BUKU REFERENSI

SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Integrasi Ilmu, Teknologi, dan Inovasi untuk Ketahanan Pangan



Elfin Efendi, S TP., M.P.
Wikka Sasvita, M Agr.
Maya Sari, S TP., MSc.
Lanny Wattimena, S.P., M.Sc.

BUKU REFERENSI

SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Integrasi Ilmu, Teknologi, dan Inovasi untuk Ketahanan Pangan

Elfin Efendi, S.TP., M.P.
Wikka Sasvita, M.Agr.
Maya Sari, S.TP., M.Sc.
Lanny Wattimena, S.P., M.Sc.

PT MEDIA PENERBIT INDONESIA

BUKU REFERENSI

SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Integrasi Ilmu, Teknologi, dan Inovasi untuk Ketahanan Pangan

Ditulis oleh:

Elfin Efendi, S.TP., M.P.
Wikka Sasvita, M.Agr.
Maya Sari, S.TP., M.Sc.
Lanny Wattimena, S.P., M.Sc.

Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang keras memperbanyak, menerjemahkan atau mengutip baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku tanpa izin tertulis dari penerbit.

ISBN: 978-634-316-096-0
IV + 315 hlm; 18,2 x 25,7 cm.
Cetakan I, Oktober 2026

Desain Cover dan Tata Letak:
Melvin Mirsal

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh
PT Media Penerbit Indonesia
Royal Suite No. 6C, Jalan Sedap Malam IX, Sempakata
Kecamatan Medan Selayang, Kota Medan 20131
Telp: 081362150605
Email: ptmediapenerbitindonesia@gmail.com
Web: https://mediapenerbitindonesia.com
Anggota IKAPI No.088/SUT/2024



KATA PENGANTAR

Pertanian merupakan sektor yang berperan penting dalam memenuhi kebutuhan pangan sekaligus mendukung pembangunan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat. Berbagai tantangan, seperti degradasi lingkungan, perubahan iklim, dan meningkatnya kebutuhan pangan, mendorong penerapan sistem pertanian berkelanjutan yang mengintegrasikan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan secara seimbang.

Buku referensi ini disusun untuk memberikan pemahaman mengenai konsep dasar pertanian berkelanjutan, ketahanan pangan, dan sistem *agrifood* modern. Buku ini juga membahas landasan konseptual pertanian berkelanjutan beserta keterkaitannya dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs), mengulas konsep ketahanan pangan, dinamika sistem *agrifood*, berbagai tantangan yang dihadapi, serta strategi penguatan ketahanan pangan di Indonesia.

Penulis menyadari bahwa buku ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan untuk penyempurnaan pada edisi mendatang. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan inspirasi selama proses penyusunan buku ini.

Semoga buku ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca, serta menjadi referensi yang mendukung pengembangan pertanian berkelanjutan dan ketahanan pangan di Indonesia.

Salam Hangat

Tim Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **ii**
BAB I KONSEP DASAR SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN **1**
A. Definisi dan Ruang Lingkup Pertanian Berkelanjutan 1
B. Evolusi Paradigma Pertanian Modern 4
C. Prinsip-Prinsip Pertanian Berkelanjutan 6
D. Dimensi Ekonomi, Sosial, dan Lingkungan 8
E. Tantangan Pertanian Global Abad ke-21 10
F. Pertanian Berkelanjutan dalam Perspektif SDGs 11
G. Hubungan Pertanian Berkelanjutan dan Ketahanan Pangan 13

BAB II KETAHANAN PANGAN DAN SISTEM *AGRIFOOD* MODERN **15**
A. Konsep Ketahanan Pangan 15
B. Pilar Ketahanan Pangan 16
C. Sistem *Agrifood* Berkelanjutan 18
D. Dinamika Produksi dan Konsumsi Pangan Global 20
E. Ancaman terhadap Ketahanan Pangan 22
F. Strategi Penguatan Ketahanan Pangan Nasional 24
G. Peran Pertanian Berkelanjutan dalam Ketahanan Pangan 26

BAB III EKOLOGI PERTANIAN DAN PENGELOLAAN SUMBER DAYA ALAM **29**
A. Ekosistem Pertanian 29
B. Kesuburan Tanah dan Kesehatan Tanah 34
C. Konservasi Air Pertanian 39
D. Pengelolaan Keanekaragaman Hayati 44
E. Agroforestri dan Pertanian Terpadu 48
F. Pengendalian Erosi dan Degradasi Lahan 52
G. Pendekatan Lanskap Berkelanjutan 56

BAB IV PERTANIAN CERDAS IKLIM (*CLIMATE SMART AGRICULTURE*) 61
A. Perubahan Iklim dan Dampaknya terhadap Pertanian..... 61
B. Mitigasi Emisi Sektor Pertanian..... 65
C. Adaptasi Pertanian Terhadap Perubahan Iklim..... 69
D. Sistem Produksi Rendah Karbon..... 73
E. Pertanian Regeneratif..... 77
F. Studi Kasus Climate Smart Agriculture..... 83

BAB V INOVASI TEKNOLOGI DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN 89
A. Transformasi Digital Pertanian..... 89
B. *Internet of Things* (IoT) dalam Pertanian..... 96
C. Artificial Intelligence (AI) dan Machine Learning..... 103
D. Big Data dan Decision Support System..... 109
E. *Blockchain* untuk Ketertelusuran Pangan..... 114
F. Robotika dan Otomasi Pertanian..... 120
G. Masa Depan Smart farming..... 126

BAB VI PERTANIAN PRESISI DAN *SMART FARMING*..... 131
A. Konsep Pertanian Presisi..... 131
B. Sensor dan Monitoring Lahan..... 137
C. Sistem Informasi Geografis (SIG)..... 142
D. *Drone* untuk Pertanian..... 146
E. Remote Sensing dan Satelit..... 151
F. Variable Rate Technology..... 154
G. Implementasi *Smart farming* di Indonesia..... 158

BAB VII INOVASI BIOTEKNOLOGI DAN PRODUKSI BERKELANJUTAN 165
A. Dasar-Dasar Bioteknologi Pertanian..... 165
B. Pemuliaan Tanaman Modern..... 171
C. Biofertilizer dan Biopestisida..... 176
D. Mikroorganisme dalam Pertanian..... 182
E. Pertanian Organik dan Hayati..... 187
F. Teknologi Benih Berkelanjutan..... 193
G. Tantangan Etika dan Regulasi..... 196

BAB VIII SISTEM PRODUKSI PERTANIAN TERINTEGRASI 201
A. Pertanian Terpadu Tanaman-Ternak 201
B. Sistem Mina Padi 207
C. Integrated Farming System 213
D. Circular Agriculture 218
E. Zero Waste Agriculture 223
F. Pemanfaatan Limbah Pertanian 228
G. Studi Implementasi Sistem Terintegrasi 233

BAB IX PERTANIAN PERKOTAAN DAN PRODUKSI PANGAN MASA DEPAN 239
A. Urban Farming 239
B. Hidroponik 249
C. Aeroponik 258
D. Akuaponik 264
E. Vertical Farming 271
F. Controlled Environment Agriculture 279
G. Peluang Ketahanan Pangan Perkotaan 286

DAFTAR PUSTAKA 293
GLOSARIUM 305
INDEKS 309
BIOGRAFI PENULIS 313
SINOPSIS 315



BAB I
KONSEP DASAR SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Sistem pertanian berkelanjutan merupakan pendekatan pengelolaan pertanian yang bertujuan memenuhi kebutuhan pangan saat ini tanpa mengurangi kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya. Konsep ini mengintegrasikan tiga dimensi utama, yaitu keberlanjutan ekonomi, keberlanjutan sosial, dan keberlanjutan lingkungan, sehingga kegiatan pertanian tidak hanya berorientasi pada peningkatan produksi, tetapi juga menjaga kelestarian sumber daya alam serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

Dalam penerapannya, sistem pertanian berkelanjutan menekankan pemanfaatan sumber daya secara efisien, pelestarian kesuburan tanah, konservasi air, perlindungan keanekaragaman hayati, serta penggunaan teknologi dan inovasi yang ramah lingkungan. Pendekatan ini juga mendorong praktik budidaya yang mampu meningkatkan produktivitas secara berkelanjutan, memperkuat ketahanan pangan, mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, dan menciptakan sistem pertanian yang tangguh terhadap perubahan iklim serta berbagai tantangan pembangunan di masa depan.

A. Definisi dan Ruang Lingkup Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan atau *sustainable agriculture* merupakan sistem pengelolaan sumber daya pertanian yang dirancang untuk memenuhi kebutuhan pangan dan serat generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya sendiri. Secara konseptual, pengertian pertanian berkelanjutan adalah pengelolaan sumber daya yang berhasil guna membantu kebutuhan manusia yang berubah, sekaligus mempertahankan atau meningkatkan kualitas lingkungan dan melestarikan sumber daya alam. Definisi ini menegaskan bahwa

keberlanjutan bukan sekadar wacana normatif, melainkan tujuan operasional yang harus tercermin dalam praktik budi daya, pemanenan, distribusi, hingga konsumsi hasil pertanian.

Ruang lingkup pertanian berkelanjutan bersifat multidimensi dan tidak terbatas pada aspek agronomis semata. Cakupannya meliputi pengelolaan lahan dan air, konservasi keanekaragaman hayati, efisiensi penggunaan energi dan input produksi, tata niaga hasil pertanian, kelembagaan petani, hingga kebijakan pangan pada tingkat makro. Rachmawatie *et al*. (2020) menegaskan bahwa sistem pertanian terpadu berkelanjutan mengintegrasikan subsistem tanaman, ternak, dan sumber daya alam secara sinergis agar tercipta siklus hara tertutup yang meminimalkan limbah dan memaksimalkan produktivitas lahan. Dengan demikian, ruang lingkup kajian pertanian berkelanjutan mencakup dimensi teknis-agronomis, dimensi ekonomi usaha tani, dimensi sosial-kelembagaan, serta dimensi ekologis dalam satu kesatuan sistem yang saling memengaruhi.

Djibran (2023) dalam kajiannya menekankan bahwa penerapan teknologi pertanian ramah lingkungan serta penguatan kapasitas petani melalui pelatihan dan penyuluhan merupakan prasyarat penting agar pertanian berkelanjutan dapat diterapkan secara meluas, khususnya bagi petani kecil di daerah perdesaan. Sejalan dengan hal tersebut, Alfarizi dan Ngatindriatun (2023) menunjukkan bahwa penerapan metode budi daya berkelanjutan berkorelasi positif dengan efisiensi biaya produksi dan stabilitas akses pangan rumah tangga tani. Temuan ini memperkuat argumen bahwa pertanian berkelanjutan bukan sekadar alternatif ideologis terhadap pertanian konvensional, melainkan strategi adaptif yang memberikan manfaat ekonomi nyata sekaligus menjaga daya dukung lingkungan dalam jangka panjang.

Tabel 1.1 Perbandingan Karakteristik Pertanian Konvensional dan Pertanian Berkelanjutan

Aspek	Pertanian Konvensional	Pertanian Berkelanjutan
Orientasi utama	Maksimalisasi hasil jangka pendek	Keseimbangan hasil, ekologi, dan keadilan sosial jangka panjang

Aspek	Pertanian Konvensional	Pertanian Berkelanjutan
Input produksi	Bergantung tinggi pada pupuk dan pestisida sintetis	Optimalisasi input organik dan hayati, efisiensi input eksternal
Pengelolaan lahan	Monokultur intensif	Diversifikasi, rotasi tanaman, dan agroforestri
Dampak lingkungan	Cenderung menurunkan kualitas tanah dan air	Berorientasi konservasi tanah, air, dan biodiversitas
Ketahanan sistem	Rentan terhadap guncangan iklim dan pasar	Lebih resilien melalui diversifikasi dan efisiensi sumber daya

Sumber: Rachmawatie et al., (2020); Djibran (2023)

Secara epistemologis, pertanian berkelanjutan dapat dipahami sebagai persilangan antara ilmu agronomi, ekologi, ekonomi, dan sosiologi pedesaan. Pendekatan lintas disiplin ini penting karena keberhasilan sistem pertanian tidak dapat diukur hanya dari produktivitas per hektare, tetapi juga dari kemampuannya menjaga kesuburan tanah, kesejahteraan petani, dan kelestarian ekosistem dalam kurun waktu yang panjang. Oleh karena itu, ruang lingkup pembahasan pertanian berkelanjutan dalam buku ini akan mencakup keterkaitan antarsubsistem tersebut secara terintegrasi.

Ruang lingkup pertanian berkelanjutan juga dapat ditinjau dari skala analisisnya, mulai dari skala mikro pada tingkat lahan usaha tani individu, skala meso pada tingkat kawasan atau lanskap pertanian, hingga skala makro pada tingkat kebijakan nasional dan global. Pada skala mikro, kajian difokuskan pada praktik agronomis spesifik seperti pengelolaan hara, konservasi tanah, dan pemilihan varietas. Pada skala meso, perhatian bergeser pada tata kelola lanskap, konektivitas ekologis antarlahan, serta kelembagaan kolektif petani dalam suatu kawasan. Adapun pada skala makro, pembahasan mencakup kebijakan harga, subsidi input, perdagangan pangan internasional, dan kerangka regulasi yang memengaruhi arah pembangunan pertanian secara keseluruhan.

Ketiga skala tersebut saling berinteraksi, sehingga intervensi pada satu skala akan memberikan konsekuensi pada skala lainnya, baik secara langsung maupun tidak langsung.

B. Evolusi Paradigma Pertanian Modern

Perkembangan paradigma pertanian modern tidak dapat dilepaskan dari era Revolusi Hijau pada dekade 1960-an hingga 1980-an, yang berhasil meningkatkan produktivitas pangan global secara signifikan melalui introduksi varietas unggul, irigasi intensif, serta penggunaan pupuk dan pestisida kimiawi secara masif. Namun demikian, agenda Revolusi Hijau turut meninggalkan persoalan ekologis yang serius bagi keberlanjutan sektor pertanian, seperti degradasi kesuburan tanah, pencemaran sumber daya air, dan penyusutan keanekaragaman hayati agroekosistem. Kesadaran akan dampak negatif tersebut kemudian mendorong lahirnya gerakan reformasi menuju sistem budi daya yang lebih ramah lingkungan.

Transisi paradigma berikutnya ditandai dengan kemunculan pendekatan *Low External Input Sustainable Agriculture* (LEISA) pada dekade 1990-an, yang menekankan optimalisasi sumber daya lokal dan pengurangan ketergantungan pada input eksternal. Pendekatan ini kemudian berkembang menjadi kerangka *agroecology* yang lebih komprehensif, menekankan penerapan prinsip-prinsip ekologi dalam desain dan pengelolaan sistem pangan berkelanjutan. Memasuki abad ke-21, paradigma pertanian kembali bertransformasi seiring masuknya teknologi digital, sensor, dan kecerdasan buatan ke dalam praktik budi daya, yang dikenal sebagai *precision agriculture* atau *smart farming*, sebagai respons terhadap tuntutan efisiensi sumber daya dan mitigasi perubahan iklim.

Gambar 1.1 Evolusi Paradigma Pertanian Modern



Evolusi paradigma tersebut memperlihatkan pergeseran orientasi dari produktivisme jangka pendek menuju keberlanjutan sistemik jangka panjang. Pergeseran ini juga mencerminkan perubahan cara pandang terhadap petani, dari sekadar objek penerima teknologi menjadi subjek pengambil keputusan yang aktif dalam merancang sistem produksinya sendiri berdasarkan kearifan lokal dan bukti ilmiah. Pemahaman terhadap evolusi paradigma ini penting bagi para akademisi dan pengambil kebijakan agar strategi pembangunan pertanian ke depan tidak mengulangi kesalahan masa lalu, melainkan mengintegrasikan pelajaran dari setiap fase transformasi menuju sistem pangan yang lebih tangguh dan berkeadilan.

Pada level kelembagaan, evolusi paradigma pertanian juga diiringi oleh perubahan pola relasi antara negara, pasar, dan masyarakat sipil dalam pengelolaan sumber daya pertanian. Era Revolusi Hijau ditandai dengan dominasi peran negara melalui program intensifikasi terpusat, sementara era liberalisasi ekonomi pada dekade 1990-an hingga 2000-an memperluas peran sektor swasta dalam penyediaan input dan pemasaran hasil pertanian. Memasuki dekade 2010-an hingga saat ini, muncul model tata kelola kolaboratif yang melibatkan negara, sektor swasta, organisasi non-pemerintah, dan komunitas petani secara bersamaan dalam merancang dan mengimplementasikan program pertanian berkelanjutan, sebagaimana tercermin dalam berbagai skema kemitraan rantai pasok berkelanjutan (*sustainable supply chain partnership*) yang berkembang pesat pada berbagai komoditas ekspor unggulan Indonesia seperti kopi, kakao, dan kelapa sawit.

