 18–43% varians hasil panen pada tanaman pangan utama seperti jagung, kedelai, padi, dan gandum dapat diatribusikan langsung pada ekstremitas suhu dan curah hujan. Tanpa langkah adaptasi yang tepat, kerugian hasil panen global diproyeksikan dapat mencapai lebih dari 20%, tergantung pada jenis tanaman dan tingkat keparahan iklim yang terjadi (Didukh, 2023).

Secara fisiologis, cuaca ekstrem seperti gelombang panas (*heatwaves*) dan kekeringan sering kali terjadi secara bersamaan, di mana panas ekstrem memicu penguapan berlebih yang mengeringkan tanah dan tanaman secara lebih cepat. Kondisi ini menyebabkan cekaman abiotik yang parah, mengganggu mikrobioma tanah, dan memicu pencucian nutrisi (*nutrient runoff*) saat terjadi hujan lebat yang ekstrem (Furtak dan Wolińska, 2023). Selain itu, lahan pertanian skala kecil (1–2 ha) teridentifikasi memiliki kerentanan yang lebih tinggi terhadap paparan curah hujan berlebih dan stres panas dibandingkan lahan yang lebih besar, yang secara langsung mengancam ketahanan pangan rumah tangga petani (Bajaj et al., 2025).

Di Indonesia, fenomena *El Niño Southern Oscillation* menjadi penggerak utama variabilitas cuaca ekstrem yang berdampak buruk pada produksi padi, jagung, dan kedelai (Malau *et al.,* 2023). Fenomena El Niño menyebabkan musim kemarau yang berkepanjangan dan penurunan curah hujan, yang sering kali berujung pada gagal panen akibat kekeringan. Sebaliknya, La Niña memicu peningkatan curah hujan yang ekstrem dan musim hujan

yang lebih panjang, yang dapat merusak produktivitas hortikultura seperti sayuran dan buah-buahan akibat kelembapan tinggi serta serangan hama dan penyakit. Gangguan cuaca ini tidak hanya merusak fisik tanaman, tetapi juga mengganggu rantai pasok dan ekspor komoditas pertanian (Yuniasih *et al.,* 2023).

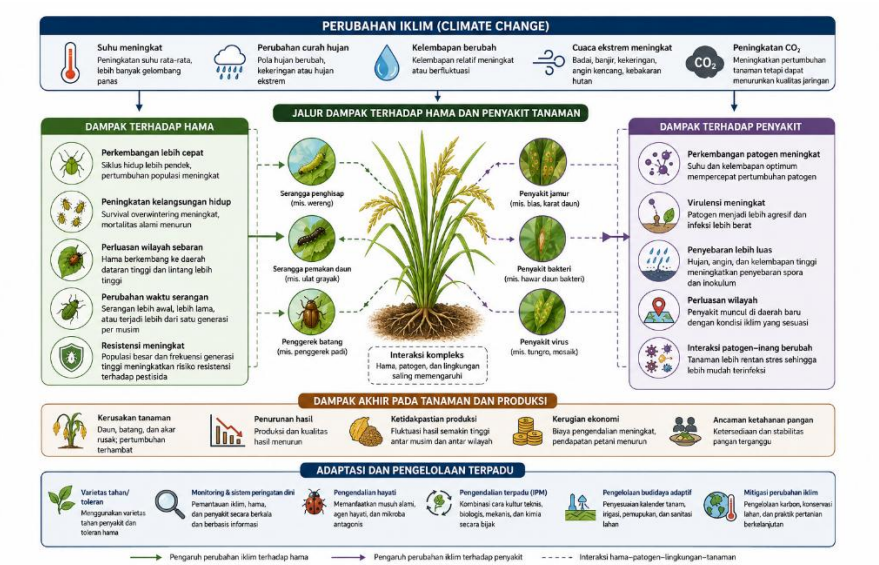
Untuk menghadapi ancaman ini, transformasi strategi budi daya menuju sistem yang lebih tangguh sangat diperlukan. Penggunaan teknologi *Forecast Based Financing* untuk pertanian presisi dan pengembangan varietas tanaman yang tahan cuaca (*weather-resistant*) menjadi solusi krusial dalam memitigasi risiko. Selain itu, penerapan praktik manajemen air yang efisien, konservasi tanah melalui mulsa, dan penyesuaian rencana tata tanam yang lebih terencana merupakan langkah adaptasi esensial untuk menjaga stabilitas produksi pangan di tengah ketidakpastian iklim masa depan (Susanto *et al.*, 2023).

11.2.4 Dampak Terhadap Hama dan Penyakit Tanaman

Serangan hama dan penyakit merupakan salah satu faktor pembatas utama dalam produktivitas tanaman pangan dunia, yang diperkirakan menyebabkan kehilangan hasil panen tahunan antara 20% hingga 40%. Krisis ini diperparah oleh fenomena perubahan iklim, di mana setiap kenaikan suhu permukaan global sebesar satu derajat Celcius diproyeksikan akan meningkatkan kehilangan hasil akibat invasi hama serangga sebesar 10% hingga 25%. Selain itu, serangan jamur secara spesifik telah mengurangi ketersediaan pangan higienis secara global hingga 8,5%, yang mengancam stabilitas pasokan kalori bagi populasi dunia yang terus bertumbuh (Farooq *et al.,* 2022).

Mekanisme biologis di balik peningkatan ancaman ini mencakup percepatan siklus hidup hama dan pergeseran jangkauan geografis patogen. Suhu yang lebih hangat meningkatkan laju reproduksi spesies hama berdarah dingin dan memungkinkan mereka untuk bermigrasi ke wilayah lintang tinggi yang sebelumnya tidak ramah bagi kelangsungan hidup mereka. Selain itu, peningkatan konsentrasi dapat mengubah komposisi nutrisi tanaman, yang sering kali meningkatkan kerentanan inang terhadap infeksi serta menciptakan "mismatch" atau ketidaksesuaian waktu

antara hama dengan musuh alaminya. Sebagai contoh, penyakit *wheat blast* yang disebabkan oleh jamur *Magnaporthe oryzae* kini menjadi ancaman serius bagi jutaan hektar lahan gandum di Amerika Selatan dan Asia Selatan, dengan potensi penurunan hasil hingga 51% di area yang terinfeksi (Uddin dan Kebreab, 2020).



Gambar 11.1. Skema dampak perubahan iklim terhadap dinamika hama dan penyakit tanaman.
(Sumber: Diadaptasi dari Wang et al. (2022), Lahlali et al. (2024), dan FAO/IPPC (2024)).

Di Indonesia, variabilitas iklim ekstrem seperti anomali curah hujan selama periode El Niño dan La Niña sangat memengaruhi dinamika organisme pengganggu tanaman. Peningkatan kelembapan udara selama musim hujan yang berkepanjangan memicu ledakan populasi hama dan penyakit pada tanaman hortikultura seperti cabai, yang berdampak langsung pada kesejahteraan ekonomi petani kecil akibat biaya pengendalian yang tinggi (Prilyscia *et al.,* 2018). Tanpa intervensi yang tepat, kombinasi antara cekaman abiotik (suhu dan kekeringan) serta tekanan biotik (hama dan penyakit) akan terus menurunkan kapasitas produksi nasional dan

meningkatkan kerentanan pangan di tingkat rumah tangga (Naik *et al.*, 2024; Rahma *et al.,* 2025).

Upaya mitigasi yang transformatif melalui strategi *Climate-Smart Agriculture* dan Pengendalian Hama Terpadu menjadi keharusan untuk membangun resiliensi sistem pertanian. Strategi ini mencakup penggunaan varietas unggul yang tahan terhadap cekaman ganda, konservasi musuh alami, serta pemanfaatan teknologi pemantauan cuaca presisi untuk deteksi dini wabah (Kabato *et al.,* 2025). Selain itu, inovasi dalam pemuliaan tanaman menggunakan teknologi modern diperlukan untuk mengembangkan kultivar yang memiliki mekanisme pertahanan alami lebih kuat terhadap serangan patogen invasif di masa depan *(*Kilmanun *et al.,* 2023).

11.3 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Tanaman Pangan Utama

11.3.1 Tanaman Padi

Padi merupakan tanaman pangan utama yang paling rentan terhadap variabilitas iklim karena ketergantungannya yang sangat tinggi pada ketersediaan pasokan air dan stabilitas suhu (Hultgren *et al.,* 2025). Perubahan iklim mengganggu siklus pertumbuhan padi secara sistemik, di mana kenaikan suhu rata-rata global mempercepat fase fenologi, sehingga periode pengisian malai menjadi lebih singkat (Janmohammadi dan Sabaghnia, 2023; Janni *et al.,* 2024). Hal ini berakibat pada penurunan bobot biji dan kualitas nutrisi gabah, yang pada gilirannya mengancam ketahanan pangan bagi miliaran populasi dunia yang bergantung pada padi sebagai sumber kalori primer (Cheah *et al.,* 2025; Hultgren *et al.*, 2025).

Secara fisiologis, padi sangat sensitif terhadap cekaman panas, terutama pada tahap pembungaan. Paparan suhu di atas ambang batas kritis dapat menyebabkan sterilitas serbuk sari, yang secara drastis menurunkan tingkat keberhasilan pembuahan dan hasil akhir panen (Naik *et al.,* 2024). Penelitian pada varietas spesifik, seperti IPB 4S, menunjukkan bahwa cekaman kekeringan yang berkepanjangan akibat anomali iklim menurunkan parameter pertumbuhan secara signifikan (Nasrudin dan Firmansyah, 2020). Tanpa langkah adaptasi yang efektif, hasil panen padi di berbagai wilayah diproyeksikan akan

terus mengalami degradasi seiring dengan meningkatnya frekuensi kejadian cuaca ekstrem pada dekade mendatang (Biswas et al., 2025).

Di Indonesia, tantangan utama bagi budi daya padi adalah fenomena *El Niño* dan *La Niña* yang mengacaukan kalender tanam nasional. *El Niño* sering kali menyebabkan kekeringan ekstrem yang memicu kegagalan panen luas, sementara *La Niña* meningkatkan risiko banjir serta serangan hama dan penyakit akibat kelembapan tinggi (Harahap *et al.,* 2023; Malau et al., 2023; Yuniasih et al., 2023). Data menunjukkan bahwa setiap kenaikan suhu sebesar 1°C yang diiringi perubahan curah hujan 5% dapat menurunkan produktivitas padi di Indonesia sebesar 0,33 ton/ha (Perdinan et al., 2019). Selain itu, kenaikan permukaan laut mengancam sawah di wilayah pesisir dengan risiko intrusi air asin, yang memaksa dilakukannya alih fungsi lahan atau adaptasi varietas tahan salin (Prilyscia et al., 2018; Sudarma dan As-syakur, 2018).

Upaya untuk menjaga keberlanjutan produksi padi di tengah ketidakpastian iklim berfokus pada inovasi teknologi dan manajemen lahan yang adaptif. Pengembangan "Padi Amfibi" yang mampu tumbuh optimal baik di lahan kering maupun sawah menjadi salah satu strategi krusial untuk mencapai swasembada pangan di wilayah dengan pasokan air tidak menentu (Konyep, 2020). Selain itu, penerapan *Climate-Smart Agriculture* melalui pengelolaan air presisi, pemupukan rendah karbon, dan penggunaan varietas unggul yang toleran terhadap cekaman abiotik sangat disarankan untuk menjaga stabilitas hasil sekaligus mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian (Begna dan Wakweya, 2026; Kabato et al., 2025).

11.3.2 Tanaman Jagung

Jagung (*Zea mays*) merupakan salah satu tanaman pangan paling strategis di dunia yang sangat sensitif terhadap perubahan parameter iklim, terutama suhu dan curah hujan (Khanna, 2018). Secara fisiologis, kenaikan suhu di atas ambang batas kritis (biasanya di atas 30°C) memicu respons pertahanan tanaman berupa penutupan stomata untuk mencegah kehilangan air melalui transpirasi (Khakwani et al., 2018). Namun, mekanisme

penyelamatan air ini secara bersamaan menghambat penyerapan dan mengganggu laju fotosintesis, yang pada akhirnya menurunkan akumulasi biomasa. Dampaknya sangat signifikan terhadap hasil akhir; penelitian memprediksi penurunan produksi jagung rata-rata sebesar 7,4% untuk setiap kenaikan suhu 1°C. Di beberapa wilayah seperti Afrika Selatan dan Tiongkok, cekaman panas yang ekstrem bahkan diproyeksikan dapat menurunkan produktivitas hingga 25-32% (Ocwa et al., 2023).

Di Indonesia, budi daya jagung menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi terhadap variabilitas iklim dibandingkan dengan tanaman pangan lainnya (Satriyabawa et al., 2023). Fenomena *El Niño* yang menyebabkan kekeringan berkepanjangan terbukti memberikan dampak negatif yang besar, dengan potensi kehilangan hasil produksi jagung nasional yang diperkirakan mencapai 13,6% (Prilyscia et al., 2018). Data historis menunjukkan bahwa komoditas jagung sering kali menjadi yang paling terdampak saat terjadi anomali iklim ekstrem; sebagai contoh, jagung mengalami penurunan produksi paling besar di wilayah Maluku saat El Niño 1997 (Satriyabawa et al., 2023). Sebaliknya, meskipun fenomena *La Niña* dapat meningkatkan penawaran melalui peningkatan curah hujan, kondisi ini tetap menuntut manajemen aliran air dan kesuburan tanah yang lebih intensif untuk mencegah penurunan kualitas biji (Melia et al., 2023).

Dampak perubahan iklim ini secara langsung merambah ke sektor ekonomi dan ketahanan pangan nasional. Penurunan luas panen jagung di sentra-sentra produksi seperti Jawa dan Sulawesi akibat gangguan iklim telah memicu fluktuasi harga domestik. Hal ini sangat kritikal mengingat sekitar 75% pasokan jagung nasional digunakan untuk industri pakan ternak (unggas dan sapi), sementara sisanya dialokasikan untuk pangan rumah tangga dan bahan baku industri makanan (Prasetyo et al., 2024). Selain itu, anomali iklim berdampak pada kesejahteraan petani melalui penurunan Nilai Tukar Petani jagung, yang cenderung menurun secara signifikan saat terjadi periode kekeringan ekstrem (Utami dan Hardyastuti, 2008).

Sebagai upaya mitigasi, transformasi menuju praktik pertanian yang tangguh iklim (*Climate-Smart Agriculture*) menjadi kunci keberlanjutan. Strategi utama meliputi pengembangan dan

penggunaan varietas jagung hibrida yang memiliki toleransi tinggi terhadap cekaman panas dan kekeringan melalui metode pemuliaan modern (Khakwani et al., 2018).

Selain itu, evaluasi kesesuaian lahan berbasis Sistem Informasi Geografis serta penyesuaian pola tanam yang presisi sangat diperlukan untuk meminimalkan risiko gagal panen di tingkat regional (Melia et al., 2023; Satriyabawa et al., 2023). Penguatan ekosistem jagung melalui kebijakan pendanaan dan infrastruktur irigasi yang memadai menjadi esensial untuk menjaga stabilitas produksi pangan di tengah ketidakpastian iklim masa depan (Begna dan Wakweya, 2026; Prasetyo et al., 2024).

11.3.3 Tanaman Gandum

Gandum merupakan salah satu komoditas pangan paling strategis di dunia yang sangat rentan terhadap anomali iklim, terutama peningkatan suhu dan kekeringan (Hultgren et al., 2025; Janni et al., 2024). Perubahan pola cuaca global mengancam stabilitas produksi gandum di wilayah-wilayah produsen utama, yang secara langsung berdampak pada ketersediaan kalori bagi populasi dunia (Naik et al., 2024). Tanpa upaya adaptasi yang sistemik, variabilitas iklim diproyeksikan akan terus menurunkan hasil panen gandum global, yang berisiko memicu krisis pangan dan kenaikan harga komoditas secara signifikan (Cheah et al., 2025; Qu et al., 2026).

Secara fisiologis, gandum mengalami tekanan berat akibat cekaman abiotik, terutama peningkatan suhu udara dan kekurangan air yang mengganggu proses fotosintesis serta metabolisme tanaman (Janmohammadi dan Sabaghnia, 2023). Peningkatan suhu selama fase kritis seperti pembungaan dan pengisian biji dapat menyebabkan penurunan bobot biji serta penurunan kualitas nutrisi gandum (Biswas et al., 2025; Naik et al., 2024). Selain itu, cuaca ekstrem seperti gelombang panas yang berkepanjangan dapat mempercepat fase penuaan daun, sehingga mengurangi akumulasi biomasa dan hasil akhir panen secara drastis (Biswas et al., 2025; Janmohammadi dan Sabaghnia, 2023).

Gangguan pada produksi gandum juga berdampak pada rantai pasok pangan global dan stabilitas ekonomi negara-negara pengimpor. Kejadian cuaca ekstrem di negara-negara produsen

besar telah terbukti mengganggu distribusi domestik maupun internasional, yang memperburuk kerentanan pangan di tingkat rumah tangga. Oleh karena itu, penerapan strategi *Climate-Smart Agriculture* melalui penggunaan varietas gandum yang toleran terhadap panas serta manajemen sumber daya air yang efisien menjadi sangat krusial untuk menjaga resiliensi sistem pangan masa depan (Begna dan Wakweya, 2026; Kabato et al., 2025).

11.4 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Ketahanan Pangan

Dampak perubahan iklim terhadap ketahanan pangan berkaitan erat dengan akses ekonomi masyarakat terhadap pangan. Ketika produksi menurun akibat gagal panen, harga pangan cenderung meningkat karena pasokan di pasar menjadi terbatas. Kondisi ini paling dirasakan oleh rumah tangga berpendapatan rendah karena sebagian besar pendapatan mereka digunakan untuk membeli bahan pangan pokok. FAO melaporkan bahwa isu kerawanan pangan tidak hanya dipengaruhi oleh ketersediaan pangan, tetapi juga oleh keterjangkauan pangan dan kemampuan masyarakat untuk mengakses pangan bergizi secara berkelanjutan (FAO et al., 2023). Oleh karena itu, perubahan iklim dapat memperbesar kesenjangan sosial, terutama antara kelompok masyarakat yang memiliki akses terhadap teknologi adaptasi dengan kelompok rentan yang bergantung pada pertanian tradisional.

Selain aspek ketersediaan dan akses, perubahan iklim juga memengaruhi pemanfaatan pangan atau food utilization. Penurunan produktivitas tanaman pangan sering kali diikuti oleh penurunan kualitas nutrisi hasil pertanian, terutama pada kondisi cekaman panas, kekeringan, dan peningkatan CO_2 atmosfer. Kondisi tersebut dapat mengubah kandungan protein, mineral, dan zat gizi mikro pada beberapa tanaman pangan. Dampak ini menjadi penting karena ketahanan pangan tidak hanya diukur dari cukupnya jumlah pangan, tetapi juga dari kualitas gizi yang dikonsumsi masyarakat. IPCC menegaskan bahwa perubahan iklim telah memengaruhi seluruh dimensi ketahanan pangan, yaitu ketersediaan, akses, pemanfaatan, dan stabilitas pangan (IPCC, 2019).

Stabilitas pangan menjadi dimensi lain yang sangat terdampak oleh perubahan iklim. Ketidakpastian musim menyebabkan produksi pangan menjadi sulit diprediksi dari tahun ke tahun. Pada tahun dengan curah hujan normal, produksi dapat berjalan baik, tetapi pada tahun El Niño atau La Niña, produksi dapat mengalami penurunan tajam akibat kekeringan atau banjir. Ketidakstabilan produksi ini menyebabkan pemerintah, petani, dan pelaku pasar menghadapi kesulitan dalam merencanakan cadangan pangan, distribusi, serta kebijakan harga. Dengan kata lain, perubahan iklim menciptakan ketidakpastian sistem pangan jangka panjang yang memerlukan tata kelola pangan yang lebih adaptif dan berbasis data.

Dalam konteks Indonesia, dampak perubahan iklim terhadap ketahanan pangan perlu dipahami secara lebih luas karena sebagian besar produksi pangan nasional masih sangat bergantung pada kondisi iklim. Padi, jagung, kedelai, dan berbagai tanaman pangan lainnya sangat dipengaruhi oleh ketersediaan air, suhu, dan intensitas serangan organisme pengganggu tanaman. Ketika pola musim berubah, petani menghadapi kesulitan dalam menentukan waktu tanam, memilih varietas, dan mengatur kebutuhan air. Kondisi ini dapat memicu penurunan indeks pertanaman, meningkatnya biaya produksi, dan menurunnya pendapatan petani. Apabila tidak diantisipasi, dampaknya dapat memperlemah ketahanan pangan nasional dan meningkatkan ketergantungan terhadap impor pangan.

Upaya menjaga ketahanan pangan di tengah perubahan iklim harus dilakukan melalui pendekatan terpadu. Strategi yang dapat diterapkan antara lain penguatan sistem peringatan dini iklim, penyediaan varietas toleran cekaman, perbaikan infrastruktur irigasi, penguatan cadangan pangan, serta peningkatan kapasitas petani dalam menerapkan teknologi adaptif. Selain itu, dukungan pembiayaan dan kebijakan pertanian yang berpihak kepada petani kecil sangat penting karena kelompok ini merupakan produsen pangan utama sekaligus kelompok yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim. World Bank menekankan bahwa Climate-Smart Agriculture perlu diarahkan untuk meningkatkan produktivitas, memperkuat ketahanan petani, dan menurunkan emisi dari sistem pangan secara bersamaan (World Bank, 2024).

Dengan demikian, perubahan iklim terhadap ketahanan pangan bukan hanya persoalan penurunan hasil tanaman, tetapi juga persoalan sistemik yang mencakup produksi, distribusi, akses, mutu gizi, stabilitas harga, dan kesejahteraan petani. Oleh karena itu, pembangunan sistem pangan ke depan harus mengintegrasikan aspek adaptasi iklim, inovasi teknologi, perlindungan petani, serta penguatan kelembagaan pangan. Tanpa upaya tersebut, perubahan iklim akan terus memperbesar risiko kerawanan pangan, terutama di wilayah tropis dan negara berkembang yang memiliki ketergantungan tinggi terhadap sektor pertanian.

11.5 Strategi Adaptasi Budi Daya Tanaman Pangan Terhadap Perubahan Iklim

Perubahan iklim yang ditandai dengan peningkatan suhu udara, ketidakpastian curah hujan, serta meningkatnya kejadian cuaca ekstrem menuntut adanya transformasi sistem pertanian menuju pola budi daya yang lebih adaptif dan berkelanjutan. Strategi adaptasi dalam sektor pertanian menjadi sangat penting untuk mengurangi risiko penurunan produksi pangan, menjaga stabilitas pendapatan petani, serta memperkuat ketahanan pangan nasional di tengah perubahan kondisi lingkungan yang semakin dinamis (Begna dan Wakweya, 2026; Kabato et al., 2025). Upaya adaptasi tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil produksi, tetapi juga pada kemampuan sistem pertanian untuk bertahan dan pulih dari gangguan iklim dalam jangka panjang.

Dalam praktiknya, strategi adaptasi dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan, seperti penggunaan varietas tanaman toleran cekaman, diversifikasi tanaman, pengelolaan air yang efisien, hingga pemanfaatan teknologi pertanian modern berbasis informasi iklim. Pendekatan tersebut perlu diterapkan secara terpadu karena setiap wilayah memiliki tingkat kerentanan iklim yang berbeda-beda, baik dari sisi ketersediaan air, kesuburan tanah, maupun ancaman organisme pengganggu tanaman (Perdinan et al., 2019; Naik et al., 2024). Selain itu, penerapan strategi adaptasi juga harus didukung oleh kebijakan pemerintah, penyediaan infrastruktur pertanian, serta peningkatan kapasitas petani agar teknologi dan inovasi yang

dikembangkan dapat diimplementasikan secara efektif di tingkat lapangan.