Perkembangan mutakhir paradigma pertanian juga diwarnai oleh kemunculan konsep *regenerative agriculture*, yang melangkah lebih jauh dari sekadar meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan menuju upaya aktif memulihkan dan meningkatkan fungsi ekosistem tanah melalui praktik seperti minimum pengolahan tanah, penanaman tanaman penutup, dan integrasi ternak dalam sistem tanaman. Pendekatan ini semakin mendapat perhatian global karena dipandang mampu menjawab dua persoalan sekaligus, yaitu peningkatan sekuestrasi karbon pada tanah pertanian sebagai kontribusi mitigasi perubahan iklim, sekaligus perbaikan struktur dan kesuburan tanah yang pada gilirannya meningkatkan resiliensi produksi pangan terhadap variabilitas iklim yang semakin tinggi.

C. Prinsip-Prinsip Pertanian Berkelanjutan

Organisasi Pangan dan Pertanian Dunia (*Food and Agriculture Organization*/FAO) merumuskan lima prinsip utama yang menjadi landasan operasional pertanian berkelanjutan, yaitu peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya, konservasi dan perlindungan sumber daya alam, perlindungan mata pencaharian pedesaan dan kesejahteraan sosial, peningkatan ketahanan manusia, ekosistem, dan komunitas, serta perbaikan tata kelola pada seluruh tingkatan sistem pangan. Kelima prinsip tersebut saling terkait dan tidak dapat dipisahkan satu sama lain,

karena keberhasilan pada satu dimensi akan memperkuat capaian pada dimensi lainnya, sementara kegagalan pada salah satu prinsip dapat menurunkan efektivitas keseluruhan sistem.

1. *Resource use efficiency*: Optimalisasi penggunaan air, lahan, energi, dan input produksi agar tercapai rasio keluaran terhadap masukan yang optimal.
2. Konservasi sumber daya alam: Perlindungan tanah, air, udara, dan keanekaragaman hayati dari eksploitasi berlebihan.
3. Keadilan sosial dan mata pencaharian: Jaminan kesejahteraan petani, buruh tani, dan masyarakat pedesaan secara berkeadilan.
4. Resiliensi system: Kemampuan beradaptasi terhadap guncangan iklim, ekonomi, dan sosial tanpa kehilangan fungsi dasar sistem.
5. Tata kelola partisipatif: Pengambilan keputusan yang transparan, inklusif, dan melibatkan multipihak dalam sistem pangan.

Prinsip-prinsip tersebut kemudian dijabarkan secara lebih operasional dalam berbagai praktik budi daya, seperti rotasi tanaman, pengelolaan hama terpadu (*integrated pest management*), konservasi tanah dan air, penggunaan pupuk organik dan hayati, serta diversifikasi usaha tani. Rivai dan Anugrah (2011) menekankan bahwa implementasi prinsip pertanian berkelanjutan di Indonesia perlu disesuaikan dengan karakteristik agroekosistem lokal, mengingat keragaman kondisi biofisik dan sosial-budaya antarwilayah yang sangat tinggi. Oleh karena itu, penerapan prinsip pertanian berkelanjutan tidak dapat bersifat seragam, melainkan harus mempertimbangkan konteks spesifik lokasi (*site-specific approach*) agar dapat memberikan hasil yang optimal dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Selain kelima prinsip normatif tersebut, sejumlah kerangka kerja teknis turut dikembangkan untuk mengoperasionalkan pertanian berkelanjutan di lapangan, di antaranya prinsip *4R nutrient stewardship* dalam pengelolaan hara yang menekankan pemberian pupuk dengan sumber yang tepat, dosis yang tepat, waktu yang tepat, dan penempatan yang tepat. Prinsip lain yang relevan adalah *conservation agriculture*, yang menganjurkan minimum pengolahan tanah, penutupan tanah secara permanen dengan mulsa atau tanaman penutup, serta diversifikasi rotasi tanaman guna menjaga struktur dan biologi tanah. Penerapan kerangka kerja teknis ini secara konsisten terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan input sekaligus menurunkan biaya produksi usaha tani

dalam jangka menengah hingga panjang, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai kajian lapangan pada sistem pertanian lahan kering maupun lahan basah di Indonesia.

D. Dimensi Ekonomi, Sosial, dan Lingkungan

Konsep pertanian berkelanjutan berorientasi pada tiga dimensi keberlanjutan yang saling terintegrasi, yaitu keberlanjutan usaha ekonomi (*profit*), keberlanjutan kehidupan sosial manusia (*people*), dan keberlanjutan ekologi alam (*planet*), yang secara populer dikenal sebagai kerangka *triple bottom line* (Lagiman, 2023). Dimensi ekonomi berkaitan dengan upaya memaksimalkan aliran pendapatan usaha tani dengan tetap mempertahankan aset produktif yang menjadi basis perolehan pendapatan tersebut, sehingga usaha tani tidak hanya menguntungkan secara jangka pendek tetapi juga layak secara finansial dalam jangka panjang.

Dimensi sosial menyoroti aspek pemerataan manfaat pembangunan pertanian, termasuk akses terhadap lahan, modal, teknologi, dan pasar bagi seluruh pelaku dalam rantai nilai pertanian, khususnya petani kecil dan kelompok rentan. Keberlanjutan sosial juga mencakup regenerasi tenaga kerja pertanian, penguatan kelembagaan petani, serta pelestarian pengetahuan lokal dalam pengelolaan sumber daya alam. Sementara itu, dimensi lingkungan menekankan pentingnya menjaga daya dukung ekosistem melalui konservasi tanah, air, dan keanekaragaman hayati, sehingga proses produksi pertanian tidak melampaui kapasitas regenerasi alam.

Tabel 1.2 Tiga Dimensi Keberlanjutan Pertanian (*Triple Bottom Line*)

Dimensi	Fokus Utama	Indikator Kunci
Ekonomi (*Profit*)	Kelayakan usaha tani jangka panjang	Pendapatan bersih usaha tani, efisiensi biaya produksi, nilai tambah produk
Sosial (*People*)	Kesejahteraan dan keadilan pelaku pertanian	Akses lahan dan modal, kesetaraan gender, regenerasi petani muda

Dimensi	Fokus Utama	Indikator Kunci
Lingkungan (*Planet*)	Kelestarian daya dukung ekosistem	Kualitas tanah, ketersediaan air, indeks keanekaragaman hayati

Ketiga dimensi tersebut idealnya diposisikan setara dan tidak saling mengorbankan satu sama lain (*trade-off minimization*). Dalam praktiknya, pencapaian keseimbangan antardimensi kerap menghadapi tantangan, misalnya ketika peningkatan produktivitas jangka pendek justru mengorbankan kualitas lingkungan, atau sebaliknya ketika kebijakan konservasi lingkungan yang terlalu ketat berdampak pada penurunan pendapatan petani. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan perencanaan yang holistik dan berbasis bukti agar ketiga dimensi keberlanjutan dapat dicapai secara simultan melalui inovasi teknologi, kebijakan insentif, dan penguatan kelembagaan petani.

Pengukuran capaian ketiga dimensi keberlanjutan tersebut memerlukan seperangkat indikator yang terstandardisasi agar dapat diperbandingkan antarwilayah maupun antarwaktu. Pada dimensi ekonomi, indikator yang lazim digunakan meliputi rasio penerimaan terhadap biaya (*R/C ratio*), nilai tambah produk, dan tingkat pengembalian investasi usaha tani. Pada dimensi sosial, indikator mencakup indeks kesejahteraan rumah tangga tani, tingkat partisipasi perempuan dalam pengambilan keputusan usaha tani, serta akses terhadap layanan penyuluhan. Adapun pada dimensi lingkungan, indikator meliputi kandungan bahan organik tanah, efisiensi penggunaan air irigasi, dan indeks kesehatan agroekosistem. Ketersediaan data yang konsisten atas indikator-indikator tersebut menjadi prasyarat penting bagi evaluasi kebijakan pertanian berkelanjutan secara berkala dan berbasis bukti.

Studi terapan mengenai penilaian keberlanjutan usaha tani (*farm sustainability assessment*) di berbagai wilayah Indonesia menunjukkan bahwa capaian dimensi ekonomi sering kali lebih mudah dipenuhi dibandingkan dimensi sosial dan lingkungan, terutama pada sistem usaha tani skala kecil yang berorientasi pasar. Kondisi ini terjadi karena insentif ekonomi bersifat lebih langsung dan terukur, sementara manfaat sosial dan lingkungan sering kali baru dirasakan dalam jangka menengah hingga panjang, sehingga kurang menarik bagi petani dengan

keterbatasan modal dan orientasi bertahan hidup jangka pendek. Implikasinya, kebijakan insentif fiskal maupun nonfiskal yang secara eksplisit menghargai jasa lingkungan dan kontribusi sosial petani, seperti skema pembayaran jasa lingkungan (*payment for ecosystem services*), menjadi instrumen penting untuk mendorong keseimbangan pencapaian ketiga dimensi keberlanjutan tersebut secara lebih merata.

E. Tantangan Pertanian Global Abad ke-21

Sektor pertanian global pada abad ke-21 dihadapkan pada rangkaian tantangan yang saling berkelindan dan bersifat lintas batas negara. Perubahan iklim menjadi tantangan paling mendesak, karena peningkatan frekuensi cuaca ekstrem, pergeseran pola curah hujan, serta kenaikan suhu global secara langsung memengaruhi produktivitas tanaman pangan dan stabilitas produksi (IPCC, 2022). Selain itu, sektor pertanian, khususnya budi daya padi sawah, turut menjadi penyumbang emisi gas rumah kaca yang signifikan melalui emisi metana dari lahan tergenang, sehingga pertanian dihadapkan pada tantangan ganda sebagai korban sekaligus kontributor perubahan iklim.

1. Perubahan iklim dan cuaca ekstrem yang meningkatkan risiko gagal panen dan variabilitas hasil.
2. Degradasi lahan dan penurunan kualitas tanah akibat praktik budi daya intensif jangka panjang.
3. Kelangkaan sumber daya air akibat kompetisi antarsektor dan perubahan pola hidrologi.
4. Pertumbuhan populasi global yang meningkatkan tekanan permintaan pangan secara signifikan.
5. Alih fungsi lahan pertanian menjadi kawasan permukiman dan industri di banyak wilayah.
6. Regenerasi tenaga kerja pertanian yang melambat akibat urbanisasi dan menurunnya minat generasi muda.
7. Disrupsi rantai pasok pangan global akibat konflik geopolitik dan gejolak harga energi.

Di sisi lain, laporan *The State of Food Security and Nutrition in the World* menegaskan bahwa ketidakpastian ekonomi global, konflik bersenjata, serta dampak lanjutan pandemi telah memperlambat capaian target penurunan kerawanan pangan dunia (FAO, 2023). Tantangan-

tantangan tersebut menuntut transformasi sistem pertanian yang lebih adaptif dan inovatif, tidak hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas semata, tetapi juga pada penguatan resiliensi sistem terhadap berbagai guncangan eksternal. Pendekatan *climate-smart agriculture* yang mengintegrasikan peningkatan produktivitas, adaptasi, dan mitigasi perubahan iklim secara simultan menjadi salah satu strategi kunci untuk menjawab tantangan tersebut.

Tantangan lain yang tidak kalah penting adalah kesenjangan generasi dalam sektor pertanian, di mana rata-rata usia petani di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, terus meningkat seiring rendahnya minat generasi muda untuk berkarier di sektor ini. Fenomena penuaan petani (*aging farmers*) berpotensi mengancam keberlangsungan regenerasi pengetahuan dan keterampilan bertani, sekaligus menghambat adopsi inovasi teknologi baru yang umumnya lebih mudah diterima oleh kelompok usia produktif. Di samping itu, ketimpangan penguasaan lahan turut menjadi tantangan struktural, karena mayoritas petani di Indonesia mengelola lahan berskala sempit dengan produktivitas dan efisiensi yang relatif rendah, sehingga rentan terjebak dalam siklus kemiskinan struktural apabila tidak diintervensi melalui kebijakan konsolidasi lahan, korporasi petani, atau skema pembiayaan yang inklusif.

F. Pertanian Berkelanjutan dalam Perspektif SDGs

Agenda Pembangunan Berkelanjutan 2030 (*Sustainable Development Goals*/SDGs) yang disepakati oleh negara-negara anggota Perserikatan Bangsa-Bangsa menempatkan pertanian berkelanjutan sebagai elemen sentral dalam pencapaian berbagai tujuan pembangunan global. Tujuan kedua atau SDG 2 secara eksplisit menargetkan penghapusan kelaparan (*zero hunger*), pencapaian ketahanan pangan, perbaikan gizi, serta promosi pertanian berkelanjutan pada tahun 2030. Namun demikian, kontribusi pertanian berkelanjutan tidak terbatas pada SDG 2 saja, melainkan beririsan secara langsung maupun tidak langsung dengan sejumlah tujuan pembangunan berkelanjutan lainnya.

Pengarusutamaan agenda SDGs ke dalam kebijakan pembangunan pertanian nasional di Indonesia tercermin dalam berbagai dokumen perencanaan strategis, mulai dari Rencana Pembangunan

Jangka Menengah Nasional hingga Rencana Strategis Kementerian Pertanian, yang secara eksplisit mengadopsi target-target SDGs sebagai salah satu kerangka acuan penyusunan program dan indikator kinerja. Pendekatan ini memungkinkan sinkronisasi antara agenda pembangunan pertanian domestik dengan komitmen global, sekaligus membuka akses terhadap dukungan pembiayaan dan kerja sama teknis internasional yang berorientasi pada pencapaian target-target keberlanjutan tersebut.

Tabel 1.3 Keterkaitan Pertanian Berkelanjutan dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan

Tujuan SDGs	Fokus Tujuan	Kontribusi Pertanian Berkelanjutan
SDG 1	Tanpa Kemiskinan	Peningkatan pendapatan dan mata pencaharian petani kecil
SDG 2	Tanpa Kelaparan	Peningkatan produksi pangan bergizi secara berkelanjutan
SDG 6	Air Bersih dan Sanitasi	Efisiensi dan konservasi penggunaan air irigasi
SDG 12	Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab	Pengurangan susut dan sisa pangan (*food loss & waste*)
SDG 13	Penanganan Perubahan Iklim	Adaptasi dan mitigasi emisi gas rumah kaca sektor pertanian
SDG 15	Ekosistem Daratan	Konservasi lahan, hutan, dan keanekaragaman hayati agraris

Keterkaitan lintas tujuan tersebut menegaskan bahwa pertanian berkelanjutan berfungsi sebagai simpul penghubung (*nexus*) antara agenda pengentasan kemiskinan, ketahanan pangan, pengelolaan sumber daya air, konsumsi bertanggung jawab, penanganan perubahan iklim, dan konservasi ekosistem daratan. Implikasinya, strategi pembangunan pertanian berkelanjutan perlu dirancang secara terintegrasi lintas sektor, tidak hanya melibatkan kementerian atau lembaga yang menangani urusan pertanian, tetapi juga sektor lingkungan hidup, sumber daya air,

perdagangan, dan perencanaan pembangunan nasional agar pencapaian target SDGs dapat berlangsung secara sinergis dan efisien.

Pemantauan kemajuan pencapaian SDGs sektor pertanian di Indonesia dilakukan melalui sejumlah indikator resmi yang tercantum dalam dokumen Rencana Aksi Nasional SDGs, mencakup antara lain prevalensi ketidakcukupan konsumsi pangan, proporsi anggaran pemerintah untuk sektor pertanian, indeks produksi pangan berkelanjutan, serta luasan lahan pertanian yang dikelola dengan praktik produktif dan berkelanjutan. Meskipun capaian pada sejumlah indikator menunjukkan tren positif, beberapa indikator lain seperti prevalensi *stunting* dan kesenjangan produktivitas antarwilayah masih memerlukan percepatan intervensi. Kondisi ini menegaskan bahwa pencapaian SDGs sektor pertanian bukan hanya persoalan teknis peningkatan produksi, melainkan juga menyangkut pemerataan pembangunan wilayah dan penguatan tata kelola sumber daya secara berkeadilan.

G. Hubungan Pertanian Berkelanjutan dan Ketahanan Pangan

Pertanian berkelanjutan dan ketahanan pangan merupakan dua konsep yang saling mengandaikan dan tidak dapat dipisahkan dalam kajian sistem pangan kontemporer. Sistem pertanian yang produktif namun tidak berkelanjutan secara ekologis pada akhirnya akan mengalami penurunan kapasitas produksi akibat degradasi sumber daya alam, sehingga mengancam ketahanan pangan dalam jangka panjang. Sebaliknya, sistem pertanian yang berkelanjutan secara lingkungan namun tidak produktif juga tidak akan mampu memenuhi kebutuhan pangan populasi yang terus bertambah. Oleh karena itu, keberlanjutan dan produktivitas harus dipandang sebagai dua sisi yang saling melengkapi, bukan saling bertentangan (Rachmawatie *et al*., 2020).