Di Indonesia, penguatan strategi adaptasi pertanian menjadi semakin penting karena sebagian besar sistem produksi pangan masih sangat bergantung pada kondisi iklim alami. Perubahan pola musim yang tidak menentu sering menyebabkan keterlambatan tanam, kekurangan air irigasi, hingga peningkatan serangan hama dan penyakit tanaman. Oleh sebab itu, pengembangan sistem pertanian tangguh iklim melalui pendekatan Climate-Smart Agriculture menjadi salah satu solusi utama untuk menjaga keberlanjutan produksi pangan nasional sekaligus meningkatkan kemampuan petani dalam menghadapi risiko perubahan iklim di masa depan (World Bank, 2024; Mutale et al., 2025).

11.5.1 Penggunaan Varietas Toleran

Penggunaan varietas tanaman yang toleran merupakan pilar utama dalam strategi *Climate-Smart Agriculture* untuk memitigasi dampak buruk perubahan iklim terhadap sistem pangan global (Begna dan Wakweya, 2026; Kabato et al., 2025). Varietas ini dikembangkan khusus untuk memiliki resiliensi tinggi terhadap cekaman abiotik ganda, seperti suhu ekstrem, kekeringan, dan salinitas, yang frekuensi kejadiannya terus meningkat dalam tiga dekade terakhir (Janni et al., 2024). Tanpa adopsi varietas yang adaptif, variabilitas iklim diproyeksikan akan menurunkan hasil panen global secara signifikan, di mana sekitar 18–43% varians hasil panen tanaman pangan utama sangat bergantung pada ekstremitas cuaca (Didukh, 2023; Hultgren et al., 2025).

Di Indonesia, pengembangan varietas padi toleran menjadi prioritas strategis untuk menjaga stabilitas produksi nasional. Varietas seperti IPB 4S telah menunjukkan kemampuan untuk mempertahankan parameter pertumbuhan yang stabil meskipun berada di bawah cekaman kekeringan yang bervariasi (Nasrudin dan Firmansyah, 2020). Selain itu, inovasi "Padi Amfibi" dari Balitbangtan memberikan keunggulan adaptif karena kemampuannya untuk tumbuh optimal baik di lahan sawah maupun lahan kering, memberikan fleksibilitas bagi petani dalam menghadapi pasokan air yang tidak menentu akibat fenomena El Niño dan La Niña (Konyep,

2020; Yuniasih et al., 2023). Penggunaan varietas berumur pendek juga menjadi langkah esensial untuk menyesuaikan jadwal tanam dengan pola curah hujan yang semakin tidak teratur (Susanto et al., 2023).

Selain padi, transformasi pada budi daya jagung difokuskan pada pemuliaan varietas hibrida yang tahan terhadap stres termal. Penelitian menunjukkan bahwa kenaikan suhu di atas ambang batas kritis dapat menurunkan hasil panen jagung rata-rata sebesar 7,4% untuk setiap 1°C kenaikan suhu global. Oleh karena itu, pengembangan ideotipe jagung yang mampu mempertahankan laju fotosintesis pada suhu tinggi menjadi kunci untuk menjaga pasokan pakan dan pangan nasional (Khakwani et al., 2018). Melalui penguatan ekosistem benih unggul, penggunaan varietas toleran ini diharapkan dapat menekan potensi kehilangan hasil produksi jagung akibat kekeringan ekstrem yang diproyeksikan mencapai 13,6% di beberapa wilayah Indonesia (Prasetyo et al., 2024; Prilyscia et al., 2018).

Secara lebih luas, integrasi varietas toleran ke dalam sistem produksi pangan bukan hanya tentang mempertahankan kuantitas hasil, tetapi juga kualitas nutrisi dan stabilitas ekonomi petani (Janmohammadi dan Sabaghnia, 2023; Rahma et al., 2025). Dukungan melalui teknologi pertanian presisi dan sistem pembiayaan berbasis prakiraan (*Forecast Based Financing*) sangat diperlukan untuk mempercepat adopsi benih unggul ini di tingkat lapangan (Kabato et al., 2025; Kilmanun et al., 2023). Dengan demikian, penggunaan varietas toleran menjadi instrumen vital dalam membangun sistem pangan yang lebih tangguh, berkelanjutan, dan mampu menjamin kedaulatan pangan di masa depan (Begna dan Wakweya, 2026).

11.5.2 Diversifikasi Tanaman

Diversifikasi tanaman merupakan salah satu strategi adaptasi paling efektif dalam kerangka *Climate-Smart Agriculture* untuk membangun resiliensi sistem pangan terhadap perubahan iklim (Begna dan Wakweya, 2026; Kabato et al., 2025). Berbeda dengan sistem monokultur yang sangat rentan terhadap kegagalan total akibat cekaman abiotik tunggal, diversifikasi melalui rotasi tanaman,

tumpang sari, dan polikultur dapat menyebarkan risiko serta meningkatkan stabilitas hasil di tengah fluktuasi cuaca ekstrem (Janmohammadi dan Sabaghnia, 2023; Janni et al., 2024). Praktik ini juga berperan penting dalam menjaga kesehatan tanah dan meningkatkan kapasitas penyerapan karbon, yang secara langsung berkontribusi pada mitigasi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian (Kabato et al., 2025).

Secara ekologis, diversifikasi tanaman menciptakan ekosistem pertanian yang lebih seimbang dan mampu menekan ledakan populasi organisme pengganggu tanaman yang sering dipicu oleh perubahan suhu. Penggunaan model agroekologi dan agroforestri, misalnya, mengombinasikan berbagai jenis tanaman pangan dengan tanaman tahunan untuk menciptakan iklim mikro yang lebih sejuk serta menjaga kelembapan tanah selama periode kekeringan (Budiastuti, 2020; Yulianto, 2016). Selain itu, diversifikasi genetik melalui penanaman berbagai varietas dalam satu lahan dapat meminimalkan dampak serangan patogen baru yang lebih agresif akibat pergeseran iklim (Naik et al., 2024).

Di Indonesia, penerapan rencana tata tanam yang terdiversifikasi menjadi sangat krusial bagi kelompok tani untuk beradaptasi dengan pergeseran musim hujan dan kemarau yang tidak menentu (Susanto et al., 2023). Strategi ini tidak hanya menjamin ketersediaan pangan yang lebih beragam di tingkat rumah tangga, tetapi juga memberikan stabilitas ekonomi bagi petani melalui sumber pendapatan yang tidak terpusat pada satu komoditas saja (Rahma et al., 2025). Dengan mengintegrasikan sistem informasi iklim ke dalam perencanaan tanam, diversifikasi menjadi instrumen vital dalam memperkuat ketahanan nasional dan mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan di tengah ketidakpastian iklim masa depan (Perdinan et al., 2019).

11.5.3 Pengelolaan Air yang Efisien

Pengelolaan air yang efisien merupakan strategi inti dalam kerangka *Climate-Smart Agriculture* untuk menjaga stabilitas produksi pangan di tengah ketidakpastian iklim global (Begna dan Wakweya, 2026; Kabato et al., 2025). Perubahan pola curah hujan yang ekstrem dan frekuensi kekeringan yang meningkat menuntut

adanya pergeseran dari manajemen air konvensional menuju sistem yang lebih presisi dan adaptif (Janmohammadi dan Sabaghnia, 2023; Qu et al., 2026). Tanpa tata kelola air yang efektif, degradasi lahan dan risiko gagal panen akibat cekaman air diproyeksikan akan terus meningkat, yang secara langsung mengancam ketahanan pangan baik di tingkat rumah tangga maupun nasional (Hultgren et al., 2025).

Dalam budi daya tanaman pangan utama seperti padi, penerapan teknik pengairan berselang atau *Alternate Wetting and Drying* terbukti efektif dalam mengoptimalkan penggunaan air sekaligus mengurangi emisi gas metana dari lahan sawah (Adetama et al., 2023). Selain itu, penggunaan irigasi tetes dan sistem irigasi presisi pada tanaman hortikultura memungkinkan petani untuk mempertahankan produktivitas tanaman dengan konsumsi air yang jauh lebih hemat (Kabato et al., 2025; Sudarma et al., 2024). Konservasi kelembapan tanah di tingkat lahan juga dapat diperkuat melalui praktik agroforestri dan penggunaan mulsa organik, yang secara alami mampu menjaga suhu tanah dan mengurangi laju evapotranspirasi selama periode panas ekstrem (Budiastuti, 2020; Susanto et al., 2023).

Di tingkat komunitas, pembangunan infrastruktur penampung air berskala mikro seperti embung, sumur gali, dan parit resapan menjadi sangat krusial bagi wilayah tadah hujan untuk menghadapi musim kemarau yang berkepanjangan (Perdinan et al., 2019; Susanto et al., 2023). Pemanfaatan teknologi digital melalui sistem pembiayaan berbasis prakiraan (*Forecast Based Financing*) dan pemetaan kesesuaian lahan berbasis Sistem Informasi Geografis membantu kelompok tani merencanakan tata tanam yang lebih bijak sesuai dengan ketersediaan air di tingkat regional (Kilmanun et al., 2023; Satriyabawa et al., 2023). Sinergi antara inovasi teknologi dan kebijakan manajemen sumber daya air yang kuat merupakan kunci utama dalam membangun resiliensi sistem pertanian yang berkelanjutan di masa depan (Perdinan et al., 2019).

11.5.4 Pemanfaatan Teknologi Pertanian Modern

Pemanfaatan teknologi digital menjadi salah satu strategi penting dalam adaptasi budi daya tanaman pangan terhadap perubahan iklim. Teknologi pertanian modern seperti pertanian

presisi, sensor tanah dan cuaca, drone, sistem informasi iklim, serta pemetaan berbasis Sistem Informasi Geografis dapat membantu petani memantau kondisi lahan secara lebih cepat dan akurat. Melalui teknologi tersebut, petani dapat memperoleh informasi mengenai kelembapan tanah, suhu, curah hujan, kesehatan tanaman, serta potensi serangan hama dan penyakit. Informasi ini sangat berguna untuk menentukan waktu tanam, kebutuhan irigasi, pemupukan, dan tindakan pengendalian organisme pengganggu tanaman secara lebih tepat (Kilmanun et al., 2023; Satriyabawa et al., 2023; Kabato et al., 2025).

Pemanfaatan teknologi pertanian modern merupakan elemen kunci dalam kerangka *Climate-Smart Agriculture* untuk membangun resiliensi sistem pangan terhadap dampak perubahan iklim global (Begna dan Wakweya, 2026; Kabato et al., 2025). Integrasi teknologi digital, seperti Sistem Informasi Geografis, memungkinkan pemetaan kesesuaian lahan secara presisi berdasarkan variabilitas iklim lokal, sehingga petani dapat menentukan jenis tanaman yang paling adaptif terhadap perubahan suhu dan curah hujan di wilayah mereka (Melia et al., 2023; Satriyabawa et al., 2023). Selain itu, penerapan mekanisme *Forecast Based Financing* yang berbasis pada prakiraan cuaca akurat membantu kelompok tani melakukan tindakan antisipatif dan mitigasi risiko sebelum bencana iklim terjadi (Kilmanun et al., 2023).

Inovasi bioteknologi melalui teknik pemuliaan modern (*modern breeding techniques*) juga memainkan peran vital dalam menciptakan varietas tanaman unggul yang toleran terhadap cekaman abiotik. Penggunaan teknologi genomik untuk mengembangkan varietas jagung hibrida atau padi yang tahan terhadap panas ekstrem dan kekeringan menjadi solusi strategis untuk menjaga stabilitas hasil panen (Khakwani et al., 2018). Kemampuan tanaman untuk mempertahankan laju fotosintesis pada suhu di atas ambang batas kritis sangat bergantung pada kemajuan teknologi pemuliaan ini, yang secara langsung memperkuat kedaulatan pangan nasional (Konyep, 2020).

Di tingkat operasional, teknologi pertanian presisi seperti sensor *Internet of Things* dan sistem irigasi otomatis memungkinkan pengelolaan sumber daya air dan nutrisi secara lebih efisien (Kabato

et al., 2025; Naik et al., 2024). Penggunaan *drone* untuk pemantauan kesehatan tanaman serta aplikasi kecerdasan buatan dalam pengendalian hama terpadu membantu petani mendeteksi serangan organisme pengganggu tanaman yang pola distribusinya berubah akibat pemanasan global (Sudarma et al., 2024). Dengan mengombinasikan data digital dan manajemen lahan yang cerdas, teknologi modern tidak hanya meningkatkan produktivitas tetapi juga berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian melalui efisiensi penggunaan input kimia (Kabato et al., 2025; Perdinan et al., 2019).

11.6 Prospek Pengembangan Sistem Pertanian Tangguh Iklim

Prospek pengembangan sistem pertanian tangguh iklim (*Climate-Resilient Agriculture*) kini menjadi fokus utama dalam upaya menjamin kedaulatan pangan di tengah anomali cuaca yang semakin ekstrem (Begna dan Wakweya, 2026; Kabato et al., 2025). Sistem ini tidak hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas, tetapi juga mengintegrasikan pilar adaptasi dan mitigasi guna menekan kerugian ekonomi akibat gagal panen yang dipicu oleh variabilitas iklim global (Hultgren et al., 2025; Qu et al., 2026). Dengan adopsi strategi *Climate-Smart Agriculture*, potensi penurunan hasil pangan global yang diproyeksikan dapat mencapai 15,8% dapat diminimalisir melalui pengelolaan sumber daya yang lebih efisien dan berkelanjutan (Biswas et al., 2025; Qu et al., 2026).

Secara teknis, prospek pengembangan sistem ini di Indonesia sangat bergantung pada percepatan inovasi biologis dan digital. Penggunaan varietas unggul yang memiliki toleransi tinggi terhadap cekaman panas dan kekeringan, seperti jagung hibrida modern dan "Padi Amfibi", menjadi instrumen vital dalam menjaga stabilitas hasil di lahan-lahan yang rentan terhadap perubahan pola hujan (KonSep, 2020). Selain itu, integrasi teknologi pertanian presisi melalui pemanfaatan Sistem Informasi Geografis untuk pemetaan kesesuaian lahan serta sistem peringatan dini berbasis cuaca (*Forecast Based Financing*) memberikan kepastian bagi petani dalam merencanakan kalender tanam yang lebih akurat sesuai dengan kondisi iklim regional (Kilmanun et al., 2023; Satriyabawa et al., 2023).

Implementasi sistem pertanian rendah karbon juga menjadi bagian integral dari prospek pertanian tangguh untuk jangka panjang. Evaluasi terhadap praktik budi daya menunjukkan bahwa metode pengairan yang efisien dan pengurangan input kimia tidak hanya menghemat sumber daya, tetapi juga signifikan dalam menurunkan emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian (Adetama et al., 2023). Penguatan ekosistem pertanian melalui kebijakan nasional yang mendukung infrastruktur irigasi, perlindungan asuransi, dan akses pasar sangat diperlukan untuk memastikan keberlanjutan sistem ini di tingkat lapangan (Perdinan et al., 2019). Dengan sinergi antara inovasi sains, teknologi, dan kebijakan yang kuat, sistem pertanian Indonesia memiliki peluang besar untuk tetap produktif menghadapi tantangan krisis iklim masa depan (Begna dan Wakweya, 2026).

11.7 Kesimpulan

Perubahan iklim memberikan dampak yang signifikan terhadap sistem budi daya tanaman pangan melalui berbagai mekanisme seperti peningkatan suhu udara, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya kejadian cuaca ekstrem. Dampak tersebut dapat menyebabkan penurunan produktivitas tanaman pangan serta mengancam ketahanan pangan global.

Upaya adaptasi melalui pengembangan varietas tahan, diversifikasi tanaman, pengelolaan air yang efisien, serta pemanfaatan teknologi pertanian modern menjadi langkah penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

Pengembangan sistem pertanian yang tangguh terhadap perubahan iklim menjadi kunci dalam menjaga keberlanjutan produksi pangan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

Adetama, D. S., Fauzi, A., Juanda, B., Hakim, D. B. (2023). Evaluasi pembangunan berkelanjutan dengan rendah karbon pada sektor pertanian padi. *TATALOKA, 25*(1), 50–69. https://doi.org/10.14710/tataloka.25.1.50-69.

Bajaj, K., Mehrabi, Z., Ramankutty, N. (2025). Exposure of global agricultural lands to extreme weather using CMIP6 projections of future climate. *Environmental Research Letters, 20*(12), 124077. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ae293c.

Budiastuti, M. T. S. (2020). Agroforestry as climate change mitigation. *Nusantara Science and Technology Proceedings*, 23–29. https://doi.org/10.11594/nstp.2020.0603

Begna, T., Wakweya, R. B. (2026). Mitigating climate change impacts on food security via climate-smart agriculture. *Plant Stress, 19*, 101152. https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.101152

Biswas, P., Kumar, A., Chaudhary, S. K., Kumar, V., Sharma, R. K. (2025). Crop production in a changing climate: Impacts and adaptive strategies. *International Journal of Research in Agronomy, 8*(1), 925–929. https://doi.org/10.33545/2618060X.2025.v8.i1m.2496

Cheah, I., Shimul, A. S., Rahman, M., Zlatevska, N. (2025). The effects of climate change on food intake, appetite and dietary choices: From current challenges to future practices. *Appetite, 217*, 108328. https://doi.org/10.1016/j.appet.2025.108328

Didukh, Y. P. (2023). *World of plants of Ukraine in aspect of the climate change*. Kyiv: Naukova Dumka. https://doi.org/10.15407/978-966-00-1868-6

Farooq, M. S., Uzair, M., Raza, A., Habib, M., Xu, Y., Yousuf, M., Yang, S. H., Ramzan Khan, M. (2022). Uncovering the research gaps to alleviate the negative impacts of climate change on food security: A review. *Frontiers in Plant Science, 13*, 927535. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.927535

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. Rome: FAO. https://doi.org/10.4060/cc3017en

FAO/IPPC. (2024). *Climate-change impacts on plant pests: A technical resource to support national plant protection organizations and regional plant protection organizations*. Food and Agriculture Organization of the United Nations/International Plant Protection Convention. https://doi.org/10.4060/cd1615en

Furtak, K., Wolińska, A. (2023). The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture: A review. *CATENA, 231*, 107378. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107378

Harahap, W. N., Yuniasih, B., Gunawan, S. (2023). Dampak La Nina 2021–2022 terhadap peningkatan curah hujan. *AGROISTA: Jurnal Agroteknologi, 7*(1), 26–32. https://doi.org/10.55180/agi.v7i1.364

Hultgren, A., Carleton, T., Delgado, M., Gergel, D. R., Greenstone, M., Houser, T., Hsiang, S., Jina, A., Kopp, R. E., Malevich, S. B., McCusker, K. E., Mayer, T., Nath, I., Rising, J., Rode, A., & Yuan, J. (2025). Impacts of climate change on global agriculture accounting for adaptation. *Nature, 642*(8068), 644–652. https://doi.org/10.1038/s41586-025-09085-w

IPCC. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* (P. R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change.

Janni, M., Maestri, E., Gullì, M., Marmiroli, M., Marmiroli, N. (2024). Plant responses to climate change, how global warming may impact on food security: A critical review. *Frontiers in Plant Science, 14*, 1297569. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1297569

Janmohammadi, M., Sabaghnia, N. (2023). Strategies to alleviate the unusual effects of climate change on crop production: A thirsty and warm future, low crop quality. A review. *Biologija, 69*(2), 121–133. https://doi.org/10.6001/biologija.2023.69.2.1

Kabato, W., Getnet, G. T., Sinore, T., Nemeth, A., Molnár, Z. (2025). Towards climate-smart agriculture: Strategies for sustainable agricultural production, food security, and greenhouse gas reduction. *Agronomy, 15*(3), 565. https://doi.org/10.3390/agronomy15030565

Khanna, V. K. (2018). Effect of maize production in a changing climate: Its impacts, adaptation, and mitigation strategies through breeding. In V. K. Khanna (Ed.), *Biotechnology for improving nutritional quality of food crops* (pp. 1–25). Wiley Blackwell. https://doi.org/10.1002/9781119287569.ch1

Khakwani, K., Rafique, M., Malhi, A. R., Altaf, M., Saleem, S., Arshad, M. (2018). Maize ideotype breeding for changing environmental conditions. African Journal of Agricultural Research, 13(11), 512–517. https://doi.org/10.5897/AJAR2018.12897

Kilmanun, J. C., Prahardini, P. E. R., Anita, S. O., Sutoto, A., Prabowo, J., Saptana, Wahyono, E., Putri, R. L. (2023). Forecast based financing for precision agriculture in Indonesia. *BIO Web of Conferences, 69*, 04021. https://doi.org/10.1051/bioconf/20236904021

Konyep, S. (2020). Upaya pencapaian swasembada pangan melalui membumikan padi amfibi Balitbangtan di Provinsi Papua Barat. *Jurnal Triton, 11*(2), 32–41. https://doi.org/10.47687/jt.v11i2.115

Lahlali, R., Taoussi, M., Laasli, S.-E., Gachara, G., Ezzouggari, R., Belabess, Z., Aberkani, K., Assouguem, A., Meddich, A., El Jarroudi, M., Ait Barka, E. (2024). Effects of climate change on plant pathogens and host-pathogen interactions. *Crop and Environment, 3*(3), 159–171. https://doi.org/10.1016/j.crope.2024.05.003

Malau, L. R. E., Rambe, K. R., Ulya, N. A., Purba, A. G. (2023). Dampak perubahan iklim terhadap produksi tanaman pangan di Indonesia. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan, 23*(1), 34–46.

Melia, F., Aldian, F. M., Pahlevi, M. S. F., Risqullah, R. N. I., Oktaffiani, S. (2023). Peran pemerintah dalam meningkatkan volume ekspor jagung. *Jurnal Economina, 2*(1), 269–284. https://doi.org/10.55681/economina.v2i1.287

Mutale, B., Dai, S., Chen, Z., Maulu, S. (2025). Enhancing food security amid climate change: Assessing impacts and developing adaptive strategies. *Cogent Food and Agriculture, 11*(1), 2519800. https://doi.org/10.1080/23311932.2025.2519800

Naik, A., Jogi, M., Shreenivas, B. V. (2024). Assessing the impact of climate change on global crop yields and farming practices. *Archives of Current Research International, 24*(5), 696–712. https://doi.org/10.9734/acri/2024/v24i5743

Nasrudin, N., Firmansyah, E. (2020). Analisis pertumbuhan tanaman padi varietas IPB 4S pada media tanam dengan tingkat cekaman kekeringan berbeda. *Jurnal Galung Tropika, 9*(2), 154–162. https://doi.org/10.31850/jgt.v9i2.604

Ocwa, A., Ojara, M., Wanyama, R. (2023). A bibliographic review of climate change and fertilization as the main drivers of maize yield: Implications for food security. *African Journal of Agricultural Research, 19*(2), 171–181. https://doi.org/10.5897/AJAR2022.16278

Perdinan, P., Atmaja, T., Adi, R. F., Estiningtyas, W. (2019). Adaptasi perubahan iklim dan ketahanan pangan: Telaah inisiatif dan kebijakan. *Jurnal Hukum Lingkungan Indonesia, 5*(1), 60–87. https://doi.org/10.38011/jhli.v5i1.75

Prilyscia, A., Soemarno, Suryadi, A. (2018). Hubungan alih fungsi lahan dan perubahan iklim terhadap hasil komoditas pertanian di Kabupaten Jombang. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan, 5*(2), 857–864.

Prasetyo, R., Suryana, A., Haryanto, T. (2024). Penguatan ekosistem jagung: Isu, tantangan, dan kebijakan. *Forum Penelitian Agro Ekonomi, 42*(1), 1–16. https://doi.org/10.21082/fae.v42n1.2024.1-16

Qu, L., Zhang, Y., Liu, X., Li, Y. (2026). Impacts of climate adaptation on food production and environmental sustainability across metacoupling systems. *npj Sustainable Agriculture, 4*, 20. https://doi.org/10.1038/s44264-026-00129-w

Rahma, S., Haslindah, H., Muis, M. (2025). Dampak perubahan iklim terhadap produktivitas pertanian dan kesejahteraan petani Muslim Bugis di Desa Ulaweng Riaja Kabupaten Bone. *Indonesian Journal of Intellectual Publication, 5*(3), 257–266. https://doi.org/10.51577/ijipublication.v5i3.710

Satriyabawa, I. K. M., Lanya, I., Sardiana, I. K. (2023). Pemetaan kesesuaian dan variabilitas iklim untuk tanaman jagung berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) di Provinsi Bali. *Agrotrop: Journal on Agriculture Science, 13*(1), 13–26. https://doi.org/10.24843/AJoAS.2023.v13.i01.p02

Sudarma, I. M., As-syakur, A. R. (2018). Dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian di Provinsi Bali. *SOCA: Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian, 12*(1), 87–98.