Ketahanan pangan yang tangguh mensyaratkan basis produksi pertanian yang mampu bertahan dan pulih dari berbagai guncangan, baik guncangan iklim, ekonomi, maupun sosial. Dalam konteks ini, pertanian berkelanjutan berkontribusi terhadap ketahanan pangan melalui beberapa jalur utama, yaitu peningkatan produktivitas lahan secara berkelanjutan, diversifikasi sumber pangan untuk mengurangi ketergantungan pada komoditas tunggal, penguatan resiliensi petani terhadap perubahan iklim, serta pelestarian sumber daya genetik

pertanian sebagai basis inovasi pangan di masa depan. Alfarizi dan Ngatindriatun (2023) menunjukkan bahwa penerapan praktik pertanian berkelanjutan berkorelasi dengan peningkatan akses pangan rumah tangga tani, baik untuk konsumsi sendiri maupun sebagai sumber pendapatan dari hasil surplus produksi.

Gambar 1.2 Keterkaitan Pertanian Berkelanjutan dan Ketahanan Pangan



Sumber: Rachmawatie et al. (2020) dan Alfarizi & Ngatindriatun (2023)

Hubungan timbal balik antara pertanian berkelanjutan dan ketahanan pangan juga dapat dilihat dari perspektif siklis, di mana ketahanan pangan yang terjaga akan menghasilkan tenaga kerja yang lebih sehat dan produktif untuk mengelola usaha tani secara berkelanjutan, sementara usaha tani yang berkelanjutan pada gilirannya akan menopang ketahanan pangan generasi berikutnya. Siklus positif ini hanya dapat terwujud apabila didukung oleh kebijakan yang konsisten dan investasi jangka panjang pada riset, infrastruktur, serta kapasitas sumber daya manusia pertanian, sehingga keberlanjutan benar-benar terinternalisasi dalam praktik pembangunan pertanian sehari-hari di tingkat lapangan.



BAB II
KETAHANAN PANGAN DAN SISTEM *AGRIFOOD* MODERN

A. Konsep Ketahanan Pangan

Ketahanan pangan atau *food security* didefinisikan oleh FAO sebagai suatu kondisi ketika seluruh manusia, pada setiap waktu, memiliki akses secara fisik, sosial, dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi, guna memenuhi kebutuhan dan preferensi pangan mereka untuk hidup aktif dan sehat. Definisi ini telah mengalami evolusi konseptual yang signifikan sejak pertama kali dirumuskan pada Konferensi Pangan Dunia tahun 1974, yang semula berfokus pada aspek ketersediaan pangan pada tingkat global dan nasional, kemudian berkembang menjadi konsep yang lebih menyeluruh dengan menekankan aspek akses rumah tangga dan individu (FAO, 2023).

Perkembangan mutakhir konsep ketahanan pangan turut memasukkan dimensi *agency* atau keberdayaan, yaitu kapasitas individu maupun kelompok untuk membuat keputusan secara mandiri mengenai pangan yang dikonsumsi, serta dimensi keberlanjutan yang menekankan pentingnya sistem pangan yang tidak mengorbankan kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhan pangannya. Perluasan definisi ini mencerminkan pengakuan bahwa ketahanan pangan tidak dapat direduksi menjadi persoalan teknis produksi semata, melainkan juga menyangkut keadilan distribusi, kedaulatan pangan masyarakat lokal, dan keberlanjutan ekologis sistem produksi pangan itu sendiri.

Di tingkat nasional, Badan Pusat Statistik bersama Badan Pangan Nasional secara rutin memantau capaian ketahanan pangan Indonesia melalui berbagai indikator komposit, termasuk Indeks Ketahanan Pangan yang mengukur kinerja wilayah berdasarkan aspek ketersediaan, keterjangkauan, dan pemanfaatan pangan (BPS, 2023). Pemantauan berkelanjutan ini penting mengingat kondisi ketahanan pangan

antarwilayah di Indonesia sangat beragam, dipengaruhi oleh faktor geografis, infrastruktur, daya beli masyarakat, serta tingkat keberhasilan produksi pangan lokal. Pemahaman konsep ketahanan pangan secara komprehensif menjadi prasyarat penting sebelum merumuskan strategi intervensi kebijakan yang tepat sasaran.

Penting untuk membedakan konsep ketahanan pangan (*food security*) dengan konsep kedaulatan pangan (*food sovereignty*) yang berkembang sebagai kritik terhadap pendekatan ketahanan pangan yang dianggap terlalu berorientasi pasar global. Kedaulatan pangan menekankan hak masyarakat dan negara untuk menentukan sendiri kebijakan pangan dan pertaniannya, termasuk hak untuk memproduksi pangan sesuai kebutuhan domestik tanpa didikte oleh kepentingan pasar internasional. Kedua konsep tersebut pada dasarnya saling melengkapi, karena kedaulatan pangan dapat menjadi jalur strategis untuk mencapai ketahanan pangan yang lebih mandiri dan berkelanjutan, khususnya bagi negara berkembang dengan basis sumber daya pertanian lokal yang beragam seperti Indonesia.

Pengukuran ketahanan pangan pada tingkat rumah tangga umumnya menggunakan sejumlah instrumen survei yang telah tervalidasi secara internasional, seperti *Household Food Insecurity Access Scale* (HFIAS) dan *Food Consumption Score* (FCS), yang mengukur tingkat kecukupan dan keragaman konsumsi pangan rumah tangga dalam periode waktu tertentu. Instrumen-instrumen tersebut memungkinkan pemerintah dan lembaga penelitian untuk memetakan sebaran kerawanan pangan secara lebih presisi hingga tingkat kecamatan atau desa, sehingga intervensi kebijakan dapat dirancang secara lebih tepat sasaran dibandingkan pendekatan yang hanya mengandalkan data agregat produksi pada tingkat kabupaten atau provinsi.

B. Pilar Ketahanan Pangan

Secara konvensional, ketahanan pangan dibangun di atas empat pilar utama, yaitu ketersediaan (*availability*), akses (*access*), pemanfaatan (*utilization*), dan stabilitas (*stability*). Ketersediaan pangan merujuk pada kecukupan pasokan pangan dari hasil produksi domestik, cadangan, maupun impor. Akses pangan berkaitan dengan kemampuan ekonomi dan fisik rumah tangga untuk memperoleh pangan yang cukup,

sementara pemanfaatan pangan menyangkut kualitas gizi, keamanan pangan, serta praktik konsumsi yang sehat. Adapun stabilitas pangan menekankan konsistensi ketersediaan dan akses pangan sepanjang waktu, tanpa terganggu oleh fluktuasi musiman, krisis ekonomi, maupun bencana alam.

Tabel 2.1 Enam Pilar Ketahanan Pangan Kontemporer

Pilar	Definisi Operasional	Contoh Indikator
Ketersediaan (*Availability*)	Kecukupan pasokan pangan dari produksi, cadangan, dan impor	Rasio produksi terhadap konsumsi, luas panen, produktivitas
Akses (*Access*)	Kemampuan ekonomi dan fisik memperoleh pangan	Tingkat kemiskinan, harga pangan, aksesibilitas distribusi
Pemanfaatan (*Utilization*)	Kualitas gizi dan keamanan pangan yang dikonsumsi	Prevalensi stunting, keragaman konsumsi pangan
Stabilitas (*Stability*)	Konsistensi ketersediaan dan akses pangan sepanjang waktu	Volatilitas harga pangan, frekuensi kerawanan pangan musiman
Keberdayaan (*Agency*)	Kapasitas mandiri menentukan pilihan pangan	Partisipasi dalam kebijakan pangan, kedaulatan produsen lokal
Keberlanjutan (*Sustainability*)	Kelestarian sistem produksi pangan jangka panjang	Jejak karbon pangan, indeks kesehatan lahan pertanian

Keenam pilar tersebut bersifat saling bergantung dan harus dipenuhi secara simultan agar suatu wilayah dapat dikategorikan memiliki tingkat ketahanan pangan yang baik. Ketimpangan pemenuhan antarpilar, misalnya ketersediaan pangan yang mencukupi namun tidak diikuti dengan akses ekonomi yang memadai, dapat tetap menghasilkan

kondisi kerawanan pangan pada level rumah tangga, meskipun secara agregat wilayah tersebut surplus produksi. Fenomena ini banyak dijumpai pada wilayah sentra produksi pangan yang justru memiliki prevalensi kerawanan pangan tinggi akibat rendahnya daya beli dan buruknya infrastruktur distribusi.

Dalam konteks perencanaan pembangunan daerah, pemetaan pilar ketahanan pangan secara spasial melalui Peta Ketahanan dan Kerentanan Pangan (*Food Security and Vulnerability Atlas*/FSVA) menjadi instrumen penting bagi pemerintah daerah untuk mengidentifikasi wilayah prioritas intervensi. Peta tersebut mengombinasikan berbagai indikator dari keenam pilar ketahanan pangan menjadi indeks komposit yang memungkinkan perbandingan tingkat kerentanan pangan antarkecamatan atau antarkabupaten secara sistematis, sehingga alokasi sumber daya program ketahanan pangan dapat diarahkan secara lebih tepat sasaran kepada wilayah-wilayah dengan tingkat kerentanan tertinggi.

C. Sistem *Agrifood* Berkelanjutan

Sistem *agrifood* (*agrifood system*) merujuk pada keseluruhan rangkaian aktivitas dan pelaku yang terlibat dalam produksi, pengolahan, distribusi, dan konsumsi pangan, beserta hasil-hasil yang ditimbulkannya terhadap aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan. Konsep sistem *agrifood* berkelanjutan menekankan bahwa seluruh mata rantai tersebut, mulai dari sarana produksi, budi daya, panen, pascapanen, pengolahan, distribusi, hingga konsumsi akhir, harus dirancang agar memberikan manfaat ekonomi yang layak, dampak sosial yang adil, serta jejak lingkungan yang minimal (FAO, 2023).

Transformasi menuju sistem *agrifood* berkelanjutan menuntut perubahan pada berbagai simpul rantai nilai secara simultan. Pada simpul hulu, transformasi mencakup adopsi praktik budi daya regeneratif dan efisiensi input produksi. Pada simpul tengah, transformasi menekankan pengurangan susut hasil pascapanen (*postharvest loss*) serta efisiensi energi dalam pengolahan pangan. Adapun pada simpul hilir, transformasi berfokus pada pengurangan sisa pangan (*food waste*) di tingkat ritel dan konsumen, serta promosi pola konsumsi pangan yang lebih berkelanjutan dan bergizi seimbang.

Gambar 2.1 Rantai Sistem *Agrifood* Berkelanjutan



Pendekatan sistem *agrifood* berkelanjutan juga menekankan pentingnya *food system governance* atau tata kelola sistem pangan yang melibatkan berbagai pemangku kepentingan, mulai dari petani, pelaku usaha, akademisi, pemerintah, hingga konsumen. Tata kelola yang inklusif dan berbasis bukti ilmiah menjadi kunci keberhasilan transformasi sistem *agrifood*, mengingat kompleksitas interaksi antarpelaku dan kepentingan yang sering kali saling bertentangan dalam rantai nilai pangan. World Bank (2022) menekankan bahwa investasi pada infrastruktur logistik pangan dan sistem informasi pasar merupakan prasyarat penting untuk meningkatkan efisiensi dan ketahanan sistem *agrifood* di negara berkembang.

Digitalisasi turut menjadi katalisator penting dalam transformasi sistem *agrifood* berkelanjutan pada dekade terakhir. Platform pasar digital (*digital marketplace*) memungkinkan petani menjangkau konsumen secara lebih langsung dengan memangkas mata rantai distribusi yang panjang, sementara teknologi ketertelusuran berbasis

blockchain mulai diadopsi untuk meningkatkan transparansi asal-usul produk pangan bagi konsumen yang semakin peduli terhadap keberlanjutan. Selain itu, pemanfaatan data besar (*big data*) dan kecerdasan buatan dalam peramalan produksi dan permintaan pangan membantu pelaku rantai nilai mengurangi ketidaksesuaian pasokan-permintaan yang selama ini menjadi salah satu penyebab utama tingginya angka susut dan sisa pangan pada sistem *agrifood* konvensional.

Salah satu tantangan utama dalam transformasi sistem *agrifood* berkelanjutan adalah keterbatasan kapasitas petani skala kecil untuk memenuhi standar keberlanjutan dan sertifikasi yang semakin banyak dituntut oleh pasar global, seperti sertifikasi organik, *Rainforest Alliance, atau Roundtable on Sustainable Palm Oil* (RSPO). Proses sertifikasi tersebut sering kali memerlukan biaya dan kapasitas administratif yang tidak terjangkau oleh petani kecil, sehingga berpotensi menciptakan eksklusi pasar bagi kelompok produsen yang justru paling membutuhkan akses terhadap pasar bernilai tambah tinggi. Oleh karena itu, skema sertifikasi kelompok (*group certification*) dan pendampingan teknis yang difasilitasi oleh pemerintah maupun lembaga nonpemerintah menjadi pendekatan penting untuk memastikan transformasi sistem *agrifood* berkelanjutan tidak meninggalkan petani kecil di belakang.

D. Dinamika Produksi dan Konsumsi Pangan Global

Produksi pangan global terus mengalami peningkatan seiring kemajuan teknologi pertanian, namun pertumbuhan tersebut belum mampu mengimbangi laju pertumbuhan permintaan yang dipicu oleh pertambahan populasi dan perubahan pola konsumsi masyarakat, khususnya pergeseran menuju konsumsi produk hewani yang lebih tinggi seiring peningkatan pendapatan (FAO, 2023). Pada saat yang sama, distribusi produksi pangan global sangat tidak merata, dengan sebagian kecil negara menguasai pangsa produksi komoditas strategis seperti serealia, sehingga menciptakan ketergantungan tinggi negara-negara importir terhadap pasar pangan internasional yang rentan terhadap gejolak harga.

Tabel 2.2 Dinamika Produksi dan Isu Utama Komoditas Pangan Strategis Global

Komoditas	Karakteristik Tren Produksi Global	Isu Utama
Padi/Beras	Produksi terkonsentrasi di kawasan Asia, pertumbuhan melambat	Emisi metana, keterbatasan lahan sawah baru
Gandum	Sangat rentan terhadap gangguan iklim dan geopolitik	Ketergantungan impor tinggi bagi negara nonprodusen
Jagung	Permintaan meningkat untuk pangan, pakan, dan bioenergi	Kompetisi penggunaan lahan dan alih fungsi
Kedelai	Ekspansi lahan di kawasan tropis memicu deforestasi	Trade-off antara produksi dan konservasi hutan
Produk hewani	Permintaan tumbuh seiring urbanisasi dan pendapatan	Jejak lingkungan dan emisi gas rumah kaca tinggi

Pergeseran pola konsumsi pangan global juga diiringi oleh fenomena beban ganda gizi (*double burden of malnutrition*), yaitu kondisi ketika permasalahan kekurangan gizi masih terjadi secara bersamaan dengan peningkatan prevalensi obesitas dan penyakit tidak menular akibat konsumsi pangan olahan tinggi kalori. Fenomena ini menegaskan bahwa isu ketahanan pangan pada era modern tidak lagi semata-mata berkaitan dengan kecukupan kalori, tetapi juga kualitas dan keragaman gizi yang dikonsumsi masyarakat. Transformasi pola konsumsi menuju pangan yang lebih beragam, bergizi seimbang, dan diproduksi secara berkelanjutan menjadi agenda penting dalam pembangunan sistem pangan masa depan.

Di Indonesia, dinamika produksi dan konsumsi pangan turut diwarnai oleh ketergantungan konsumsi yang sangat tinggi terhadap beras sebagai pangan pokok tunggal, meskipun negara ini memiliki

keragaman sumber karbohidrat lokal yang melimpah seperti singkong, ubi jalar, sagu, jagung, dan sorgum. Pola konsumsi yang terkonsentrasi pada satu jenis komoditas pangan pokok tersebut meningkatkan kerentanan sistem pangan nasional terhadap fluktuasi produksi maupun harga beras, sekaligus menghambat optimalisasi potensi pangan lokal yang sebenarnya lebih adaptif terhadap kondisi agroekologis setempat. Upaya diversifikasi konsumsi pangan karenanya menjadi agenda strategis jangka panjang yang memerlukan intervensi dari sisi produksi, pengolahan, maupun perubahan preferensi konsumen melalui edukasi gizi yang berkelanjutan.

Dinamika perdagangan pangan internasional turut memengaruhi pola produksi dan konsumsi pangan domestik melalui mekanisme harga dan ketersediaan komoditas impor. Ketergantungan Indonesia terhadap impor sejumlah komoditas strategis, seperti gandum, kedelai, dan gula, menempatkan sistem pangan nasional pada posisi yang rentan terhadap gejolak harga pasar internasional maupun kebijakan pembatasan ekspor yang diterapkan negara produsen utama pada masa krisis. Kondisi ini menegaskan pentingnya strategi diversifikasi sumber pasokan, baik melalui optimalisasi produksi domestik maupun diversifikasi negara mitra dagang, sebagai bagian dari manajemen risiko rantai pasok pangan nasional yang lebih tangguh terhadap guncangan eksternal.