Sudarma, I. M., Arisena, G. M. K., As-syakur, A. R. (2024). Mitigation and adaptation of chili farmers to climate change in Baturiti District, Bali Province, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1314*(1), 012021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1314/1/012021

Susanto, D., Nareswari, A. H. P., Ristiyawati, A., Rahardjo, T. P. (2023). Rencana tata tanam Kelompok Tani Sumber Rejeki Kecamatan Durenan Kabupaten Trenggalek. *JATIMAS: Jurnal Pertanian dan Pengabdian Masyarakat, 3*(2), 99–108. https://doi.org/10.30737/jatimas.v3i2.5112

Uddin, M. E., Kebreab, E. (2020). Review: Impact of food and climate change on pastoral industries. *Frontiers in Sustainable Food Systems, 4*, 543403. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.543403

Utami, A. W., Jamhari, J., Hardyastuti, S. (2011). El Nino, La Nina, dan penawaran pangan di Jawa, Indonesia. *Jurnal Ekonomi Pembangunan, 12*(2), 257–271. https://doi.org/10.23917/jep.v12i2.197

Wang, B.-X., Hof, A. R., Ma, C.-S. (2022). Impacts of climate change on crop production, pests and pathogens of wheat and rice. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 9*(1), 4–18. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021432

World Bank. (2024). *Climate-smart agriculture: From knowledge to implementation*. World Bank Group.

https://www.worldbank.org/en/results/2024/12/05/climate-smart-agriculture-from-knowledge-to-implementation
Yulianto, K. (2016). Agroekologi: Model pertanian berkelanjutan masa depan. *Jurnal Tambora, 1*(3), 46–51. https://doi.org/10.36761/jt.v1i3.142
Yuniasih, B., Harahap, W. N., Wardana, D. A. S. (2023). Anomali iklim El Nino dan La Nina di Indonesia pada 2013–2022. *AGROISTA: Jurnal Agroteknologi, 6*(2), 136–143. https://doi.org/10.55180/agi.v6i2.332

BAB 12
PELUANG DAN TANTANGAN BUDIDAYA TANAMAN PANGAN DI MASA DEPAN

Budidaya tanaman pangan merupakan sektor strategis yang menentukan keberlanjutan ketahanan pangan, stabilitas ekonomi, dan kesejahteraan masyarakat. Pada masa depan, sektor ini menghadapi dinamika yang semakin kompleks akibat pertumbuhan populasi, perubahan iklim, degradasi sumber daya alam, urbanisasi, transformasi digital, serta perubahan pola konsumsi masyarakat global. Organisasi Pangan dan Pertanian Dunia (FAO) menegaskan bahwa sistem pangan masa depan harus mampu memenuhi kebutuhan pangan dunia yang terus meningkat dengan tetap menjaga keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan sosial.

Menurut FAO (2022), transformasi sistem agrifood menjadi lebih efisien, inklusif, tangguh, dan berkelanjutan merupakan kebutuhan mendesak dalam menghadapi tantangan global abad ke-21 (FAO, 2022). Dalam konteks tersebut, budidaya tanaman pangan tidak lagi dipandang sekadar aktivitas produksi primer, tetapi sebagai bagian dari sistem agribisnis modern yang terintegrasi dengan teknologi, pasar, kebijakan, dan lingkungan.

Budidaya tanaman pangan masa depan juga ditandai oleh perubahan paradigma dari pertanian konvensional menuju pertanian presisi, pertanian digital, dan pertanian cerdas iklim (*Climate Smart Agriculture*/CSA). Perubahan ini dipicu oleh kebutuhan untuk meningkatkan produktivitas secara berkelanjutan di tengah keterbatasan lahan, air, dan tenaga kerja pertanian. Oleh karena itu, mahasiswa sebagai calon akademisi, peneliti, dan praktisi pertanian perlu memahami secara komprehensif peluang dan

tantangan yang akan dihadapi sektor budidaya tanaman pangan pada masa depan.

12.1 Pengertian Budidaya Tanaman Pangan

Budidaya tanaman pangan adalah seluruh kegiatan pengelolaan sumber daya hayati untuk menghasilkan bahan pangan utama manusia seperti padi, jagung, gandum, kedelai, ubi, dan berbagai serealia maupun umbi-umbian. Menurut Soemarno (2021), budidaya tanaman pangan merupakan sistem produksi biologis yang memanfaatkan interaksi antara tanah, air, iklim, tanaman, dan manusia untuk menghasilkan produk pangan secara ekonomis dan berkelanjutan (Soemarno, 2021).

Sementara itu, FAO (2022) mendefinisikan budidaya tanaman pangan sebagai bagian dari agrifood systems yang mencakup proses produksi, pengolahan, distribusi, konsumsi, hingga pengelolaan limbah pangan (FAO, 2022). Definisi tersebut menunjukkan bahwa pertanian modern tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil panen, tetapi juga memperhatikan keberlanjutan lingkungan dan efisiensi rantai pasok.

12.2 Pengertian Budidaya Tanaman Pangan

Perkembangan teknologi dan meningkatnya tekanan terhadap sumber daya alam menyebabkan terjadinya transformasi paradigma pertanian. Pertanian tradisional yang mengandalkan tenaga manusia dan pengalaman empiris perlahan berubah menjadi pertanian modern berbasis ilmu pengetahuan dan teknologi.

Transformasi tersebut ditandai oleh beberapa karakteristik berikut:

1. Mekanisasi pertanian.
2. Digitalisasi sistem produksi.
3. Penggunaan sensor dan *Internet of Things* (IoT).
4. Pertanian presisi berbasis data.
5. Integrasi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*).
6. Pengembangan varietas unggul tahan cekaman.
7. Penguatan sistem pertanian berkelanjutan.

Menurut Wolfert *et al.* (2021), smart farming merupakan konsep pertanian masa depan yang menggunakan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi produksi, pengambilan keputusan, dan keberlanjutan sistem pertanian (Wolfert *et al.* 2021).

12.3 Revolusi Pertanian 4.0

Konsep Agriculture 4.0 muncul sebagai dampak Revolusi Industri 4.0 yang ditandai oleh integrasi teknologi digital dalam sektor pertanian. Revolusi ini melibatkan pemanfaatan big data, cloud computing, robotika, drone, machine learning, dan sistem informasi geografis.

Pertanian 4.0 memiliki beberapa tujuan utama:

1. Meningkatkan efisiensi penggunaan input produksi.
2. Mengurangi kehilangan hasil.
3. Meningkatkan produktivitas lahan.
4. Mengoptimalkan pengelolaan air dan pupuk.
5. Mengurangi dampak lingkungan.
6. Memperkuat ketahanan pangan.

Menurut Liakos *et al.* (2022), penerapan machine learning dalam pertanian memungkinkan prediksi hasil panen, identifikasi penyakit tanaman, serta pengambilan keputusan secara real time (Liakos *et al.*, 2022).

Selain itu, penggunaan drone dan citra satelit membantu pemantauan kesehatan tanaman secara lebih akurat dibandingkan metode konvensional. Teknologi tersebut mampu mendeteksi kekurangan unsur hara, serangan hama, dan kondisi kekeringan lebih dini.

12.4 Digitalisasi Budidaya Tanaman Pangan

Konsep Agriculture 4.0 muncul sebagai dampak Revolusi Industri 4.0 yang ditandai oleh integrasi teknologi digital dalam sektor pertanian. Revolusi ini melibatkan pemanfaatan big data, cloud computing, robotika, drone, machine learning, dan sistem informasi geografis.

Digitalisasi pertanian menjadi salah satu pilar utama pertanian masa depan. Menurut World Bank (2021), digital agriculture

merupakan pemanfaatan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan akses pasar sektor pertanian (World Bank, 2021).

Digitalisasi budidaya tanaman pangan meliputi:

1. *Precision Farming*
   Precision farming adalah sistem budidaya yang memanfaatkan data spasial dan sensor untuk mengatur penggunaan input secara tepat. Teknologi ini memungkinkan pemberian pupuk, air, dan pestisida sesuai kebutuhan spesifik tanaman.
2. *Internet of Things* (IoT)
   IoT memungkinkan perangkat pertanian saling terhubung dan mengirimkan data secara otomatis. Sensor tanah dapat mengukur kelembapan, suhu, pH, dan kandungan unsur hara secara real time.
3. *Artificial Intelligence* (AI)
   AI digunakan untuk menganalisis data pertanian dalam jumlah besar sehingga mampu membantu prediksi cuaca, serangan hama, dan produktivitas tanaman.
4. *Blockchain* Pertanian
   Blockchain digunakan untuk meningkatkan transparansi rantai pasok pangan melalui sistem pelacakan produk dari lahan hingga konsumen.

12.5 Dampak Transformasi Pertanian terhadap Ketahanan Pangan

Transformasi budidaya tanaman pangan memberikan dampak signifikan terhadap ketahanan pangan global. Menurut OECD-FAO, (2022), peningkatan efisiensi produksi menjadi kunci dalam memenuhi kebutuhan pangan dunia yang diproyeksikan meningkat hingga tahun 2050 (OECD-FAO, 2022).

Pertanian modern memungkinkan:

1. Peningkatan hasil produksi.
2. Pengurangan kehilangan pascapanen.
3. Efisiensi penggunaan air.
4. Peningkatan kualitas produk.
5. Stabilitas pasokan pangan.

Namun demikian, transformasi ini juga menghadirkan tantangan berupa kesenjangan teknologi, rendahnya literasi digital petani, dan tingginya biaya investasi teknologi.

12.6 Tantangan Global Budidaya Tanaman Pangan Di Masa Depan

12.6.1 Perubahan Iklim dan Ketidakpastian Produksi

Perubahan iklim merupakan tantangan terbesar bagi budidaya tanaman pangan masa depan. *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) menjelaskan bahwa peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya kejadian cuaca ekstrem berdampak langsung terhadap produktivitas tanaman pangan.

Perubahan iklim menyebabkan:

1. Kekeringan berkepanjangan.
2. Banjir dan genangan.
3. Perubahan musim tanam.
4. Peningkatan serangan organisme pengganggu tanaman.
5. Penurunan kesuburan tanah.
6. Penurunan produktivitas hasil.

Menurut Lipper *et al.* (2021), sektor pertanian harus bertransformasi menuju sistem Climate Smart Agriculture (CSA) agar mampu beradaptasi terhadap perubahan iklim (Lipper *et al.*, 2021).

CSA memiliki tiga tujuan utama:

1. Meningkatkan produktivitas pertanian.
2. Memperkuat adaptasi terhadap perubahan iklim.
3. Mengurangi emisi gas rumah kaca.

12.6.2 Degradasi Lahan dan Krisis Sumber Daya Alam

Degradasi lahan menjadi ancaman serius bagi produksi pangan global. Intensifikasi pertanian yang tidak terkendali menyebabkan erosi, penurunan bahan organik tanah, salinisasi, dan pencemaran lingkungan.

Menurut FAO (2022), lebih dari sepertiga lahan pertanian dunia mengalami degradasi sedang hingga berat (FAO, 2022).

Kondisi ini mengurangi kemampuan lahan dalam mendukung produktivitas tanaman pangan.

Selain itu, ketersediaan air irigasi juga semakin terbatas akibat meningkatnya kebutuhan domestik dan industri. Krisis air diperkirakan akan menjadi faktor pembatas utama produksi pangan masa depan.

12.6.3 Alih Fungsi Lahan Pertanian

Urbanisasi dan pembangunan infrastruktur menyebabkan penyusutan luas lahan pertanian produktif. Alih fungsi lahan sawah menjadi kawasan industri dan permukiman menurunkan kapasitas produksi pangan nasional.

Di Indonesia, konversi lahan pertanian menjadi ancaman serius terhadap ketahanan pangan. Menurut berbagai kajian Kementerian Pertanian, laju alih fungsi lahan sawah masih cukup tinggi terutama di wilayah perkotaan dan kawasan industri.

12.6.4 Menurunnya Minat Generasi Muda terhadap Pertanian

Regenerasi petani menjadi persoalan penting dalam pembangunan pertanian masa depan. Banyak generasi muda memandang sektor pertanian kurang menjanjikan secara ekonomi. Faktor penyebab rendahnya minat generasi muda antara lain:

1. Pendapatan petani relatif rendah.
2. Citra pertanian dianggap tradisional.
3. Tingginya risiko usaha tani.
4. Terbatasnya akses modal.
5. Kurangnya inovasi teknologi di pedesaan.

Padahal, masa depan pertanian membutuhkan sumber daya manusia yang adaptif terhadap teknologi digital.

12.2.5 Ketergantungan terhadap Input Kimia

Penggunaan pupuk dan pestisida kimia secara berlebihan menimbulkan berbagai dampak negatif, antara lain:

1. Penurunan kualitas tanah.
2. Pencemaran air.
3. Resistensi hama.

4. Penurunan biodiversitas.
5. Risiko kesehatan manusia.

Menurut Rakshit *et al.* (2022), sistem pertanian masa depan harus mengurangi ketergantungan terhadap input sintetis melalui pendekatan agroekologi dan pertanian organik (Rakshit *et al.*, 2022).

12.6.6 Ketidakstabilan Pasar dan Rantai Pasok

Globalisasi menyebabkan sistem pangan semakin rentan terhadap fluktuasi harga dan gangguan rantai pasok. Pandemi COVID-19 menunjukkan bahwa distribusi pangan global dapat terganggu akibat pembatasan mobilitas dan krisis logistik.
Ketidakstabilan pasar berdampak pada:

1. Penurunan pendapatan petani.
2. Kenaikan harga pangan.
3. Ketidakpastian produksi.
4. Menurunnya akses pangan masyarakat.

12.7 Peluang Inovasi Dan Teknologi Dalam Budidaya Tanaman Pangan

12.7.1 Pengembangan Varietas Unggul

Pemuliaan tanaman menjadi peluang besar dalam meningkatkan produktivitas tanaman pangan masa depan. Varietas unggul dikembangkan untuk memiliki:

1. Potensi hasil tinggi.
2. Ketahanan terhadap kekeringan.
3. Ketahanan terhadap salinitas.
4. Ketahanan terhadap hama dan penyakit.
5. Efisiensi penggunaan pupuk.

Teknologi bioteknologi modern seperti marker-assisted selection dan gene editing mempercepat proses pemuliaan tanaman.

Menurut Emerick *et al.* (2021), inovasi varietas tahan cekaman iklim mampu meningkatkan stabilitas produksi dan mengurangi risiko gagal panen (Emerick *et al.*, 2021).

12.7.2 Pertanian Presisi

Pertanian presisi memungkinkan pengelolaan lahan berdasarkan kebutuhan spesifik tanaman dan kondisi lingkungan. Teknologi ini menggunakan:

1. Drone
2. Sensor tanah
3. GPS
4. Sistem informasi geografis
5. Data satelit

Pertanian presisi memberikan berbagai keuntungan:

1. Efisiensi penggunaan pupuk
2. Penghematan air
3. Pengurangan biaya produksi
4. Peningkatan hasil panen
5. Pengurangan dampak lingkungan.

12.7.3 *Smart Farming* dan *Internet of Things*

Smart farming merupakan integrasi teknologi digital dalam sistem budidaya tanaman pangan. Menurut Balabaygloo *et al.* (2023), *smart connected farming* memungkinkan petani mengambil keputusan berbasis data secara cepat dan akurat (Balabaygloo *et al.*, 2023).

Contoh penerapan smart farming meliputi:

1. Sensor kelembapan tanah otomatis
2. Irigasi pintar
3. Monitoring tanaman berbasis aplikasi
4. Prediksi cuaca digital
5. Pengendalian hama berbasis AI.

12.7.4 Urban Farming dan Vertical Farming

Keterbatasan lahan mendorong berkembangnya urban farming dan vertical farming. Sistem ini memungkinkan produksi pangan di wilayah perkotaan menggunakan ruang terbatas.

Vertical farming memiliki beberapa keunggulan:

1. Hemat lahan
2. Produksi sepanjang tahun

3. Efisiensi air
4. Pengurangan penggunaan pestisida
5. Dekat dengan konsumen

Namun, sistem ini memerlukan investasi dan energi yang cukup tinggi.

12.7.5 Penguatan *Agripreneurship*

Budidaya tanaman pangan masa depan tidak hanya berfokus pada produksi, tetapi juga kewirausahaan pertanian. Konsep agripreneurship mendorong petani menjadi pelaku usaha yang inovatif dan berorientasi pasar.

Menurut World Economic Forum (2023) digital agripreneurship membuka peluang besar bagi generasi muda untuk mengembangkan bisnis pertanian berbasis teknologi (World Economic Forum, 2023).

Peluang usaha pertanian modern meliputi:

1. Startup pertanian digital
2. E-commerce produk pangan
3. Penyedia jasa drone pertanian
4. Produksi benih unggul
5. Konsultan *smart farming*.

12.7.6 Big Data dan *Artificial Intelligence*

Big data menjadi sumber informasi penting dalam pertanian modern. Data yang dikumpulkan dari sensor, drone, dan citra satelit dapat dianalisis menggunakan AI.

Penggunaan AI dalam pertanian meliputi:

1. Prediksi produktivitas
2. Analisis kesuburan tanah
3. Deteksi penyakit tanaman
4. Optimasi jadwal tanam
5. Prediksi harga pasar

Teknologi ini meningkatkan akurasi pengambilan keputusan dan efisiensi produksi.

12.8 Pertanian Berkelanjutan Dan Ketahanan Pangan Masa Depan

12.8.1 Konsep Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan merupakan sistem pertanian yang mampu memenuhi kebutuhan pangan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang.

Menurut FAO, pertanian berkelanjutan memiliki tiga dimensi utama:

1. Keberlanjutan ekonomi.
2. Keberlanjutan sosial.
3. Keberlanjutan lingkungan.

Pertanian berkelanjutan menekankan efisiensi penggunaan sumber daya, konservasi lingkungan, dan peningkatan kesejahteraan petani.

12.8.2 *Climate Smart Agriculture* (CSA)

CSA menjadi pendekatan penting dalam menghadapi perubahan iklim. Pendekatan ini mengintegrasikan:

1. Adaptasi iklim.
2. Mitigasi emisi.
3. Ketahanan pangan.

Praktik CSA meliputi:

1. Penggunaan varietas tahan kekeringan
2. Sistem tanam hemat air
3. Pengelolaan tanah konservasi
4. Agroforestri.
5. Diversifikasi tanaman.

Menurut penelitian terbaru di Indonesia, adopsi CSA meningkatkan ketahanan pangan rumah tangga petani dan mengurangi risiko produksi.

12.8.3 Agroekologi dan Pertanian Organik

Agroekologi menekankan penggunaan prinsip ekologi dalam sistem pertanian. Pendekatan ini bertujuan mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal.

Prinsip agroekologi meliputi:

1. Diversifikasi tanaman.
2. Daur ulang bahan organik.
3. Pengendalian hayati.
4. Konservasi tanah dan air.
5. Integrasi tanaman dan ternak.

Sementara itu, pertanian organik berkembang karena meningkatnya kesadaran masyarakat terhadap keamanan pangan dan kesehatan lingkungan.

12.8.4 Efisiensi Energi dan Pertanian Rendah Karbon

Pertanian masa depan dituntut mampu menurunkan emisi gas rumah kaca. Sektor pertanian merupakan salah satu penyumbang emisi melalui penggunaan pupuk nitrogen, pembakaran lahan, dan aktivitas peternakan.

Konsep pertanian rendah karbon meliputi:

1. Penggunaan energi terbarukan
2. Pengurangan pupuk sintetis
3. Pengelolaan limbah pertanian
4. Sistem pertanian konservasi.

Penelitian Ernanda *et al.* (2022) menunjukkan pentingnya pengukuran jejak karbon sektor pertanian dalam mendukung target penurunan emisi (Ernanda *et al.*, 2022).

12.8.5 Ketahanan Pangan dan Kemandirian Pangan

Ketahanan pangan adalah kondisi terpenuhinya pangan yang cukup, aman, bergizi, dan terjangkau bagi seluruh masyarakat.

Menurut FAO (2023), ketahanan pangan memiliki empat dimensi:

1. Ketersediaan pangan
2. Akses pangan.

3. Pemanfaatan pangan.
4. Stabilitas pangan.

Budidaya tanaman pangan masa depan harus mendukung kemandirian pangan nasional melalui:

1. Peningkatan produksi lokal.
2. Diversifikasi pangan.
3. Penguatan cadangan pangan.
4. Pengembangan pangan lokal.

12.8.6 Peran Kebijakan dalam Pertanian Berkelanjutan

Pemerintah memiliki peran penting dalam mendukung transformasi pertanian masa depan melalui:

1. Subsidi teknologi pertanian.
2. Perlindungan lahan pertanian.
3. Penguatan riset dan inovasi.
4. Pendidikan dan penyuluhan.
5. Pembangunan infrastruktur pertanian.

Kebijakan yang tepat akan mempercepat adopsi teknologi dan meningkatkan daya saing sektor pertanian.

12.9 Strategi Dan Arah Pengembangan Budidaya Tanaman Pangan Masa Depan

12.9.1 Penguatan Sumber Daya Manusia Pertanian

Sumber daya manusia menjadi faktor utama keberhasilan transformasi pertanian. Pendidikan dan pelatihan pertanian modern perlu ditingkatkan agar petani mampu mengadopsi teknologi baru. Strategi pengembangan SDM meliputi:

1. Pendidikan vokasi pertanian
2. Pelatihan digital farming
3. Penguatan penyuluhan pertanian
4. Regenerasi petani muda

12.9.2 Integrasi Teknologi dan Kearifan Lokal

Pengembangan pertanian masa depan perlu mengintegrasikan teknologi modern dengan kearifan lokal

masyarakat. Sistem pertanian tradisional memiliki nilai konservasi yang penting.
Integrasi ini bertujuan:

1. Menjaga keberlanjutan lingkungan
2. Mempertahankan biodiversitas local
3. Meningkatkan penerimaan teknologi
4. Mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal.

12.9.3 Penguatan Sistem Riset dan Inovasi

Riset pertanian menjadi fondasi dalam menghadapi tantangan masa depan. Perguruan tinggi dan lembaga penelitian memiliki peran strategis dalam menghasilkan inovasi.
Fokus riset masa depan meliputi:

1. Varietas tahan iklim ekstrem
2. Teknologi hemat air
3. Sistem pertanian digital
4. Pertanian rendah karbon
5. Pengendalian hayati

12.5.4 Penguatan Kelembagaan dan Kemitraan

Kelembagaan petani perlu diperkuat agar mampu bersaing dalam sistem agribisnis modern. Kelompok tani dan koperasi dapat meningkatkan posisi tawar petani.
Kemitraan dengan sektor swasta juga penting dalam:

1. Transfer teknologi
2. Akses pasar
3. Pembiayaan pertanian
4. Pengembangan rantai pasok

12.9.5 Pengembangan Pertanian Berbasis Data

Pertanian masa depan akan semakin bergantung pada data. Oleh karena itu, pengembangan database pertanian nasional menjadi sangat penting.
Data pertanian digunakan untuk:

1. Prediksi produksi
2. Pengambilan kebijakan
3. Deteksi dini bencana

4. Pengelolaan distribusi pangan

12.9.6 Prospek Budidaya Tanaman Pangan Masa Depan

Meskipun menghadapi berbagai tantangan, budidaya tanaman pangan memiliki prospek yang sangat besar pada masa depan. Kebutuhan pangan dunia yang terus meningkat akan membuka peluang pasar yang luas.

Beberapa tren masa depan sektor pangan antara lain:

1. Pertanian digital
2. Pangan fungsional
3. Pertanian urban
4. Pertanian rendah karbon
5. Bioekonomi pertanian
6. Sistem pangan berkelanjutan.

Mahasiswa dan generasi muda memiliki peran strategis dalam mendorong inovasi dan transformasi pertanian masa depan.