E. Ancaman terhadap Ketahanan Pangan

Ketahanan pangan global dan nasional dihadapkan pada berbagai ancaman multidimensi yang saling berinteraksi secara kompleks. World Bank (2022) mengidentifikasi bahwa kombinasi antara konflik bersenjata, dampak lanjutan pandemi, serta gangguan rantai pasok akibat gejolak geopolitik telah mendorong lonjakan harga pangan dan energi secara signifikan pada periode 2021–2022, yang berdampak luas terhadap peningkatan jumlah penduduk mengalami kerawanan pangan akut di berbagai kawasan dunia. Ancaman tersebut diperparah oleh dampak perubahan iklim yang meningkatkan frekuensi kekeringan, banjir, dan anomali cuaca yang mengganggu musim tanam dan panen pada berbagai wilayah produksi pangan utama.

1. Perubahan iklim dan cuaca ekstrem yang menurunkan produktivitas dan stabilitas produksi pangan.

2. Konflik geopolitik dan perang yang mengganggu rantai pasok pangan dan input produksi global.
3. Volatilitas harga pangan dan energi yang menekan daya beli masyarakat berpendapatan rendah.
4. Degradasi sumber daya lahan dan air akibat eksploitasi berlebihan dan alih fungsi lahan.
5. Kerentanan rantai pasok terhadap guncangan eksternal seperti pandemi dan bencana alam.
6. Kesenjangan akses teknologi dan informasi antarwilayah dan antarkelompok sosial.

Gambar 2.2 Peta Ancaman Multidimensi terhadap Ketahanan Pangan



Di tingkat nasional, ancaman terhadap ketahanan pangan Indonesia turut diperparah oleh faktor struktural seperti fragmentasi lahan pertanian akibat pewarisan, rendahnya regenerasi petani muda, serta ketergantungan pada impor sejumlah komoditas pangan strategis. Kondisi ini menuntut kewaspadaan dan kesiapsiagaan yang tinggi dari pemerintah dan seluruh pemangku kepentingan dalam merumuskan kebijakan mitigasi risiko, baik melalui penguatan cadangan pangan pemerintah, diversifikasi sumber pangan, maupun penguatan sistem peringatan dini kerawanan pangan berbasis data.

Ancaman terhadap ketahanan pangan juga perlu dipahami melalui perspektif kerentanan berlapis (*compounding vulnerability*), di mana satu jenis guncangan dapat memperbesar dampak guncangan lainnya secara beruntun. Sebagai ilustrasi, gagal panen akibat kekeringan pada suatu musim tanam dapat memicu penurunan pendapatan petani, yang kemudian menurunkan kapasitas mereka untuk berinvestasi pada

input produksi musim berikutnya, sehingga menciptakan siklus penurunan produktivitas yang berkelanjutan apabila tidak diintervensi. Pemahaman terhadap sifat berlapis dan saling terkait dari berbagai ancaman ini penting agar kebijakan mitigasi tidak dirancang secara parsial, melainkan sebagai satu kesatuan strategi manajemen risiko sistem pangan yang komprehensif dan antisipatif.

Kesiapsiagaan menghadapi ancaman ketahanan pangan juga memerlukan penguatan sistem peringatan dini (*early warning system*) yang mengintegrasikan data iklim, data produksi, dan data harga pangan secara real-time, sehingga pemerintah dapat mengambil langkah antisipatif sebelum kondisi kerawanan pangan meluas menjadi krisis. Pengalaman berbagai negara menunjukkan bahwa keterlambatan respons kebijakan terhadap sinyal awal krisis pangan, seperti lonjakan harga komoditas pokok atau anomali cuaca ekstrem pada musim tanam, cenderung memperbesar skala dan durasi dampak krisis pangan yang terjadi, sehingga investasi pada sistem deteksi dini menjadi salah satu bentuk mitigasi risiko yang paling efisien secara biaya dibandingkan penanganan krisis pangan setelah terjadi secara luas.

F. Strategi Penguatan Ketahanan Pangan Nasional

Pemerintah Indonesia telah merumuskan berbagai strategi untuk memperkuat ketahanan pangan nasional dalam menghadapi tantangan domestik maupun global. Strategi tersebut mencakup peningkatan produksi pangan domestik melalui optimalisasi lahan dan intensifikasi berkelanjutan, diversifikasi pangan berbasis sumber daya lokal untuk mengurangi ketergantungan pada beras dan gandum, penguatan cadangan pangan pemerintah dan masyarakat, serta pengembangan korporasi petani guna meningkatkan skala ekonomi dan posisi tawar petani kecil dalam rantai nilai pangan.

Tabel 2.3 Ringkasan Strategi Penguatan Ketahanan Pangan Nasional Indonesia

Strategi	Deskripsi Singkat	Contoh Implementasi
Optimalisasi produksi domestik	Peningkatan produktivitas melalui intensifikasi dan ekstensifikasi berkelanjutan	Perluasan area tanam, penggunaan benih unggul dan irigasi efisien
Diversifikasi pangan lokal	Pengembangan pangan alternatif berbasis kearifan lokal	Pemanfaatan sagu, sorgum, umbi-umbian, dan pangan lokal lain
Penguatan cadangan pangan	Pembangunan lumbung pangan pemerintah dan masyarakat	Cadangan Pangan Pemerintah (CPP) dan lumbung desa
Korporasi petani	Konsolidasi kelembagaan petani skala kecil	Pembentukan koperasi dan korporasi petani berbasis kawasan
Digitalisasi data pangan	Penguatan sistem informasi dan peringatan dini	Sistem Informasi Pangan Strategis Nasional (SIPS)

Selain strategi struktural tersebut, penguatan ketahanan pangan nasional juga memerlukan sinergi lintas sektor antara kementerian teknis, pemerintah daerah, sektor swasta, akademisi, dan masyarakat sipil. Djibran (2023) menekankan bahwa dukungan kebijakan yang memfasilitasi pelatihan, penyuluhan, dan akses teknologi pertanian berkelanjutan menjadi faktor determinan keberhasilan implementasi strategi ketahanan pangan di tingkat lapangan, khususnya bagi petani skala kecil yang menghadapi keterbatasan modal dan akses informasi. Pendekatan partisipatif yang melibatkan petani sebagai mitra sejajar dalam perumusan kebijakan, bukan sekadar objek program, terbukti meningkatkan efektivitas dan keberlanjutan program ketahanan pangan dalam jangka panjang.

Efektivitas strategi penguatan ketahanan pangan nasional juga sangat bergantung pada ketersediaan pembiayaan yang memadai dan

berkelanjutan, baik yang bersumber dari anggaran pemerintah pusat, pemerintah daerah, maupun skema pembiayaan inovatif seperti obligasi hijau (*green bond*) dan kemitraan pemerintah-swasta. Selain itu, penguatan riset dan pengembangan varietas unggul yang adaptif terhadap perubahan iklim, penguatan sistem irigasi yang efisien, serta pengembangan sumber daya manusia pertanian melalui pendidikan vokasi dan penyuluhan berbasis digital menjadi elemen pendukung yang tidak kalah penting dalam memastikan keberlanjutan strategi ketahanan pangan nasional dalam jangka panjang.

G. Peran Pertanian Berkelanjutan dalam Ketahanan Pangan

1. Meningkatkan Ketersediaan Pangan Secara Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan berperan penting dalam menjamin ketersediaan pangan melalui peningkatan produktivitas yang tetap menjaga kelestarian sumber daya alam. Berbeda dengan sistem pertanian konvensional yang sering bergantung pada penggunaan pupuk dan pestisida kimia secara berlebihan, pertanian berkelanjutan mengutamakan pengelolaan tanah, air, dan keanekaragaman hayati secara bijaksana. Praktik seperti rotasi tanaman, penggunaan pupuk organik, pengendalian hama terpadu (*Integrated Pest Management*/IPM), dan konservasi lahan mampu mempertahankan kesuburan tanah serta menjaga produktivitas dalam jangka panjang. Dengan demikian, produksi pangan dapat berlangsung secara konsisten tanpa mengorbankan kualitas lingkungan yang menjadi dasar keberlanjutan sektor pertanian.

Selain meningkatkan hasil produksi, pendekatan ini juga memperkuat stabilitas sistem produksi di tengah berbagai tantangan, seperti perubahan iklim, degradasi lahan, dan keterbatasan sumber daya air. Sistem pertanian yang sehat memiliki kemampuan lebih baik dalam mempertahankan produktivitas ketika menghadapi tekanan lingkungan. Oleh karena itu, pertanian berkelanjutan menjadi fondasi penting dalam memastikan pasokan pangan yang memadai bagi masyarakat secara berkesinambungan.

2. Memperkuat Ketahanan Petani dan Sistem *Agrifood*

Ketahanan pangan tidak hanya ditentukan oleh jumlah pangan yang dihasilkan, tetapi juga oleh kemampuan petani dan sistem agrifood dalam menghadapi berbagai risiko. Pertanian berkelanjutan meningkatkan ketahanan petani melalui diversifikasi usaha tani, efisiensi penggunaan input, penerapan teknologi tepat guna, serta pengembangan kelembagaan petani. Diversifikasi komoditas, misalnya, dapat mengurangi ketergantungan terhadap satu jenis tanaman sehingga risiko kerugian akibat gagal panen atau fluktuasi harga dapat diminimalkan.

Di sisi lain, sistem *agrifood* yang berkelanjutan mengintegrasikan seluruh rantai nilai, mulai dari produksi, pengolahan, distribusi, hingga konsumsi pangan secara lebih efisien. Pengurangan kehilangan hasil panen (*post-harvest loss*), peningkatan kualitas penyimpanan, serta penguatan akses pasar akan meningkatkan nilai tambah produk pertanian dan memperkuat stabilitas pasokan pangan. Dengan demikian, pertanian berkelanjutan tidak hanya menghasilkan pangan, tetapi juga membangun sistem pangan yang lebih tangguh, efisien, dan mampu beradaptasi terhadap perubahan ekonomi maupun lingkungan.

3. Menjaga Kelestarian Sumber Daya Alam sebagai Fondasi Ketahanan Pangan

Ketersediaan pangan pada masa depan sangat bergantung pada kondisi sumber daya alam yang digunakan dalam proses produksi. Oleh karena itu, salah satu peran utama pertanian berkelanjutan adalah menjaga kualitas tanah, air, udara, dan keanekaragaman hayati agar tetap produktif. Pengelolaan lahan secara konservatif, pemanfaatan pupuk organik, agroforestri, konservasi air, serta perlindungan organisme bermanfaat merupakan beberapa praktik yang mendukung keberlanjutan ekosistem pertanian.

Pelestarian sumber daya alam juga berkontribusi dalam meningkatkan kemampuan pertanian menghadapi dampak perubahan iklim, seperti kekeringan, banjir, peningkatan suhu, maupun serangan organisme pengganggu tanaman. Lahan yang memiliki kandungan bahan organik tinggi, misalnya, mampu menyimpan air lebih baik sehingga tanaman lebih tahan terhadap kekeringan. Dengan menjaga kesehatan ekosistem pertanian, produktivitas lahan dapat dipertahankan

dalam jangka panjang sehingga ketahanan pangan tidak hanya terjamin pada masa kini, tetapi juga bagi generasi mendatang.

4. Mendukung Akses dan Pemanfaatan Pangan yang Berkualitas

Peran pertanian berkelanjutan tidak berhenti pada aspek produksi, tetapi juga mendukung akses masyarakat terhadap pangan yang aman, bergizi, dan berkualitas. Produksi pangan yang memperhatikan keamanan pangan, penggunaan bahan kimia secara bijaksana, serta penerapan standar budidaya yang baik menghasilkan produk yang lebih sehat dan memiliki nilai gizi yang lebih terjaga. Hal ini penting untuk mendukung pemanfaatan pangan yang optimal dalam meningkatkan status gizi masyarakat.

Selain itu, pertanian berkelanjutan berkontribusi pada peningkatan kesejahteraan petani melalui efisiensi biaya produksi, peningkatan produktivitas, dan akses terhadap pasar yang lebih luas. Pendapatan petani yang lebih baik akan memperkuat kemampuan rumah tangga dalam memperoleh pangan yang cukup dan bergizi. Pada tingkat nasional, sistem pangan yang berkelanjutan mampu menjaga stabilitas pasokan dan harga pangan sehingga masyarakat memiliki akses yang lebih mudah terhadap kebutuhan pangan pokok. Dengan demikian, pertanian berkelanjutan berperan secara langsung dalam mewujudkan empat pilar ketahanan pangan, yaitu ketersediaan (*availability*), akses (*access*), pemanfaatan (*utilization*), dan stabilitas (*stability*), yang menjadi dasar terciptanya sistem pangan yang tangguh dan berkelanjutan.



BAB III
EKOLOGI PERTANIAN DAN PENGELOLAAN SUMBER DAYA ALAM

A. Ekosistem Pertanian

Ekosistem pertanian atau *agroecosystem* merupakan unit fungsional yang terbentuk dari interaksi kompleks antara komponen biotik dan abiotik yang dikelola oleh manusia untuk menghasilkan bahan pangan, serat, dan energi. Berbeda dengan ekosistem alami yang berkembang tanpa campur tangan manusia secara langsung, ekosistem pertanian dicirikan oleh tingkat intervensi antropogenik yang tinggi, mulai dari pemilihan spesies budidaya, pengaturan pola tanam, hingga manipulasi siklus hara dan air. Menurut Gliessman (2020) dalam kerangka agroekologi kontemporer, ekosistem pertanian harus dipahami sebagai sistem yang dinamis, tidak statis, karena senantiasa dipengaruhi oleh perubahan iklim, tekanan pasar, dan kebijakan agraria yang terus bergeser. Pemahaman ini menjadi fondasi penting bagi mahasiswa dan praktisi pertanian berkelanjutan karena ekosistem pertanian tidak dapat dipisahkan dari konteks sosial-ekologis tempat sistem tersebut berada.

Secara struktural, ekosistem pertanian tersusun atas komponen abiotik seperti tanah, air, udara, cahaya matahari, dan iklim mikro, serta komponen biotik yang meliputi tanaman budidaya, gulma, hama, musuh alami, mikroorganisme tanah, dan manusia sebagai pengelola utama. Astuti *et al*. (2021) menegaskan bahwa keterkaitan antarkomponen tersebut membentuk jejaring aliran energi dan siklus hara yang saling bergantung, sehingga gangguan pada salah satu komponen akan berdampak sistemik terhadap keseluruhan ekosistem. Sebagai contoh, penggunaan pestisida sintetis secara berlebihan tidak hanya menekan populasi hama sasaran, tetapi juga memusnahkan musuh alami dan organisme non-target lainnya, yang pada akhirnya dapat memicu ledakan hama sekunder (*secondary pest outbreak*). Fenomena ini memperlihatkan bahwa pendekatan reduksionis dalam pengelolaan

pertanian konvensional kerap mengabaikan kompleksitas relasi ekologis yang sesungguhnya menopang produktivitas jangka panjang.

Konsep jasa ekosistem (*ecosystem services*) menjadi kerangka analitis penting untuk memahami kontribusi ekosistem pertanian terhadap kesejahteraan manusia. Merujuk pada klasifikasi *Millennium Ecosystem Assessment* yang terus diperbarui dalam literatur terkini, jasa ekosistem pertanian dapat dikelompokkan menjadi empat kategori: jasa penyediaan (*provisioning services*) seperti pangan dan bahan baku; jasa pengaturan (*regulating services*) seperti pengaturan iklim mikro dan penyerbukan; jasa pendukung (*supporting services*) seperti siklus hara dan pembentukan tanah; serta jasa budaya (*cultural services*) yang mencakup nilai estetika dan warisan agraris. Wulandari dan Prasetyo (2022) melalui studi pada lanskap pertanian di Jawa Tengah menunjukkan bahwa sistem pertanian dengan diversitas struktural tinggi, seperti kombinasi sawah-pekarangan-tegalan, mampu menghasilkan jasa ekosistem yang lebih beragam dibandingkan sistem monokultur intensif, sekaligus memberikan bantalan ekonomi bagi rumah tangga petani ketika terjadi gagal panen pada salah satu komoditas.

Dari perspektif tipologi, ekosistem pertanian dapat dibedakan berdasarkan tingkat input, intensitas pengelolaan, dan derajat keterbukaan terhadap ekosistem alami di sekitarnya. Sistem pertanian intensif dicirikan oleh input eksternal tinggi berupa pupuk kimia, pestisida sintetis, dan mekanisasi, sementara sistem pertanian tradisional atau agroekologis cenderung mengandalkan siklus hara internal dan keseimbangan biologis. Altieri dan Nicholls (2020) berpendapat bahwa transisi menuju sistem pertanian yang lebih berkelanjutan memerlukan pergeseran paradigma dari model input eksternal tinggi menuju model yang mengoptimalkan proses ekologis internal, seperti fiksasi nitrogen biologis, pengendalian hama alami, dan daur ulang bahan organik. Pergeseran ini bukan sekadar perubahan teknis, melainkan juga perubahan cara pandang petani dan pembuat kebijakan terhadap lahan pertanian sebagai entitas ekologis yang hidup, bukan semata-mata sebagai media produksi.

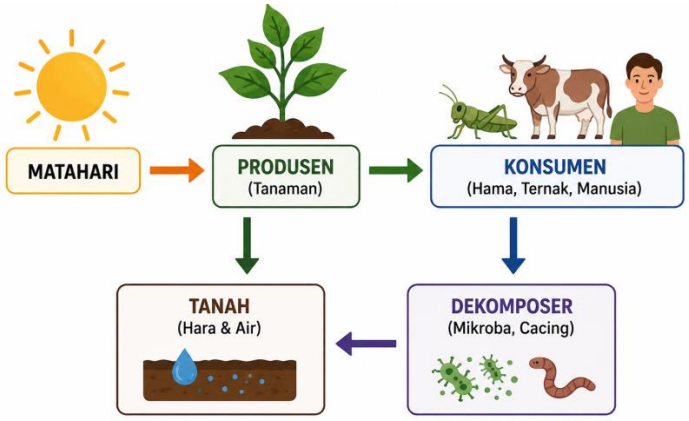
Tabel 3.1 Klasifikasi Komponen Ekosistem Pertanian dan Fungsi Ekologisnya

Komponen	Contoh	Fungsi Ekologis Utama
Abiotik	Tanah, air, udara, cahaya	Media tumbuh, penyimpan hara, pengatur iklim mikro
Produsen	Tanaman budidaya, gulma	Fiksasi energi matahari melalui fotosintesis
Konsumen	Hama, satwa liar, ternak	Pemanfaat biomassa, penyeimbang rantai makan
Dekomposer	Bakteri, fungi, cacing tanah	Penguraian bahan organik, siklus hara
Pengelola	Petani, kelembagaan tani	Pengambil keputusan, pengatur input dan output sistem

Sumber: Gliessman (2020), Astuti et al. (2021)

Interaksi antara komponen-komponen tersebut dapat digambarkan sebagai jejaring aliran energi dan materi yang bersifat siklik, bukan linear. Energi matahari yang ditangkap oleh produsen dialirkan ke tingkat trofik berikutnya melalui proses konsumsi, sementara materi organik yang terurai oleh dekomposer dikembalikan ke dalam tanah sebagai hara yang dapat diserap kembali oleh tanaman. Diagram berikut menggambarkan alur interaksi tersebut secara sederhana untuk memudahkan pemahaman konseptual.

Gambar 3.1 Alur Interaksi Komponen dalam Ekosistem Pertanian



Panah menunjukkan arah aliran energi dan materi. Siklus ini berjalan berkelanjutan selama tidak terjadi gangguan struktural yang signifikan pada salah satu komponen. Pemahaman terhadap ekosistem pertanian sebagai sistem yang saling terhubung memiliki implikasi praktis yang signifikan dalam perumusan kebijakan dan praktik lapangan. Ketika petani atau pengambil kebijakan memandang lahan pertanian semata sebagai unit produksi tanpa mempertimbangkan fungsi ekologisnya, maka intervensi yang dilakukan cenderung bersifat jangka pendek dan berisiko menimbulkan eksternalitas negatif, seperti pencemaran air tanah akibat residu pupuk dan pestisida, penurunan populasi penyerbuk alami, serta degradasi struktur tanah. Sebaliknya, pendekatan berbasis ekosistem memungkinkan perancangan sistem pertanian yang lebih resilien terhadap gangguan eksternal, termasuk perubahan iklim dan fluktuasi harga input pertanian, sebagaimana ditegaskan oleh Hidayat *et al*. (2023) dalam kajian mereka tentang ketahanan agroekosistem di kawasan rentan kekeringan.

1. Dinamika Trofik dan Rantai Pangan dalam Ekosistem Pertanian

Struktur trofik ekosistem pertanian terdiri atas beberapa tingkatan yang saling berkaitan, mulai dari produsen primer, konsumen primer dan sekunder, hingga dekomposer yang menutup siklus materi. Kompleksitas rantai makanan ini menentukan stabilitas ekosistem terhadap gangguan, karena jejaring makanan yang lebih kompleks umumnya memiliki kapasitas penyangga (*buffering capacity*) yang lebih tinggi dibandingkan rantai makanan sederhana yang mendominasi lahan monokultur. Astuti *et al*. (2021) menjelaskan bahwa penyederhanaan struktur trofik akibat praktik budidaya intensif, misalnya melalui eliminasi vegetasi non-budidaya di sekitar petakan sawah, secara langsung menurunkan jumlah interaksi predator-mangsa yang berfungsi sebagai pengendali hama alami, sehingga sistem menjadi lebih bergantung pada input pestisida sintetis untuk menjaga produktivitas.

Pada level praktis, pengelola lahan dapat memperkaya struktur trofik ekosistem pertanian melalui berbagai intervensi sederhana namun berdampak signifikan terhadap keseimbangan ekologis jangka panjang. Penyediaan habitat mikro bagi musuh alami, pemeliharaan vegetasi tepi lahan, serta pengurangan frekuensi gangguan mekanis pada tanah

merupakan beberapa contoh intervensi yang relatif mudah diterapkan oleh petani skala kecil tanpa memerlukan investasi besar. Berikut disajikan beberapa poin penting terkait prinsip pengelolaan ekosistem pertanian yang perlu diperhatikan oleh pengelola lahan dan pembuat kebijakan.

a. Menjaga heterogenitas struktural lanskap melalui kombinasi tanaman, vegetasi tepi lahan, dan area non-budidaya untuk mendukung keragaman fungsional.
b. Meminimalkan penggunaan input kimia sintetis yang dapat mengganggu jejaring rantai makanan alami dalam ekosistem.
c. Mengintegrasikan pemantauan periodik terhadap indikator kesehatan ekosistem, seperti populasi musuh alami dan aktivitas penyerbuk.
d. Melibatkan petani dalam perencanaan tata kelola lahan berbasis prinsip ekologis, bukan semata pertimbangan produksi jangka pendek.
e. Mendorong penelitian lokal mengenai interaksi spesifik antarkomponen ekosistem pada agroekosistem setempat guna mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti.

2. Ekosistem Pertanian sebagai Sistem Sosial-Ekologis

Perspektif sistem sosial-ekologis (*social-ecological system*) menegaskan bahwa ekosistem pertanian tidak dapat dipahami secara utuh tanpa mempertimbangkan aktor manusia sebagai bagian integral dari sistem, bukan sekadar pengelola eksternal. Keputusan petani mengenai pola tanam, penggunaan input, dan alokasi tenaga kerja dipengaruhi oleh faktor ekologis sekaligus faktor sosial-ekonomi, seperti akses pasar, norma budaya, dan kebijakan pemerintah, sehingga perubahan pada satu domain akan senantiasa memengaruhi domain lainnya secara timbal balik. Astuti *et al*. (2021) menggarisbawahi bahwa program intervensi pertanian yang hanya berfokus pada aspek teknis-ekologis tanpa mempertimbangkan dinamika sosial-ekonomi petani cenderung mengalami tingkat keberlanjutan yang rendah pascaberakhirnya pendampingan proyek, karena perubahan praktik yang tidak diinternalisasi secara sosial mudah kembali ke pola lama begitu insentif eksternal dihentikan.

Implikasi dari perspektif ini adalah perlunya pendekatan transdisipliner dalam penelitian dan pengembangan sistem pertanian berkelanjutan, yang menggabungkan kajian ekologi, agronomi, sosiologi pedesaan, dan ekonomi pertanian secara terintegrasi. Pendekatan semacam ini menuntut kolaborasi lintas disiplin ilmu yang selama ini kerap berjalan secara terpisah dalam institusi pendidikan dan penelitian pertanian di Indonesia, sehingga penguatan kurikulum yang mengintegrasikan berbagai perspektif keilmuan tersebut menjadi agenda penting bagi pengembangan sumber daya manusia pertanian di masa depan, sejalan dengan tuntutan kompleksitas permasalahan pertanian berkelanjutan yang semakin multidimensional.

Tabel 3.2 Kategori Jasa Ekosistem Pertanian Menurut *Millennium Ecosystem Assessment*

Kategori Jasa	Contoh pada Lahan Pertanian	Penerima Manfaat Utama
Penyediaan (*provisioning*)	Pangan, pakan ternak, serat, kayu bakar	Rumah tangga petani, konsumen
Pengaturan (*regulating*)	Penyerbukan, pengendalian hama alami, iklim mikro	Petani, ekosistem sekitar
Pendukung (*supporting*)	Siklus hara, pembentukan tanah	Seluruh komponen agroekosistem
Budaya (*cultural*)	Nilai estetika lanskap, warisan agraris	Masyarakat lokal, wisatawan

Sumber: Wulandari & Prasetyo (2022)

B. Kesuburan Tanah dan Kesehatan Tanah

Kesuburan tanah (*soil fertility*) secara tradisional dipahami sebagai kapasitas tanah untuk menyediakan unsur hara esensial dalam jumlah dan proporsi yang sesuai bagi pertumbuhan tanaman. Namun demikian, perkembangan ilmu tanah kontemporer mendorong pergeseran paradigma menuju konsep yang lebih holistik, yaitu kesehatan tanah (*soil health*), yang tidak hanya menitikberatkan pada

aspek kimia, tetapi juga mengintegrasikan dimensi fisik dan biologi tanah secara simultan. Lehmann *et al*. (2020) mendefinisikan kesehatan tanah sebagai kapasitas berkelanjutan tanah untuk berfungsi sebagai sistem hidup yang menopang produktivitas tanaman, menjaga kualitas air dan udara, serta mendukung kesehatan manusia dan hewan. Pergeseran definisi ini penting karena tanah yang subur secara kimiawi belum tentu sehat secara biologis, misalnya tanah yang telah mengalami pemadatan struktural akibat penggunaan alat berat secara intensif.

Indikator kesehatan tanah dapat dikelompokkan ke dalam tiga dimensi utama, yaitu indikator fisik, kimia, dan biologi. Indikator fisik mencakup struktur agregat tanah, porositas, kapasitas infiltrasi air, dan kepadatan curah (*bulk density*). Indikator kimia meliputi pH tanah, kapasitas tukar kation, kandungan bahan organik, serta ketersediaan unsur hara makro dan mikro. Adapun indikator biologi mencakup biomassa mikroba, aktivitas enzim tanah, populasi cacing tanah, dan keragaman komunitas mikrobioma. Nugroho dan Santoso (2021) menekankan bahwa pengukuran kesehatan tanah yang komprehensif memerlukan pendekatan multi-indikator karena satu indikator tunggal tidak mampu merepresentasikan kondisi tanah secara utuh. Sebagai ilustrasi, tanah dengan kandungan hara kimiawi tinggi namun miskin bahan organik dan aktivitas biologi akan tetap rentan terhadap degradasi struktural dalam jangka panjang, meskipun secara kasat mata mampu mendukung produktivitas jangka pendek.

Bahan organik tanah (*soil organic matter*) memegang peranan sentral dalam menjaga kesehatan tanah karena berfungsi sebagai reservoir hara, agen pembentuk agregat tanah, serta habitat bagi mikroorganisme tanah. Penelitian oleh Bunga *et al*. (2022) menunjukkan bahwa penurunan kandungan bahan organik tanah akibat praktik pembakaran jerami dan minimnya rotasi tanaman berkontribusi terhadap penurunan hasil panen sebesar 12 hingga 18 persen dalam kurun waktu satu dekade. Hal ini memperkuat argumen bahwa pengembalian residu tanaman ke dalam sistem, baik melalui pengomposan maupun mulsa, merupakan strategi kunci dalam mempertahankan produktivitas lahan secara berkelanjutan. Selain itu, penambahan bahan organik juga terbukti meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air (*water holding capacity*), yang menjadi krusial pada kondisi iklim dengan curah hujan yang semakin tidak menentu.

Mikrobioma tanah, yang terdiri atas bakteri, fungi, aktinomisetes, dan mikrofauna lainnya, merupakan komponen biologi yang menjalankan fungsi ekosistem esensial, termasuk dekomposisi bahan organik, fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, serta pembentukan simbiosis mikoriza dengan akar tanaman. Fitriani *et al*. (2023) mengungkapkan bahwa aplikasi pupuk hayati (*biofertilizer*) berbasis konsorsium mikroba indigenus mampu meningkatkan efisiensi serapan hara pada tanaman padi hingga 20 persen dibandingkan dengan pemupukan kimia tunggal, sekaligus menurunkan kebutuhan pupuk nitrogen sintetis. Konsep *soil microbiome engineering* yang berkembang dalam lima tahun terakhir membuka peluang besar bagi pengembangan input hayati yang lebih presisi dan ramah lingkungan, meskipun tantangan implementasinya di lapangan masih terkait dengan variabilitas kondisi tanah dan konsistensi kualitas produk hayati yang beredar di pasaran.

Tabel 3.3 Indikator Kesehatan Tanah Berdasarkan Dimensi Fisik, Kimia, dan Biologi

Dimensi	Indikator	Metode Penilaian Umum
Fisik	Struktur agregat, porositas, *bulk density*	Uji stabilitas agregat, penetrometer
Kimia	pH, KTK, bahan organik, hara makro/mikro	Analisis laboratorium tanah
Biologi	Biomassa mikroba, aktivitas enzim, populasi cacing	Fumigasi-ekstraksi, uji respirasi tanah

Sumber: Lehmann *et al*. (2020) dan Nugroho & Santoso (2021)

Degradasi kesuburan tanah akibat praktik budidaya yang tidak berkelanjutan telah menjadi isu global yang mendesak. *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2022) memperkirakan bahwa sekitar sepertiga lahan pertanian dunia telah mengalami degradasi sedang hingga berat, dengan laju kehilangan lapisan tanah subur yang jauh melampaui kemampuan alami tanah untuk membentuk kembali lapisan tersebut. Di Indonesia, degradasi ini diperparah oleh praktik alih fungsi lahan, penggunaan pupuk kimia yang tidak berimbang, serta minimnya penerapan konservasi tanah pada lahan miring. Rahayu *et al*. (2021)

menekankan pentingnya penerapan prinsip pengelolaan tanah terpadu (*integrated soil fertility management*) yang menggabungkan input organik dan anorganik secara sinergis, disesuaikan dengan karakteristik agroekologi setempat, sebagai strategi pemulihan kesuburan tanah yang realistis dan dapat diadopsi oleh petani skala kecil.

Upaya pemulihan dan pemeliharaan kesehatan tanah memerlukan kombinasi praktik agronomis yang saling melengkapi, antara lain rotasi tanaman, penanaman tanaman penutup tanah (c*over crop*), pengurangan intensitas pengolahan tanah (*reduced tillage*), serta pemanfaatan pupuk organik dan hayati. Praktik-praktik tersebut tidak hanya berdampak pada peningkatan produktivitas jangka pendek, tetapi juga berkontribusi terhadap penyimpanan karbon tanah (*soil carbon sequestration*), yang pada gilirannya turut mendukung mitigasi perubahan iklim. Dengan demikian, pengelolaan kesuburan dan kesehatan tanah tidak dapat dipisahkan dari kerangka pertanian berkelanjutan secara keseluruhan, karena tanah yang sehat merupakan fondasi bagi ketahanan pangan jangka panjang serta keberlanjutan ekologis lanskap pertanian secara luas.

1. Pemantauan dan Pemetaan Kesehatan Tanah Berbasis Data

Perkembangan teknologi penginderaan jauh dan analisis data spasial dalam lima tahun terakhir memungkinkan pemetaan variabilitas kesuburan tanah pada skala lanskap dengan tingkat akurasi yang semakin tinggi. Pendekatan *digital soil mapping* yang mengombinasikan data citra satelit multispektral, model elevasi digital, dan data lapangan hasil uji tanah memungkinkan identifikasi zona-zona pengelolaan (*management zones*) dengan karakteristik kesuburan yang berbeda dalam satu hamparan lahan. Fitriani *et al*. (2023) mencatat bahwa pemanfaatan data spasial semacam ini memungkinkan rekomendasi pemupukan yang lebih presisi dibandingkan pendekatan seragam pada seluruh hamparan lahan, sehingga efisiensi penggunaan input dapat ditingkatkan tanpa mengorbankan produktivitas pada zona-zona dengan tingkat kesuburan lebih rendah.

Selain manfaat teknis, pemantauan kesehatan tanah berbasis data juga memberikan basis informasi penting bagi perumusan kebijakan insentif konservasi tanah, karena pemerintah dan lembaga pembiayaan dapat mengidentifikasi kawasan prioritas yang memerlukan intervensi

rehabilitasi secara lebih terarah. Beberapa poin kunci berikut merangkum praktik pengelolaan kesuburan dan kesehatan tanah yang direkomendasikan berdasarkan kajian literatur terkini.

a. Melakukan uji tanah secara berkala minimal setiap satu hingga dua musim tanam untuk memantau tren perubahan status hara.
b. Mengembalikan residu tanaman ke lahan melalui pengomposan alih-alih pembakaran untuk mempertahankan bahan organik tanah.
c. Menerapkan rotasi tanaman yang melibatkan spesies legum guna memperbaiki status nitrogen tanah secara alami.
d. Mengurangi intensitas pengolahan tanah pada lahan yang rentan terhadap degradasi struktural akibat pemadatan.
e. Mengintegrasikan pupuk hayati berbasis mikroba indigenus sebagai pelengkap, bukan pengganti total, pupuk anorganik.