12.5.7 Transformasi Digital dalam Penyuluhan Pertanian

Transformasi digital tidak hanya memengaruhi sistem produksi pertanian, tetapi juga mengubah pola penyuluhan dan pendampingan petani. Pada masa lalu, penyuluhan pertanian dilakukan secara konvensional melalui tatap muka langsung antara penyuluh dan petani. Namun, perkembangan teknologi informasi memungkinkan proses transfer pengetahuan dilakukan secara lebih cepat, luas, dan efisien.

Digitalisasi penyuluhan pertanian dilakukan melalui berbagai media seperti:

1. Aplikasi pertanian berbasis smartphone
2. Platform e-learning pertanian
3. Video edukasi pertanian
4. Webinar dan pelatihan daring
5. Sistem informasi pertanian digital
6. Media sosial pertanian

Keberadaan aplikasi digital membantu petani memperoleh informasi mengenai harga pasar, prakiraan cuaca, rekomendasi

pemupukan, teknik budidaya, hingga pengendalian organisme pengganggu tanaman. Teknologi ini sangat membantu terutama bagi petani muda yang lebih adaptif terhadap penggunaan perangkat digital.

Menurut berbagai studi pembangunan pertanian modern, penyuluhan berbasis digital mampu meningkatkan efisiensi distribusi informasi dan mempercepat adopsi inovasi teknologi pertanian. Selain itu, sistem digital memungkinkan komunikasi dua arah antara petani, peneliti, akademisi, pemerintah, dan pelaku agribisnis.

Meski demikian, transformasi digital dalam penyuluhan pertanian masih menghadapi berbagai kendala, antara lain:

1. Keterbatasan akses internet di wilayah pedesaan
2. Rendahnya literasi digital petani
3. Keterbatasan perangkat teknologi
4. Kurangnya tenaga penyuluh berbasis teknologi
5. Belum meratanya infrastruktur digital

Oleh karena itu, pemerintah perlu memperkuat pembangunan infrastruktur digital pedesaan agar transformasi pertanian digital dapat berjalan secara inklusif.

12.9.8 Peran Pendidikan Tinggi dalam Transformasi Pertanian Masa Depan

Perguruan tinggi memiliki peran strategis dalam pengembangan budidaya tanaman pangan masa depan. Sebagai pusat pendidikan, penelitian, dan pengabdian masyarakat, perguruan tinggi menjadi sumber utama inovasi pertanian modern.

Peran perguruan tinggi dalam pembangunan pertanian meliputi:

1. Pengembangan Riset dan Inovasi

   Perguruan tinggi berkontribusi dalam menghasilkan inovasi teknologi pertanian seperti varietas unggul, teknologi irigasi hemat air, sistem pertanian presisi, serta teknologi pengendalian hama ramah lingkungan.

Penelitian pertanian modern diarahkan pada solusi terhadap berbagai tantangan global seperti perubahan iklim, degradasi lahan, dan peningkatan kebutuhan pangan.

2. Peningkatan Kualitas Sumber Daya Manusia
   Perguruan tinggi bertugas mencetak tenaga profesional pertanian yang memiliki kemampuan akademik, keterampilan teknis, dan kemampuan adaptasi terhadap teknologi modern.
   Mahasiswa pertanian masa depan dituntut menguasai:
   a. Teknologi digital pertanian
   b. Analisis data pertanian
   c. Manajemen agribisnis
   d. Sistem pertanian berkelanjutan
   e. Inovasi dan kewirausahaan pertanian.
3. Pengabdian kepada Masyarakat
   Melalui kegiatan penyuluhan dan pendampingan, perguruan tinggi membantu petani dalam mengadopsi teknologi baru. Kegiatan pengabdian masyarakat menjadi jembatan antara hasil penelitian dengan kebutuhan nyata di lapangan.
4. Kolaborasi Multisektor
   Pengembangan pertanian masa depan membutuhkan kerja sama antara perguruan tinggi, pemerintah, swasta, lembaga penelitian, dan masyarakat. Kolaborasi ini penting dalam mempercepat hilirisasi inovasi pertanian.
   Perguruan tinggi juga memiliki peran penting dalam membangun kesadaran generasi muda bahwa sektor pertanian merupakan sektor strategis yang memiliki prospek ekonomi besar pada masa depan.

12.9.9 Ketahanan Pangan Global dan Dinamika Geopolitik

Ketahanan pangan global tidak hanya dipengaruhi oleh faktor produksi pertanian, tetapi juga oleh kondisi geopolitik dunia. Konflik internasional, perang dagang, pandemi, dan gangguan distribusi global dapat memengaruhi stabilitas pangan dunia.

Krisis pangan global dapat terjadi akibat:

1. Gangguan rantai pasok internasional

2. Konflik antarnegara
3. Krisis energi global
4. Perubahan iklim ekstrem
5. Ketergantungan impor pangan
6. Fluktuasi harga komoditas dunia.

Pandemi COVID-19 memberikan pelajaran penting bahwa ketahanan pangan nasional harus diperkuat melalui peningkatan produksi domestik dan diversifikasi pangan lokal.

Negara-negara berkembang menghadapi risiko lebih besar terhadap ketidakstabilan pangan karena:

1. Ketergantungan impor
2. Rendahnya cadangan pangan
3. Infrastruktur pertanian terbatas
4. Rendahnya produktivitas pertanian.

Dalam konteks Indonesia, penguatan kemandirian pangan menjadi prioritas strategis untuk menjaga stabilitas ekonomi dan sosial masyarakat.

Strategi penguatan ketahanan pangan nasional meliputi:

1. Peningkatan produksi pangan local
2. Diversifikasi konsumsi pangan
3. Penguatan cadangan pangan pemerintah
4. Perlindungan lahan pertanian
5. Pengembangan teknologi pertanian
6. Penguatan distribusi pangan.

Budidaya tanaman pangan masa depan harus mampu mendukung sistem pangan nasional yang mandiri, tangguh, dan berkelanjutan.

12.9.10 Diversifikasi Pangan sebagai Strategi Masa Depan

Selama ini konsumsi pangan masyarakat masih sangat bergantung pada beberapa komoditas utama seperti beras dan gandum. Ketergantungan terhadap satu jenis pangan dapat meningkatkan risiko kerawanan pangan apabila terjadi gangguan produksi.

Diversifikasi pangan menjadi strategi penting untuk meningkatkan ketahanan pangan nasional. Diversifikasi dilakukan melalui pengembangan berbagai sumber pangan lokal seperti:

1. Jagung
2. Sorgum
3. Singkong
4. Ubi jalar
5. Sagu
6. Talas
7. Kacang-kacangan.

Pengembangan pangan lokal memiliki beberapa keuntungan:

1. Mengurangi ketergantungan impor
2. Memanfaatkan potensi sumber daya local
3. Meningkatkan ketahanan pangan
4. Mendukung keberagaman konsumsi pangan
5. Meningkatkan pendapatan petani local

Selain itu, pangan lokal umumnya lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan setempat sehingga lebih tahan terhadap perubahan iklim.

Pemerintah dan lembaga pendidikan perlu meningkatkan edukasi masyarakat mengenai pentingnya konsumsi pangan beragam, bergizi, seimbang, dan aman.

Diversifikasi pangan juga membuka peluang industri pangan berbasis bahan lokal yang memiliki nilai ekonomi tinggi.

12.10 Penutup

Budidaya tanaman pangan di masa depan menghadapi tantangan yang semakin kompleks akibat perubahan iklim, degradasi sumber daya alam, perkembangan teknologi, dinamika pasar global, dan perubahan sosial masyarakat. Namun demikian, perkembangan ilmu pengetahuan dan inovasi teknologi juga membuka peluang besar untuk menciptakan sistem pertanian yang lebih modern, efisien, produktif, dan berkelanjutan.

Transformasi pertanian menuju pertanian digital, pertanian presisi, smart farming, dan pertanian cerdas iklim menjadi langkah

strategis dalam menjaga ketahanan pangan masa depan. Selain itu, penerapan prinsip pertanian berkelanjutan, agroekologi, ekonomi sirkular, dan teknologi hijau menjadi bagian penting dalam menjaga keseimbangan antara peningkatan produksi dan kelestarian lingkungan.

Penguatan sumber daya manusia, dukungan kebijakan pemerintah, pengembangan riset dan inovasi, serta keterlibatan generasi muda menjadi faktor utama dalam keberhasilan pembangunan pertanian masa depan. Dengan sinergi antara teknologi, pendidikan, kelembagaan, dan keberlanjutan lingkungan, budidaya tanaman pangan diharapkan mampu mendukung terciptanya sistem pangan nasional yang tangguh, mandiri, inklusif, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Balabaygloo, B. J. *et al.* (2023) 'Smart connected farms and networked farmers to tackle climate challenges impacting agricultural production', *arXiv*. Available at: https://arxiv.org/abs/2312.12338.

Emerick, K. *et al.* (2021) 'Technological innovations and modernization of agriculture', *American Economic Review*, 111(6), pp. 1537–1561.

Ernanda, L. *et al.* (2022) 'Carbon footprint in Indonesia plantation sector: GHG calculation for main commodities', *arXiv*. Available at: https://arxiv.org/abs/2212.01332.

FAO (2022) *The Future of Food and Agriculture: Drivers and Triggers for Transformation*. Rome: Food and Agriculture Organization.

FAO (2023) *The State of Food Security and Nutrition in the World*. Rome: Food and Agriculture Organization.

Liakos, K. G. *et al.* (2022) 'Machine learning in agriculture: A review', *Sensors*, 22(8), pp. 1–35.

Lipper, L. *et al.* (2021) 'Climate-smart agriculture for food security', *Nature Climate Change*, 11(12), pp. 1068–1072.

OECD-FAO (2022) *OECD-FAO Agricultural Outlook 2022--2031*. Paris: OECD Publishing.

Rakshit, A. *et al.* (2022) *Innovation in Small-Farm Agriculture: Improving Livelihoods and Sustainability*. Boca Raton: CRC Press.

Soemarno (2021) *Sistem Pertanian Berkelanjutan dan Ketahanan Pangan*. Malang: UB Press.

Wolfert, S. *et al.* (2021) 'Big data in smart farming: A review', *Agricultural Systems*, 153, pp. 69–80.

World Bank (2021) *Digital Agriculture Transformation: Knowledge and Innovation Systems*. Washington DC: World Bank.

World Economic Forum (2023) *Innovation with a Purpose: Supporting Agripreneurship in the Digital Age*. Geneva: WEF.

BIODATA PENULIS



Almira Ulimaz, S.Si., M.Pd.
(almiraulimaz@politala.ac.id)
Dosen Program Studi S1 Terapan (S.Tr.T) Pengembangan Produk Agroindustri.

Pengalaman kerja penulis:

1. Dosen di Universitas PGRI Kalimantan (UPK) dari September 2013 s.d. Januari 2019
2. Tentor mata pelajaran Biologi di Primagama dari Agustus 2013 s.d. Juni 2019
3. Dosen mata kuliah Bahasa Inggris di Politeknik Hasnur dari Februari 2017 s.d. Desember 2018
4. Guru mata pelajaran (mapel) Biologi di SMA Islam Sabilal Muhtadin dari Januari 2014 s.d. Juni 2015
5. Guru Les Privat MaPel Biologi untuk Calon Mahasiswa Kedokteran dari September 2013 s.d. Mei 2019
6. Dosen di Politeknik Negeri Tanah Laut dari Juni 2019 s.d. sekarang (tahun 2026)

BIODATA PENULIS



Dewi Puspa Arisandi, S.P., M.Biotek.
Dosen Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan
Jurusan Produksi Pertanian Politeknik Negeri Jember

Penulis lahir di Jember, 27 September 1992. Penulis saat ini adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan Jurusan Produksi Pertanian Politeknik Negeri Jember. Penulis telah menjadi dosen sejak tahun 2021 di Sekolah Tinggi Ilmu Pertanian Jember. Penulis menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Jember dan melanjutkan pendidikan S2 pada Program Studi Magister Bioteknologi Universitas Jember. Bidang keilmuan penulis adalah Agroteknologi dan Bioteknologi Tanaman.