2. Tantangan Skalabilitas Praktik Konservasi Kesuburan Tanah

Meskipun manfaat teknis dari praktik konservasi kesuburan tanah telah banyak terbukti pada skala penelitian, tantangan utama yang dihadapi adalah skalabilitas adopsi di tingkat petani secara luas. Rahayu *et al*. (2021) mengidentifikasi bahwa hambatan adopsi sering kali bukan disebabkan oleh ketidaktahuan petani terhadap manfaat teknis, melainkan oleh keterbatasan modal kerja untuk investasi awal, seperti pembelian pupuk organik dalam jumlah besar atau bibit tanaman penutup tanah, serta ketidakpastian pasar bagi produk yang dihasilkan dari sistem produksi rendah input. Kondisi ini menegaskan bahwa intervensi teknis semata tidak cukup, melainkan perlu disertai dengan pembenahan struktur insentif ekonomi yang dihadapi petani dalam pengambilan keputusan usaha tani sehari-hari.

Pengalaman dari berbagai program pengelolaan kesuburan tanah terpadu di Indonesia menunjukkan bahwa keberhasilan skalabilitas sangat ditentukan oleh keberadaan champion petani atau tokoh lokal yang menjadi rujukan dan motivator bagi petani lain dalam mengadopsi praktik baru. Model penyebaran inovasi melalui jejaring sosial petani (*farmer-to-farmer extension*) terbukti lebih efektif dan berbiaya lebih rendah dibandingkan model penyuluhan konvensional yang sepenuhnya mengandalkan tenaga penyuluh pemerintah, mengingat keterbatasan rasio penyuluh terhadap jumlah petani yang harus dilayani di banyak

wilayah Indonesia, sehingga strategi pemberdayaan champion petani lokal perlu menjadi bagian integral dari desain program pengelolaan kesuburan tanah ke depan.

Tabel 3.4 Perbandingan Praktik Konvensional dan Praktik Regeneratif terhadap Kesehatan Tanah

Aspek	Praktik Konvensional	Praktik Regeneratif
Pengolahan tanah	Intensif, membalik seluruh lapisan olah	Minimum atau tanpa olah tanah
Residu tanaman	Dibakar atau dibuang	Dikembalikan sebagai mulsa/kompos
Bahan organik tanah	Cenderung menurun dari waktu ke waktu	Cenderung meningkat secara bertahap
Input hara	Dominan pupuk kimia sintetis	Kombinasi organik, hayati, dan kimia berimbang

Sumber: Lehmann *et al*. (2020) dan Rahayu *et al*. (2021)

C. Konservasi Air Pertanian

Air merupakan sumber daya alam yang menjadi faktor pembatas utama dalam produksi pertanian, terutama di wilayah dengan pola curah hujan musiman yang semakin tidak menentu akibat perubahan iklim. Sektor pertanian tercatat sebagai pengguna air tawar terbesar secara global, dengan estimasi konsumsi mencapai lebih dari 70 persen dari total penarikan air tawar dunia (Susanti *et al*., 2022). Fakta ini menjadikan konservasi air pertanian sebagai isu strategis yang tidak hanya berdampak pada keberlanjutan produksi pangan, tetapi juga pada ketersediaan air bagi sektor domestik dan industri di kawasan yang sama. Konsep konservasi air dalam konteks pertanian berkelanjutan tidak semata berarti penghematan volume air, melainkan optimalisasi efisiensi penggunaan air melalui pendekatan yang mempertimbangkan siklus hidrologi secara menyeluruh, mulai dari tangkapan air hujan, penyimpanan, distribusi, hingga pemanfaatan oleh tanaman.

Konsep *water footprint* yang dikembangkan dalam studi keberlanjutan pertanian memberikan kerangka kuantitatif untuk mengukur jumlah air yang digunakan dalam seluruh rantai produksi suatu komoditas, termasuk air hijau (berasal dari curah hujan), air biru (berasal dari sumber permukaan dan tanah), dan air abu-abu (air yang dibutuhkan untuk mengencerkan polutan hasil produksi). Prasetya dan Wibowo (2023) mengaplikasikan kerangka ini pada komoditas padi di Jawa Barat dan menemukan bahwa varietas padi konvensional membutuhkan rata-rata 2.500 liter air untuk menghasilkan satu kilogram gabah, sementara penerapan teknik *Alternate Wetting and Drying* (AWD) mampu menurunkan kebutuhan air hingga 30 persen tanpa penurunan hasil yang signifikan. Hal tersebut menegaskan bahwa efisiensi irigasi bukan hanya soal infrastruktur, tetapi juga menyangkut pemilihan teknik budidaya yang tepat guna.

Beragam teknologi dan praktik konservasi air telah dikembangkan dan diadopsi pada skala yang berbeda-beda, mulai dari teknologi sederhana berbasis kearifan lokal hingga sistem irigasi presisi berbasis sensor. Irigasi tetes (*drip irrigation*) dan irigasi curah (*sprinkler irrigation*) misalnya, mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air hingga 90 persen dibandingkan irigasi genangan konvensional yang efisiensinya berkisar 40 hingga 50 persen (Kurniawan *et al*., 2021). Selain itu, penerapan mulsa organik maupun plastik terbukti efektif menekan laju evaporasi permukaan tanah, sehingga kelembapan tanah dapat dipertahankan lebih lama. Pada skala lanskap, pembangunan embung dan bangunan panen air hujan (*rainwater harvesting*) menjadi strategi penting bagi wilayah dengan curah hujan musiman tinggi namun mengalami defisit air pada musim kemarau, sebagaimana banyak diterapkan di kawasan pertanian lahan kering Nusa Tenggara Timur.

Tabel 3.5 Beberapa Teknik Irigasi

Teknik Irigasi	Karakteristik Utama
Irigasi genangan (konvensional)	Biaya rendah, kehilangan air tinggi melalui perkolasi dan evaporasi
Irigasi curah (*sprinkler*)	Cocok untuk lahan bertopografi tidak rata

Teknik Irigasi	Karakteristik Utama
Irigasi tetes (*drip*)	Efisien namun memerlukan investasi awal lebih tinggi
Alternate Wetting and Drying (AWD)	Diterapkan khusus pada budidaya padi sawah

Sumber: Kurniawan *et al*. (2021) dan Prasetya & Wibowo (2023)

Pengelolaan air pertanian yang berkelanjutan juga tidak dapat dilepaskan dari dimensi kelembagaan dan tata kelola. Sistem irigasi tradisional seperti subak di Bali telah lama diakui sebagai model pengelolaan air yang mengintegrasikan prinsip ekologis, sosial, dan spiritual secara harmonis, dan bahkan telah ditetapkan sebagai Warisan Budaya Dunia oleh UNESCO. Wirawan *et al*. (2022) mencatat bahwa keberhasilan subak dalam menjaga keberlanjutan air irigasi terletak pada mekanisme pengaturan giliran air (rotasi) yang disepakati secara kolektif oleh komunitas petani, yang secara empiris terbukti lebih adaptif terhadap fluktuasi ketersediaan air dibandingkan sistem irigasi terpusat yang dikelola secara birokratis. Pembelajaran dari kearifan lokal semacam ini memberikan kontribusi penting bagi perumusan kebijakan pengelolaan sumber daya air pertanian yang lebih partisipatif dan kontekstual.

Tantangan konservasi air pertanian ke depan semakin kompleks seiring dengan meningkatnya kompetisi antarsektor dalam pemanfaatan sumber daya air serta ketidakpastian iklim yang berdampak pada pola curah hujan. Oleh karena itu, pendekatan konservasi air perlu diintegrasikan dengan perencanaan tata ruang lanskap secara lebih luas, termasuk perlindungan daerah tangkapan air (*catchment area*), rehabilitasi vegetasi riparian, serta penerapan teknologi pemantauan kelembapan tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) yang memungkinkan pengambilan keputusan irigasi secara lebih presisi dan responsif terhadap kondisi aktual di lapangan (Anindita *et al*., 2023).

1. Neraca Air dan Perencanaan Alokasi pada Skala Daerah Aliran Sungai

Perencanaan konservasi air pertanian yang efektif memerlukan pemahaman terhadap neraca air (*water balance*) pada skala daerah aliran

sungai, yang mencakup komponen masukan berupa curah hujan dan aliran masuk, serta komponen keluaran berupa evapotranspirasi, aliran permukaan, dan perkolasi ke dalam akuifer. Ketidakseimbangan antara kebutuhan air irigasi dengan ketersediaan air pada suatu daerah aliran sungai dapat memicu konflik pemanfaatan air antarwilayah hulu dan hilir, terutama pada musim kemarau ketika debit sungai menurun drastis. Susanti *et al*. (2022) menekankan pentingnya penyusunan neraca air partisipatif yang melibatkan seluruh pemangku kepentingan pengguna air, mulai dari petani, pengelola bendungan, hingga penyedia air baku domestik, untuk merumuskan skema alokasi air yang adil dan berkelanjutan.

Selain aspek teknis neraca air, keberhasilan konservasi air pertanian juga sangat ditentukan oleh perilaku dan kebiasaan petani dalam mengelola air di tingkat petak lahan. Perubahan kebiasaan dari pola irigasi berdasarkan kebiasaan turun-temurun menuju pola irigasi berbasis kebutuhan aktual tanaman memerlukan proses edukasi yang berkelanjutan. Berikut adalah beberapa poin strategis dalam upaya konservasi air pertanian yang dapat diterapkan pada berbagai skala usaha tani.

a. Menerapkan penjadwalan irigasi berbasis kebutuhan air tanaman aktual, bukan berdasarkan kebiasaan atau jadwal tetap semata.
b. Membangun dan memelihara infrastruktur panen air hujan skala kecil seperti embung dan sumur resapan pada lahan kering.
c. Mendorong adopsi mulsa organik untuk menekan laju evaporasi permukaan tanah pada musim kemarau.
d. Memperkuat kelembagaan pengelola irigasi tingkat usaha tani (P3A) agar pembagian air berjalan adil dan transparan.
e. Mengintegrasikan data iklim musiman ke dalam perencanaan pola tanam guna menyesuaikan kebutuhan air dengan ketersediaan yang diproyeksikan.

2. *Trade-off* antara Efisiensi Irigasi dan Ketersediaan Air Kawasan Hilir

Peningkatan efisiensi irigasi di tingkat petak lahan, meskipun secara umum bermanfaat, perlu dicermati dari perspektif hidrologi kawasan secara lebih luas, karena air yang sebelumnya hilang melalui perkolasi pada sistem irigasi konvensional sesungguhnya kerap menjadi

sumber pengisian kembali (*recharge*) akuifer atau aliran balik yang dimanfaatkan oleh pengguna air di kawasan hilir. Prasetya dan Wibowo (2023) mengingatkan bahwa penerapan teknologi irigasi hemat air secara masif tanpa mempertimbangkan dinamika hidrologi kawasan secara keseluruhan berpotensi menimbulkan *trade-off* yang tidak diinginkan, yaitu penurunan ketersediaan air bagi pengguna di kawasan hilir yang selama ini bergantung pada aliran balik dari sistem irigasi hulu, sehingga perencanaan efisiensi irigasi idealnya mempertimbangkan neraca air pada skala daerah aliran sungai secara keseluruhan, bukan semata efisiensi pada skala petak lahan.

Pertimbangan *trade-off* semacam ini menegaskan pentingnya pendekatan yang lebih holistik dalam perencanaan konservasi air pertanian, yang tidak hanya berfokus pada penghematan volume air pada titik penggunaan, tetapi juga mempertimbangkan implikasi hidrologis terhadap keseluruhan siklus air pada suatu kawasan. Kolaborasi antara ahli hidrologi, agronom, dan perencana tata ruang menjadi krusial dalam merumuskan kebijakan konservasi air yang benar-benar optimal secara sistemik, bukan optimal secara parsial pada satu titik pemanfaatan air saja.

Tabel 3.6 Komponen *Water Footprint* pada Produksi Pertanian

Jenis Air	Sumber	Contoh dalam Produksi Pertanian
Air hijau (*green water*)	Curah hujan yang tersimpan dalam profil tanah	Air hujan yang diserap akar tanaman
Air biru (*blue water*)	Sumber air permukaan dan air tanah	Air irigasi dari sungai, waduk, atau sumur
Air abu-abu (*grey water*)	Kebutuhan pengenceran polutan	Air untuk mengencerkan residu pupuk/pestisida

Sumber: Prasetya & Wibowo (2023)

D. Pengelolaan Keanekaragaman Hayati

Keanekaragaman hayati pertanian atau *agrobiodiversity* mencakup seluruh variasi kehidupan yang berperan dalam produksi pangan dan pertanian, meliputi keragaman genetik varietas tanaman dan ras ternak, keragaman spesies flora dan fauna yang berasosiasi dengan lahan pertanian, serta keragaman ekosistem pada tingkat lanskap. FAO (2021) menegaskan bahwa agrobiodiversitas merupakan fondasi ketahanan pangan global karena menyediakan basis genetik bagi pemuliaan tanaman, mendukung layanan penyerbukan dan pengendalian hama alami, serta memberikan opsi adaptasi bagi petani dalam menghadapi tekanan lingkungan yang terus berubah. Sayangnya, ekspansi pertanian monokultur skala besar dalam beberapa dekade terakhir telah menyebabkan penyusutan drastis keragaman varietas lokal yang secara historis telah teradaptasi dengan kondisi agroekologi setempat.

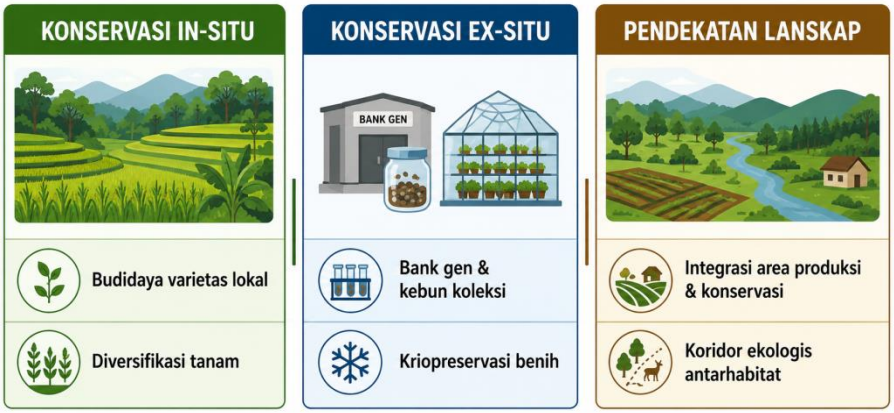
Erosi genetik akibat dominasi varietas unggul komersial menjadi ancaman serius terhadap keberlanjutan sistem pertanian jangka panjang. Setiawan *et al*. (2022) mendokumentasikan bahwa dari lebih dari seribu varietas padi lokal yang pernah dibudidayakan di Pulau Jawa pada awal abad ke-20, kurang dari 10 persen yang masih dibudidayakan secara aktif oleh petani hingga saat ini, tergantikan oleh sejumlah kecil varietas unggul nasional yang seragam. Homogenitas genetik semacam ini meningkatkan kerentanan sistem pertanian terhadap serangan hama dan penyakit baru, sebagaimana tercermin dalam berbagai kasus wabah penyakit tanaman yang menyebar cepat pada lahan monokultur dengan basis genetik sempit. Oleh karena itu, konservasi plasma nutfah lokal, baik melalui bank benih komunitas maupun kebun koleksi in-situ, menjadi strategi penting dalam menjaga cadangan genetik untuk kebutuhan pemuliaan di masa depan.

Selain keragaman genetik tanaman budidaya, keanekaragaman hayati fungsional yang berasosiasi dengan lahan pertanian, seperti serangga penyerbuk, musuh alami hama, dan mikroorganisme tanah, memberikan kontribusi ekonomi yang signifikan meskipun kerap tidak terhitung dalam kalkulasi produksi konvensional. Nurhayati dan Kusuma (2023) mengestimasi bahwa jasa penyerbukan oleh lebah dan serangga liar berkontribusi terhadap peningkatan hasil pada tanaman

hortikultura hingga 25 persen di sentra produksi buah-buahan di Jawa Timur, sementara keberadaan predator alami seperti laba-laba dan kumbang *Coccinellidae* terbukti mampu menekan populasi hama wereng pada pertanaman padi tanpa memerlukan aplikasi insektisida tambahan. Pengelolaan lanskap yang menyediakan habitat bagi organisme fungsional tersebut, misalnya melalui penanaman tanaman berbunga di sekitar petakan sawah (*flower strips*), merupakan strategi konservasi biodiversitas fungsional yang relatif murah namun berdampak besar.

Strategi pengelolaan keanekaragaman hayati pertanian dapat dikategorikan ke dalam tiga pendekatan utama: konservasi *in-situ* yang mempertahankan keragaman pada habitat aslinya melalui praktik budidaya berkelanjutan; konservasi *ex-situ* melalui bank gen dan kebun koleksi; serta pendekatan berbasis lanskap yang mengintegrasikan area konservasi dengan area produksi dalam satu kesatuan pengelolaan. Perry *et al*. (2021) dalam ulasan komprehensif mengenai diversifikasi pertanian menyimpulkan bahwa sistem pertanian yang mengintegrasikan diversifikasi tanaman, baik melalui tumpang sari, rotasi tanaman, maupun agroforestri, secara konsisten menunjukkan peningkatan kelimpahan biodiversitas fungsional dibandingkan sistem monokultur, tanpa mengorbankan produktivitas secara signifikan apabila dikelola dengan baik. Diversifikasi bukan sekadar strategi konservasi, melainkan juga strategi produksi yang dapat meningkatkan stabilitas hasil dalam jangka panjang.

Gambar 3.2 Tiga Pilar Pengelolaan Keanekaragaman Hayati Pertanian



Ketiga pendekatan bersifat saling melengkapi dan idealnya diterapkan secara simultan dalam suatu kawasan pertanian untuk memaksimalkan resiliensi agroekosistem. Selain itu, kebijakan pengelolaan keanekaragaman hayati pertanian di Indonesia masih menghadapi tantangan koordinasi lintas sektor, mengingat urusan konservasi biodiversitas umumnya berada di bawah kewenangan sektor kehutanan dan lingkungan hidup, sementara pengelolaan lahan pertanian berada di bawah sektor pertanian. Fragmentasi kelembagaan ini kerap menghambat implementasi kebijakan yang terintegrasi. Wardhani *et al*. (2022) merekomendasikan penguatan skema insentif berbasis jasa lingkungan (*payment for ecosystem services*) sebagai instrumen kebijakan yang dapat mendorong petani untuk mempertahankan praktik ramah biodiversitas, mengingat manfaat konservasi biodiversitas kerap bersifat eksternalitas positif yang tidak terinternalisasi dalam harga pasar komoditas pertanian konvensional.

1. Peran Bank Benih Komunitas dalam Konservasi Plasma Nutfah Lokal

Bank benih komunitas (*community seed bank*) merupakan inisiatif berbasis masyarakat yang berperan penting dalam konservasi plasma nutfah tanaman lokal sekaligus menjadi sarana pertukaran benih antarpetani. Berbeda dengan bank gen formal yang dikelola oleh lembaga penelitian dengan fasilitas penyimpanan terkontrol, bank benih komunitas mengandalkan mekanisme penyimpanan dan perbanyakan benih secara langsung oleh petani anggota, sehingga varietas yang dikonservasi tetap mengalami proses seleksi alami dan adaptasi berkelanjutan terhadap kondisi agroekologi setempat. Setiawan *et al*. (2022) mencatat bahwa keberadaan bank benih komunitas di beberapa wilayah Jawa terbukti efektif mempertahankan sejumlah varietas padi lokal yang secara komersial telah tersisih, namun tetap memiliki nilai penting sebagai sumber ketahanan pangan darurat pada kondisi iklim ekstrem yang tidak sesuai dengan karakteristik varietas unggul komersial.

Keberlanjutan bank benih komunitas sangat bergantung pada partisipasi aktif anggota, dukungan kelembagaan lokal, serta keterhubungan dengan jaringan konservasi plasma nutfah yang lebih luas, termasuk lembaga penelitian pertanian nasional. Beberapa poin

praktis berikut merangkum strategi pengelolaan keanekaragaman hayati pertanian yang dapat diterapkan pada berbagai tingkatan, mulai dari petani individu hingga kebijakan tingkat kabupaten.

a. Mendukung pembentukan dan penguatan kapasitas kelembagaan bank benih komunitas di tingkat desa atau kelompok tani.
b. Mendorong diversifikasi varietas dan spesies yang dibudidayakan dalam satu hamparan lahan atau lanskap pertanian.
c. Menyediakan area refugia atau habitat mikro bagi serangga penyerbuk dan musuh alami di sekitar lahan produksi.
d. Mengintegrasikan skema insentif jasa lingkungan bagi petani yang secara konsisten menerapkan praktik ramah biodiversitas.
e. Membangun basis data lokal mengenai keragaman genetik varietas dan spesies yang masih dibudidayakan di suatu wilayah.

2. Hubungan antara Keanekaragaman Hayati dan Stabilitas Produksi

Hubungan antara tingkat keanekaragaman hayati dan stabilitas produksi pertanian telah menjadi topik penelitian ekologi yang berkembang pesat, dengan konsensus umum bahwa sistem yang lebih beragam cenderung menunjukkan variabilitas hasil antarmusim yang lebih rendah dibandingkan sistem monokultur, meskipun potensi hasil puncak pada kondisi optimal mungkin sedikit lebih rendah. Prinsip *insurance hypothesis* dalam ekologi menjelaskan fenomena ini melalui argumen bahwa keragaman spesies fungsional menyediakan redundansi fungsional, sehingga ketika satu spesies atau komponen sistem mengalami tekanan, komponen lain dapat mengkompensasi fungsi yang hilang tersebut, menjaga stabilitas keseluruhan sistem produksi. Perry *et al*. (2021) menegaskan bahwa prinsip ini relevan diterapkan dalam perancangan sistem pertanian yang menghadapi ketidakpastian iklim yang semakin tinggi, di mana stabilitas hasil jangka panjang menjadi pertimbangan yang tidak kalah penting dibandingkan potensi hasil maksimal jangka pendek.

Penerapan prinsip ini dalam konteks kebijakan pertanian menuntut pergeseran orientasi dari semata pengejaran produktivitas maksimal per hektare menuju orientasi yang lebih seimbang antara produktivitas dan stabilitas produksi jangka panjang. Pergeseran

orientasi kebijakan semacam ini memerlukan basis argumentasi ilmiah yang kuat serta contoh keberhasilan konkret di lapangan agar dapat meyakinkan pembuat kebijakan dan petani bahwa diversifikasi bukanlah kemunduran dari modernisasi pertanian, melainkan justru strategi modernisasi yang lebih adaptif terhadap tantangan lingkungan kontemporer.

E. Agroforestri dan Pertanian Terpadu

Agroforestri merupakan sistem pengelolaan lahan yang mengintegrasikan komponen pohon berkayu dengan tanaman semusim atau ternak dalam satu unit pengelolaan lahan yang sama, baik secara spasial maupun temporal. Nair dan Toth (2020) mendefinisikan agroforestri sebagai sistem penggunaan lahan yang secara sengaja menggabungkan pohon dengan tanaman pertanian atau ternak untuk menghasilkan manfaat ekologis, ekonomis, dan sosial secara simultan. Berbeda dengan sistem pertanian monokultur yang cenderung menyederhanakan struktur vegetasi, agroforestri justru meningkatkan kompleksitas struktural lanskap, yang berimplikasi pada peningkatan layanan ekosistem seperti penyerapan karbon, perlindungan tanah dari erosi, dan penyediaan habitat bagi satwa liar. Di Indonesia, praktik agroforestri telah lama dikenal melalui sistem talun-kebun di Jawa Barat dan kebun campuran di berbagai wilayah Nusantara, yang mencerminkan kearifan lokal dalam mengelola lahan secara multifungsi.

Terdapat beberapa tipologi sistem agroforestri yang umum diterapkan, antara lain sistem *alley cropping* yang menanam tanaman semusim di antara larikan pohon; sistem *silvopasture* yang mengintegrasikan pohon dengan padang penggembalaan ternak; sistem *homegarden* atau pekarangan yang menggabungkan berbagai jenis tanaman pangan, buah, dan obat dalam skala rumah tangga; serta sistem *windbreak* atau tanaman penahan angin yang ditanam di sekeliling lahan pertanian. Suryanto *et al*. (2021) melalui kajian pada sistem agroforestri kopi-naungan di dataran tinggi Jawa Timur menemukan bahwa produktivitas kopi pada sistem agroforestri dengan naungan pohon sengon menunjukkan hasil yang lebih stabil antarmusim dibandingkan perkebunan kopi monokultur, meskipun hasil puncak pada tahun-tahun

tertentu sedikit lebih rendah. Stabilitas hasil ini penting mengingat fluktuasi harga komoditas dan risiko iklim yang semakin tinggi.

Konsep pertanian terpadu (*integrated farming system*) memperluas prinsip agroforestri dengan mengintegrasikan berbagai subsistem produksi, seperti tanaman, ternak, dan perikanan, dalam satu unit pengelolaan yang saling mendukung melalui siklus daur ulang hara dan energi. Model integrasi padi-ternak-ikan (mina padi) yang berkembang di berbagai wilayah Indonesia merupakan contoh konkret penerapan prinsip ini, di mana kotoran ternak dan sisa pakan ikan dimanfaatkan sebagai sumber hara bagi tanaman padi, sementara ikan membantu mengendalikan populasi hama dan gulma di lahan sawah. Hidayati *et al*. (2022) melaporkan bahwa penerapan sistem mina padi di Kabupaten Boyolali mampu meningkatkan pendapatan bersih petani hingga 35 persen dibandingkan sistem monokultur padi, sekaligus menurunkan penggunaan pupuk anorganik hingga 20 persen berkat kontribusi hara organik dari kotoran ikan.

Manfaat ekologis dari sistem agroforestri dan pertanian terpadu tercermin pada berbagai indikator, termasuk peningkatan cadangan karbon biomassa dan tanah, perbaikan struktur dan kesuburan tanah melalui serasah daun, peningkatan infiltrasi air, serta penyediaan habitat bagi keanekaragaman hayati. Studi meta-analisis oleh Kim *et al*. (2022) menyimpulkan bahwa sistem agroforestri rata-rata mampu menyimpan karbon biomassa dua hingga empat kali lebih tinggi dibandingkan sistem pertanian monokultur pada jenis komoditas yang sebanding. Selain manfaat ekologis, agroforestri juga memberikan manfaat ekonomi melalui diversifikasi sumber pendapatan, sehingga petani tidak bergantung pada satu jenis komoditas saja dan lebih tahan terhadap guncangan harga pasar.

Tabel 3.7 Tipologi Sistem Agroforestri dan Manfaat Utamanya

Tipe Sistem	Komponen Utama	Manfaat Utama
Alley cropping	Larikan pohon + tanaman semusim	Konservasi tanah, diversifikasi hasil
Silvopasture	Pohon + padang gembalaan + ternak	Naungan ternak, pakan tambahan, kayu

Tipe Sistem	Komponen Utama	Manfaat Utama
Homegarden	Tanaman pangan, buah, obat skala rumah tangga	Ketahanan pangan keluarga, biodiversitas tinggi
Windbreak	Barisan pohon pelindung	Mengurangi kerusakan akibat angin kencang

Sumber: Nair & Toth (2020) dan Kim *et al*. (2022)

Meskipun manfaatnya luas, adopsi agroforestri dan pertanian terpadu di tingkat petani masih menghadapi tantangan, terutama terkait jangka waktu investasi yang lebih panjang sebelum memperoleh hasil optimal dari komponen pohon, kebutuhan pengetahuan teknis yang lebih kompleks, serta keterbatasan akses terhadap bibit unggul dan pendampingan teknis. Oleh karena itu, dukungan kebijakan berupa insentif fiskal, kemudahan akses pembiayaan, serta program penyuluhan yang intensif menjadi prasyarat penting untuk mempercepat adopsi sistem ini secara lebih luas di kalangan petani skala kecil.

1. Skema Kelembagaan Pendukung Adopsi Agroforestri

Keberhasilan adopsi agroforestri dan pertanian terpadu secara luas tidak dapat dilepaskan dari dukungan skema kelembagaan yang menjembatani kebutuhan investasi jangka panjang petani dengan akses pembiayaan yang sesuai. Skema tumpang sari kredit pohon (*tree crop credit scheme*) yang memungkinkan petani memperoleh pinjaman dengan agunan berupa hasil panen pohon di masa depan telah diterapkan di beberapa wilayah sebagai instrumen untuk mengatasi kendala arus kas selama periode transisi menuju sistem agroforestri matang. Hidayati *et al*. (2022) mencatat bahwa keterlibatan koperasi tani dalam skema pembiayaan semacam ini terbukti meningkatkan tingkat kepercayaan petani, mengingat mekanisme pengembalian pinjaman dapat disesuaikan dengan siklus panen komoditas kayu dan non-kayu yang umumnya berjangka menengah hingga panjang.

Selain aspek pembiayaan, ketersediaan pasar yang stabil bagi produk agroforestri, baik produk kayu maupun non-kayu seperti buah, getah, dan hasil hutan bukan kayu lainnya, menjadi faktor penentu keberlanjutan ekonomi sistem ini. Beberapa poin strategis berikut dapat menjadi acuan dalam pengembangan sistem agroforestri dan pertanian terpadu yang berkelanjutan.

a. Memilih kombinasi spesies pohon dan tanaman semusim yang saling komplementer dari segi kebutuhan cahaya, air, dan hara.
b. Menyediakan skema pembiayaan yang disesuaikan dengan siklus panen jangka menengah hingga panjang dari komponen pohon.
c. Membangun kemitraan pasar yang stabil bagi produk kayu dan non-kayu hasil sistem agroforestri.
d. Menguatkan kapasitas teknis petani melalui pelatihan pengelolaan sistem multikomponen secara berkelanjutan.
e. Mengintegrasikan komponen ternak secara bertahap sesuai kapasitas modal dan tenaga kerja rumah tangga tani.

2. Agroforestri sebagai Strategi Diversifikasi Ekonomi Rumah Tangga

Selain manfaat ekologis, agroforestri memberikan kontribusi penting terhadap diversifikasi sumber pendapatan rumah tangga petani, yang pada gilirannya meningkatkan ketahanan ekonomi keluarga tani terhadap guncangan harga komoditas maupun kegagalan panen pada salah satu jenis tanaman. Kombinasi tanaman jangka pendek yang menghasilkan pendapatan reguler dengan tanaman jangka panjang bernilai tinggi seperti kayu dan buah tahunan menciptakan struktur arus kas yang lebih stabil sepanjang waktu dibandingkan sistem monokultur yang bergantung pada satu siklus panen musiman. Nair dan Toth (2020) menyebut karakteristik ini sebagai salah satu keunggulan komparatif utama agroforestri dibandingkan sistem pertanian konvensional, terutama bagi petani skala kecil dengan keterbatasan akses terhadap instrumen keuangan formal untuk mengelola risiko pendapatan musiman.

Studi kasus keberhasilan agroforestri di berbagai wilayah Indonesia, seperti sistem kebun campuran di Jawa Barat dan sistem damar di Krui Lampung, menunjukkan bahwa pengetahuan lokal yang terakumulasi selama beberapa generasi mampu menghasilkan sistem pengelolaan lahan yang kompleks dan berkelanjutan tanpa memerlukan input eksternal yang tinggi. Pembelajaran dari kearifan lokal semacam ini memiliki nilai penting bagi pengembangan kebijakan agroforestri kontemporer, karena menunjukkan bahwa prinsip-prinsip keberlanjutan yang saat ini banyak dipromosikan melalui pendekatan ilmiah modern sesungguhnya telah lama dipraktikkan secara empiris oleh masyarakat

lokal, meskipun belum tentu terdokumentasikan secara sistematis dalam literatur ilmiah formal.

Tabel 3.8 Perbandingan Indikator Ekonomi Sistem Monokultur dan Agroforestri

Indikator	Monokultur	Agroforestri
Sumber pendapatan	Tunggal, bergantung satu komoditas	Multiganda, tersebar antarwaktu
Risiko gagal panen	Tinggi, berdampak langsung ke seluruh pendapatan	Tersebar sehingga risiko lebih rendah
Cadangan karbon biomassa	Rendah hingga sedang	Tinggi

Sumber: Nair & Toth (2020) dan Kim *et al*. (2022)

F. Pengendalian Erosi dan Degradasi Lahan

Erosi tanah merupakan proses pengikisan dan pengangkutan partikel tanah oleh media air atau angin yang, apabila berlangsung melampaui laju pembentukan tanah alami, akan menyebabkan penurunan produktivitas lahan secara permanen. Di wilayah tropis dengan curah hujan tinggi seperti Indonesia, erosi air (*water erosion*) merupakan bentuk erosi yang paling dominan, terutama pada lahan pertanian dengan kemiringan lereng curam yang tidak dikelola dengan kaidah konservasi tanah yang memadai. *Model Universal Soil Loss Equation* (USLE) yang telah dimodifikasi dalam berbagai studi kontemporer mengidentifikasi lima faktor utama penentu laju erosi, yaitu erosivitas hujan, erodibilitas tanah, panjang dan kemiringan lereng, pengelolaan tanaman penutup lahan, serta praktik konservasi tanah (Pratama *et al*., 2021).