BIODATA PENULIS



Syaifullah Rahim, S.P., M.Si.
Dosen Program Studi Agroteknologi Jurusan Budidaya Tanaman
Fakultas Pertanian
Universitas Papua

Penulis lahir di Kendari tanggal 24 Juni 1997. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi, Jurusan Budidaya Tanaman, Fakultas Pertanian, Universitas Papua. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman. Penulis menekuni menulis pertanian, Agronomi, Pemuliaan Tanaman. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: s.rahim@unipa.ac.id

BIODATA PENULIS



Purbokurniawan, SP., M. Si
Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Purbokurniawan lahir di Surabaya pada 23 Februari 1977. Penulis menyelesaikan Pendidikan formal Sekolah Dasar di SD YPPK Padma I Manokwari pada tahun 1989; lulus SMP Negeri 1 Manokwari pada tahun 1992. Penulis lulus SMA Negeri 1 Manokwari tahun 1995.

Tahun 1996 penulis terdaftar di Program Studi Agronomi Faperta Universitas Cenderawasih dengan minat Pemuliaan Tanaman. Tahun 2005 diterima sebagai staf pengajar di Universitas Papua sampai sekarang. Tahun 2009 penulis melanjutkan Pendidikan di Institut Pertanian Bogor, Program Studi Pemuliaan dan Bioteknologi Tanaman.

BIODATA PENULIS



Dr. Ir. Jamilah, MP
Dosen Program Studi Agroteknologi (S2) Fakultas Pertanian
Universitas Tamansiswa Padang

Penulis lahir di Medan tanggal 26 Februari 1965. Penulis adalah dosen tetap pada Fakultas Pertanian Universitas Tamansiswa Padang, sejak tahun 1990 hingga sekarang. Menyelesaikan pendidikan S1 dan S2 pada Jurusan Tanah dan S3 pada Jurusan Ilmu-Ilmu Pertanian. Universitas Andalas. Penulis aktif dalam berbagai organisasi, salah satu yang menunjang kelimuan dalam penulisan buku ini, mengajar pada mata kuliah, Konservasi Tanah dan Air, Agrohidrologi, Erosi dan Konservasi Tanah, Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Penulis juga mendapat hibah penelitian selama 2 tahun terakhir 2025-2026 dari Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, dengan judul" Strategi Pertanian Berkelanjutan Mengoptimalkan Pemanfaatan Cendawan Mikoriza Arbuskular, Charged Biochar, Pemangkasan, dan Teknik Salibu"

Penulis aktif dalam organisasi khususnya anggota Forum DAS Kota Padang, dan HITI Sumatera Barat. mendapat dana hibah dari Kementerian Lingkungan Hidup Dan Kehutanan dengan judul :"Rencana Pembangunan Model Kampung Ramah Air Hujan Daerah Aliran Sungai (DAS) Arau Di Wilayah Kerja BPDAS Agam Kuantan Tahun 2022", dan beberapa kali sebagai pembicara pada berbagai seminar ilmiah serta forum komunikasi ilmiah. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: jamilah@unitas-pdg.ac.id

BIODATA PENULIS



Nandini Ayuningtias, S.P., M.Sc
Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penulis lahir di Jayapura tanggal 6 November 1997. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroteknologi Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Papua. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Agroteknologi dan melanjutkan S2 pada Jurusan Ilmu Hama Tanaman. Penulis menekuni bidang Menulis Pertanian, Agronomi, Proteksi Tanaman, Entomologi Pertanian. Penulis dapat dihubungi melalui: e-mail: n.ayuningtias@unipa.ac.id

BIODATA PENULIS



Emilia Farida Budi Handayani, S.P., M.M.A.
Dosen Program Studi Budidaya Tanaman Pangan
Jurusan Ilmu Pertanian
Politeknik Tonggak Equator Pontianak

Penulis lahir di Ambarawa tanggal 30 Juni 1969. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Budidaya Tanaman Pangan Jurusan Ilmu Pertanian Politeknik Tonggak Equator Pontianak. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agronomi dan melanjutkan S2 pada Magister Manajemen Pertanian Universitas Tanjungpura Pontianak. Buku kolaborasi yang pernah ditulis beliau antara lain: Budidaya Tanaman Pangan (2025); Budidaya Kelapa Sawit – Pengelolaan Lahan, Pemeliharaan dan Panen (2026); BudidayaTanaman Jagung Hibrida dan Jagung Manis (2026); dan Tanaman Sayuran (2026).

BIODATA PENULIS



Dr. Rahmawati Ning Utami, S.Pd., M.Si.
Dosen Program Studi Agroekoteknologi
Fakultas Pertanian dan Kehutanan
Universitas Sulawesi Barat

Penulis lahir di Jombang Jawa Timur tanggal 23 April 1970, yang merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Alm. Bapak H. Pujo Semedi (Purnawirawan-AL) dan Ibu Hj. Titik Hindun Nanik. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian dan Kehutanan, Universitas Sulawesi Barat. Menyelesaikan Pendidikan Program Sarjana (S1) di Universitas Wijaya Kusuma Surabaya Prodi Pendidikan Biologi, setelah itu menyelesaikan Program Pasca Sarjana (S2) di Universitas Gadjah Mada Yogyakarta Prodi Biologi di bidang Taksonomi Tumbuhan, dan selanjutnya menyelesaikan Program Doktor (S3) di Universitas Hasanuddin Makasar Prodi Ilmu Pertanian konsentrasi di bidang Ilmu Tanaman.

Buku yang telah ditulis dan diterbitkan oleh PT. Sonpedia Publishing adalah *Book Chapter* Pengantar Statistika*, Book Chapter* Nutrisi Ternak Dasar*, Book Chapter* Metodologi Penelitian*, Book Chapter* Metodologi *Research and Development, Book Chapter* Teknik Penyusunan Instrumen Penelitian*,* Buku Ajar Strategi Belajar Mengajar, Buku Metode Penelitian Kualitatif, Buku Metode Penelitian Kuantitatif, Buku Strategi Pembelajaran Berbasis Model-model Pembelajaran, dan Buku Ajar Metode

Statistika. Buku lain yang telah saya tulis dan diterbitkan oleh Get Press adalah *Book Chapter* Konservasi Tanah dan Air, *Book Chapter* Botani, *Book Chapter* Sifat dan Morfologi Tanah, *Book Chapter* Pemuliaan Tanaman, *Book Chapter* Hortikultura dan Tanaman Pangan, *Book Chapter* Pengantar Fisiologi Tumbuhan, *Book Chapter* Pengantar Ekologi, *Book Chapter* Dasar-dasar Pemuliaan 2, *Book Chapter* Teknik Kultur Jaringan, *Book Chapter* Ekologi Tumbuhan, dan *Book Chapter* Pengolahan Limbah Pertanian. Sedangkan yang diterbitkan oleh Penerbit Lingkar Edukasi Indonesia adalah *Book Chapter* Dasar Agronomi, *Book Chapter* Botani, *Book Chapter* Teknologi Kultur Jaringan, *Book Chapter* Pengantar Agronomi, *Book Chapter Climate Change, Book Chapter* Ekologi Umum, *Book Chapter* Fitohormon, *Book Chapter* Budidaya Tanaman Pangan dan Hortikultura, *Book Chapter* Konservasi Sumberdaya Lahan dan Lingkungan, *Book Chapter* Klimatologi, *Book Chapter* Ilmu Agronomi, *Book Chapter* Genetika, *Book Chapter* Meteorologi dan Klimatologi, *Book Chapter* Agronomi dan Konservasi Tanah, *Book Chapter* Dasar-dasar Fisiologi Tumbuhan, dan Buku Ajar Metode Penelitian Kualitatif dan Kuantitatif. Buku Teknologi Pasca Panen Tanaman Pangan, *Book Chapter* Teknik Kultur Jaringan pada Tanaman Hortikultura, dan *Book Chapter* Dasar-dasar Pemuliaan Tanaman yang diterbitkan oleh Penerbit Azzia. Buku Teknik Budidaya Jagung IP400 diterbitkan oleh Penerbit Deepublish. Buku Dasar-dasar Pemuliaan Tanaman, Buku Pengelolaan Agroekosistem, Buku Pemuliaan Tanaman untuk Ketahanan Pangan, dan Buku Dasar-dasar Produksi Tanaman Hortikultura diterbitkan oleh Penerbit Yayasan Kita Menulis. Buku Referensi Statistika diterbitkan oleh Dikti Press. Buku Ilmu Tanaman diterbitkan oleh Minang Media Press.

BIODATA PENULIS



Baso Daeng, SP., M.Si
Dosen Program Studi Budidaya Tanaman Pangan
Fakultas Pertanian Universitas Papua

Penulis lahir di Ujung Pandang (Makassar) tanggal 18 Januari 1978. Pendidikan S1 bidang Agronomi diselesaikan pada tahun 2001 di Fakultas Pertanian Universitas Cenderawasih. Penulis juga merupakan alumni S2 IPB, lulus pada tahun 2012 dengan keahlian Agronomi dan Hortikultura. Saat ini penulis sedang merampungkan pendidikan S3 Ilmu Lingkungan di Universitas Papua.

Sebagai akademisi yang aktif, penulis tidak hanya terlibat dalam kegiatan pengajaran, tetapi juga aktif menulis dan melakukan penelitian, khususnya dalam bidang pertanian berkelanjutan, kearifan lokal, dan ketahanan pangan. Selain itu, penulis juga berpartisipasi dalam berbagai organisasi profesi dan kegiatan pengabdian kepada masyarakat, sebagai bentuk kontribusi terhadap pembangunan ilmu pengetahuan dan kesejahteraan masyarakat lokal

Untuk keperluan komunikasi dan korespondensi, penulis dapat dihubungi melalui alamat email: *b.daeng@unipa.ac.id* atau *basodaeng.s3il@gmail.com*.

BIODATA PENULIS



Tiara Ayu Nugraha Putri, S.Si., M.Biotech
Dosen Program Studi Manajemen Agribisnis
Jurusan Manajemen Agribisnis Politeknik Negeri Jember

Penulis lahir di Kediri tanggal 15 Agustus 1994. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Manajemen Agribisnis Jurusan Agribisnis Politeknik Negeri Jember. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Jurusan Biologi Universitas Sebelas Maret dan melanjutkan S2 pada Program Studi Bioteknologi Universitas Gadjah Mada. Penulis menekuni bidang bioteknologi dan agribisnis. Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: tiaraayu_np@polije.ac.id

BIODATA PENULIS



Jeefry Andrian, S.P., M. Si.
Dosen Program Studi Teknologi Benih
Jurusan Budi Daya Tanaman

Penulis lahir di Padang Kasab tanggal 25 Juni 1993. Penulis adalah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Benih Jurusan Budi Daya Tanaman, Politeknik Pertanian Negeri Payakumbuh. Menyelesaikan pendidikan S1 pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian, Universitas AlMuslim dan melanjutkan S2 pada Program Studi Pengendalian Hama Terpadu, Departemen Proteksi Tanaman, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor. Penulis aktif dalam kegiatan pendidikan, penelitian, dan pengabdian kepada masyarakat. Penulis juga aktif sebagai dosen pengampu mata kuliah Perlindungan Tanaman, Budaya dan Komitmen Mutu, Patologi Benih dan Hama Gudang, Teknologi Pascapanen, Produksi Benih Tanaman Perkebunan, serta Pendekatan dan Sistem Manajemen Mutu. Latar belakang pendidikan dan pengalaman akademik yang dimiliki menjadi dasar dalam pengembangan bahan ajar dan penulisan buku yang berorientasi pada penguatan kompetensi mahasiswa serta penerapan ilmu secara aplikatif di bidang pertanian.

BIODATA PENULIS



Christa Dyah Utami, S.P., M.P.
Dosen Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan
Jurusan Produksi Pertanian Politeknik Negeri Jember

Penulis lahir di Malang pada tanggal 17 Februari 1989. Penulis ialah dosen tetap pada Program Studi Teknologi Produksi Tanaman Pangan Jurusan Produksi Pertanian, Politeknik Negeri Jember. Menyelesaikan pendidikan S1 di Jurusan Budidaya Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya dan melanjutkan S2 di Pascasarjana Fakultas Pertanian Universitas Brawijaya. Berikut merupakan buku ke tujuh penulis. Buku pertama yang ditulis berjudul Produksi Tanaman Umbi-umbian diterbitkan oleh KHD Production pada tahun 2022.