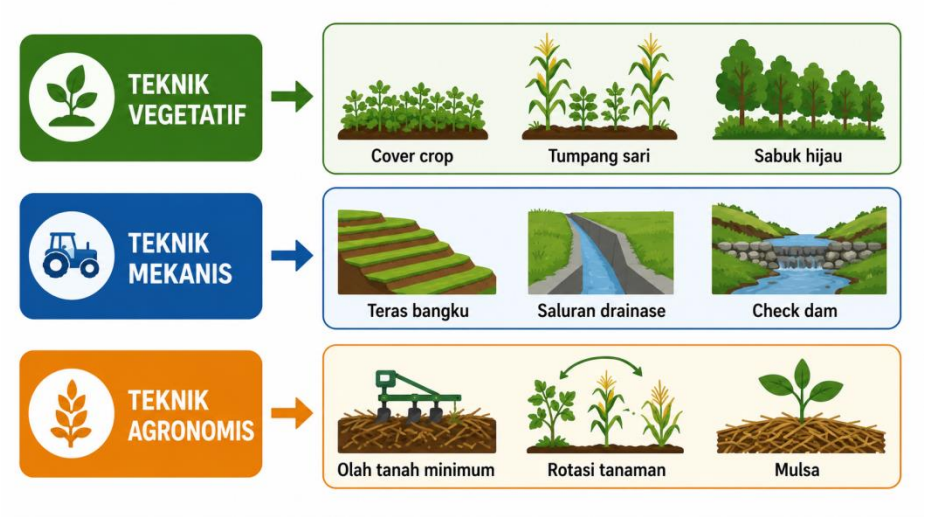
Degradasi lahan pertanian tidak hanya disebabkan oleh erosi fisik, tetapi juga mencakup degradasi kimiawi seperti penurunan kesuburan dan salinisasi, serta degradasi biologis berupa penurunan aktivitas mikroorganisme tanah. Data yang dihimpun oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan menunjukkan bahwa lahan kritis di Indonesia mencapai jutaan hektare, dengan konsentrasi tertinggi pada lahan pertanian di kawasan perbukitan dan pegunungan yang mengalami

konversi dari hutan menjadi lahan pertanian tanpa disertai penerapan kaidah konservasi tanah dan air yang memadai (Wijayanti *et al*., 2022). Degradasi lahan semacam ini menimbulkan konsekuensi berlapis, mulai dari penurunan hasil panen, peningkatan risiko banjir dan tanah longsor di kawasan hilir, hingga sedimentasi pada badan air yang mengganggu fungsi waduk dan saluran irigasi.

Berbagai teknik konservasi tanah telah dikembangkan untuk mengendalikan laju erosi, baik melalui pendekatan vegetatif maupun mekanis. Teknik vegetatif meliputi penanaman tanaman penutup tanah (*cover crop*), penerapan sistem tumpang sari yang meningkatkan tutupan kanopi sepanjang musim tanam, serta penanaman sabuk hijau (*green belt*) pada kontur lahan. Teknik mekanis meliputi pembuatan teras (*terracing*), saluran pembuangan air (*drainage channel*), serta bangunan pengendali erosi seperti dam penahan sedimen (*check dam*). Setiawan dan Purnama (2023) menunjukkan bahwa kombinasi teras bangku dengan tanaman penguat teras seperti rumput vetiver mampu menurunkan laju erosi dibandingkan lahan tanpa perlakuan konservasi, sekaligus meningkatkan kapasitas infiltrasi air ke dalam profil tanah.

Pendekatan konservasi tanah kontemporer semakin menekankan pentingnya prinsip pertanian tanpa olah tanah atau olah tanah minimum (*no-till/minimum tillage*) sebagai strategi pengendalian erosi yang efektif sekaligus mendukung penyimpanan karbon tanah. Prinsip ini didasarkan pada pemahaman bahwa pengolahan tanah intensif menghancurkan struktur agregat tanah dan mempercepat oksidasi bahan organik, sehingga tanah menjadi lebih rentan terhadap erosi. Basche dan DeLonge (2021) dalam ulasan sistematis mengenai praktik konservasi tanah menemukan bahwa penerapan olah tanah minimum yang dikombinasikan dengan tanaman penutup tanah secara konsisten meningkatkan kapasitas infiltrasi air tanah dan menurunkan limpasan permukaan (*surface runoff*) dibandingkan sistem olah tanah konvensional, meskipun manfaat tersebut umumnya baru signifikan setelah periode adaptasi tiga hingga lima tahun sejak penerapan pertama.

Gambar 3.3 Hierarki Strategi Pengendalian Erosi Lahan Pertanian



Ketiga strategi tersebut idealnya diterapkan secara kombinatif dan disesuaikan dengan kemiringan lereng serta karakteristik curah hujan setempat untuk mencapai efektivitas pengendalian erosi yang optimal.

Pengendalian erosi dan degradasi lahan pada akhirnya memerlukan pendekatan yang melampaui skala petak lahan individual menuju pendekatan skala daerah aliran sungai (DAS) secara terintegrasi. Hal ini penting karena dampak erosi pada satu petak lahan akan memengaruhi kualitas dan kuantitas air pada kawasan hilir yang lebih luas. Perencanaan konservasi tanah berbasis DAS yang melibatkan koordinasi antarpetani, pemerintah daerah, dan lembaga pengelola sumber daya air menjadi kunci keberhasilan program rehabilitasi lahan kritis secara berkelanjutan, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai program rehabilitasi DAS prioritas nasional yang menekankan pentingnya partisipasi aktif masyarakat setempat dalam perencanaan dan pemeliharaan bangunan konservasi.

1. Pemantauan Laju Erosi dan Evaluasi Efektivitas Konservasi

Evaluasi efektivitas program konservasi tanah memerlukan sistem pemantauan laju erosi yang konsisten dari waktu ke waktu, baik melalui metode konvensional seperti petak erosi (*erosion plot*) maupun metode kontemporer berbasis penanda isotop dan pemodelan spasial menggunakan data penginderaan jauh resolusi tinggi. Pratama *et al*. (2021) menekankan bahwa keterbatasan data pemantauan jangka

panjang menjadi kendala utama dalam mengevaluasi efektivitas program konservasi tanah di banyak wilayah Indonesia, sehingga keputusan alokasi anggaran rehabilitasi lahan kerap didasarkan pada asumsi umum tanpa dukungan data empiris yang memadai mengenai efektivitas teknik konservasi yang telah diterapkan sebelumnya.

Penguatan kapasitas pemantauan berbasis teknologi murah dan mudah diakses oleh petani, seperti penggunaan aplikasi seluler untuk mendokumentasikan kondisi lahan secara berkala, berpotensi mengisi kesenjangan data tersebut sekaligus meningkatkan kesadaran petani terhadap dinamika degradasi lahan pada lahan mereka sendiri. Poin-poin berikut merangkum strategi pengendalian erosi dan degradasi lahan yang relevan diterapkan pada konteks pertanian lahan miring di Indonesia.

a. Menerapkan kombinasi teknik vegetatif dan mekanis sesuai dengan tingkat kemiringan lereng dan intensitas curah hujan setempat.
b. Membangun sistem pemantauan laju erosi sederhana pada petak-petak percontohan untuk mengevaluasi efektivitas intervensi.
c. Melibatkan kelompok tani dalam pemeliharaan rutin bangunan konservasi seperti teras dan saluran drainase.
d. Menghindari praktik pembakaran lahan dan pengolahan tanah berlebihan pada lahan berlereng curam.
e. Mengoordinasikan program rehabilitasi lahan kritis pada skala daerah aliran sungai, bukan hanya skala petak lahan individual.

2. Insentif Ekonomi bagi Petani Pelaku Konservasi Lahan Berlereng

Penerapan teknik konservasi tanah pada lahan berlereng, seperti pembuatan teras bangku, umumnya memerlukan biaya tenaga kerja dan material yang tidak sedikit, sementara manfaat langsung berupa peningkatan hasil panen baru dapat dirasakan setelah beberapa musim tanam. Kesenjangan waktu antara biaya investasi dan manfaat yang diperoleh ini kerap menjadi disinsentif bagi petani, khususnya petani dengan keterbatasan modal kerja, untuk menerapkan teknik konservasi tanah secara memadai. Wijayanti *et al*. (2022) merekomendasikan skema insentif berupa bantuan material konstruksi teras dan tanaman penguat lereng dari pemerintah daerah sebagai instrumen untuk mengurangi

beban biaya awal petani, sekaligus mempercepat adopsi teknik konservasi tanah pada skala yang lebih luas di kawasan rawan erosi.

Selain insentif material, skema pembayaran jasa lingkungan yang menghubungkan petani hulu pelaku konservasi dengan penerima manfaat di kawasan hilir, seperti pengelola air baku perkotaan atau perusahaan yang bergantung pada pasokan air dari daerah aliran sungai tertentu, berpotensi menciptakan mekanisme pembiayaan konservasi yang lebih berkelanjutan dibandingkan mengandalkan anggaran pemerintah semata. Skema semacam ini menuntut kejelasan mekanisme kelembagaan, verifikasi praktik konservasi, dan transparansi pengelolaan dana agar dapat berjalan secara adil dan dipercaya oleh seluruh pihak yang terlibat dalam skema pembayaran jasa lingkungan tersebut.

Tabel 3.9 Faktor Penentu Laju Erosi Menurut Pendekatan USLE Termodifikasi

Faktor	Deskripsi Singkat
Erosivitas hujan (R)	Energi kinetik curah hujan yang mengikis permukaan tanah
Erodibilitas tanah (K)	Kepekaan jenis tanah tertentu terhadap pengikisan
Panjang & kemiringan lereng (LS)	Semakin panjang dan curam lereng, semakin tinggi laju erosi
Pengelolaan tanaman (C)	Tingkat tutupan vegetasi yang melindungi permukaan tanah
Praktik konservasi (P)	Efektivitas teknik konservasi yang diterapkan pada lahan

Sumber: Pratama *et al*. (2021)

G. Pendekatan Lanskap Berkelanjutan

Pendekatan lanskap berkelanjutan (*sustainable landscape approach*) merupakan kerangka pengelolaan sumber daya alam yang memandang lahan pertanian bukan sebagai unit produksi yang terisolasi, melainkan sebagai bagian integral dari mosaik lanskap yang lebih luas, mencakup hutan, sungai, lahan basah, dan kawasan permukiman. Reed

et al. (2020) mendefinisikan pendekatan lanskap sebagai kerangka kerja untuk mengelola lahan yang mengakomodasi berbagai kepentingan dan tujuan penggunaan lahan secara simultan melalui proses negosiasi dan tata kelola kolaboratif antarpemangku kepentingan. Pendekatan ini menjadi relevan karena permasalahan pertanian dan lingkungan, seperti deforestasi, konflik lahan, dan degradasi daerah tangkapan air, jarang dapat diselesaikan secara efektif hanya melalui intervensi pada skala petak lahan individual.

Salah satu prinsip kunci dalam pendekatan lanskap berkelanjutan adalah konektivitas ekologis (*ecological connectivity*), yaitu keterhubungan antarhabitat yang memungkinkan pergerakan spesies, aliran genetik, dan proses ekologis lainnya berlangsung secara optimal. Fragmentasi lanskap akibat konversi hutan menjadi lahan pertanian monokultur skala besar dapat memutus konektivitas ini, yang berdampak pada penurunan populasi spesies kunci seperti predator alami hama dan penyerbuk. Ramadhani *et al*. (2023) melalui studi lanskap perkebunan sawit di Kalimantan menemukan bahwa keberadaan koridor vegetasi riparian di sepanjang aliran sungai mampu mempertahankan konektivitas habitat bagi mamalia kecil dan burung, yang pada gilirannya berkontribusi terhadap pengendalian hama tikus secara alami di lahan perkebunan sekitarnya, sekaligus menurunkan kebutuhan rodentisida kimiawi.

Implementasi pendekatan lanskap berkelanjutan memerlukan mekanisme tata kelola multi-pihak (*multi-stakeholder governance*) yang mengakomodasi kepentingan beragam aktor, mulai dari petani, perusahaan perkebunan, pemerintah daerah, hingga masyarakat adat. Model tata kelola semacam ini umumnya diwujudkan melalui forum lanskap (*landscape forum*) yang berfungsi sebagai ruang negosiasi dan penyelarasan kepentingan antarpemangku kepentingan dalam merumuskan rencana penggunaan lahan bersama. Sari dan Kartika (2022) mencatat bahwa keberhasilan forum lanskap sangat bergantung pada kejelasan mandat, keterwakilan kelompok rentan seperti petani skala kecil dan masyarakat adat, serta ketersediaan mekanisme penyelesaian konflik yang transparan dan dipercaya oleh seluruh pihak yang terlibat.

Pendekatan lanskap berkelanjutan juga semakin diperkuat oleh perkembangan teknologi penginderaan jauh dan sistem informasi

geografis yang memungkinkan pemantauan perubahan tutupan lahan secara akurat dan hampir *real-time*. Teknologi ini memfasilitasi identifikasi kawasan-kawasan kritis yang memerlukan intervensi rehabilitasi prioritas, sekaligus memungkinkan evaluasi efektivitas program konservasi lanskap dari waktu ke waktu. Purnomo *et al*. (2021) menggarisbawahi bahwa integrasi data spasial dengan pengetahuan lokal masyarakat menghasilkan perencanaan lanskap yang lebih akurat dan diterima secara sosial dibandingkan perencanaan yang semata mengandalkan data teknis tanpa melibatkan partisipasi masyarakat setempat.

1. Pembelajaran dari Praktik Pengelolaan Lanskap di Berbagai Wilayah

Pembelajaran dari berbagai inisiatif pengelolaan lanskap berkelanjutan di Indonesia menunjukkan bahwa keberhasilan pendekatan ini sangat ditentukan oleh kejelasan batas kewenangan antarlembaga, ketersediaan mekanisme pendanaan jangka panjang, serta kesinambungan kepemimpinan lokal yang mampu menjaga komitmen para pihak dari waktu ke waktu. Program lanskap yang hanya bergantung pada pendanaan proyek jangka pendek cenderung kehilangan momentum begitu pendanaan tersebut berakhir, sehingga diperlukan strategi keberlanjutan pembiayaan yang melibatkan sumber daya lokal, termasuk potensi pendapatan asli daerah dan skema kemitraan dengan sektor swasta yang beroperasi dalam lanskap yang sama (Sari & Kartika, 2022).

Sebagai rangkuman, penerapan pendekatan lanskap berkelanjutan memerlukan sinergi antara aspek ekologis, sosial, dan kelembagaan secara simultan. Poin-poin berikut merangkum elemen kunci yang perlu diperhatikan dalam perencanaan dan implementasi pendekatan lanskap berkelanjutan pada konteks pertanian Indonesia.

a. Membangun forum lanskap multipihak dengan mandat yang jelas dan representasi yang inklusif bagi kelompok rentan.
b. Menjaga konektivitas ekologis antarhabitat melalui perlindungan koridor vegetasi riparian dan area konservasi kunci.
c. Mengintegrasikan data spasial penginderaan jauh dengan pengetahuan lokal dalam perencanaan tata guna lahan.

d. Menyusun mekanisme pembiayaan jangka panjang yang tidak semata bergantung pada pendanaan proyek jangka pendek.
e. Melibatkan kepemimpinan lokal yang berkelanjutan untuk menjaga komitmen implementasi lanskap dari waktu ke waktu.

2. Integrasi Pendekatan Lanskap dengan Perencanaan Pembangunan Daerah

Efektivitas pendekatan lanskap berkelanjutan pada akhirnya sangat bergantung pada sejauh mana prinsip-prinsipnya terintegrasi ke dalam dokumen perencanaan pembangunan daerah formal, seperti Rencana Tata Ruang Wilayah dan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah, alih-alih hanya berjalan sebagai inisiatif proyek yang terpisah dari perencanaan pembangunan resmi. Purnomo *et al*. (2021) menegaskan bahwa integrasi formal semacam ini penting untuk menjamin keberlanjutan pendekatan lanskap melampaui masa jabatan kepala daerah tertentu atau periode pendanaan proyek tertentu, mengingat perubahan kepemimpinan politik kerap membawa perubahan prioritas pembangunan yang dapat mengancam kesinambungan inisiatif lanskap yang telah dirintis sebelumnya apabila tidak terlembagakan secara formal dalam dokumen perencanaan daerah.

Tabel 3.10 Perbandingan Perencanaan Lahan Skala Petak dan Skala Lanskap

Aspek	Skala Petak Lahan	Skala Lanskap
Fokus pengelolaan	Produktivitas satu unit usaha tani	Keseimbangan multifungsi lahan pada kawasan luas
Pelaku utama	Petani individual	Multi-pihak (petani, pemerintah, swasta, masyarakat adat)
Konektivitas ekologis	Tidak menjadi pertimbangan utama	Menjadi prinsip inti perencanaan

Sumber: Reed *et al*. (2020)

Keberlanjutan sistem pertanian pada dasarnya bertumpu pada pengelolaan yang harmonis antara komponen ekosistem, kesuburan tanah, sumber daya air, keanekaragaman hayati, serta integrasi lanskap

secara menyeluruh. Ketujuh subtema yang telah diuraikan dalam bab ini saling terkait erat dan tidak dapat dipandang secara parsial, karena intervensi pada satu aspek akan senantiasa memiliki konsekuensi terhadap aspek lainnya. Pemahaman yang utuh terhadap prinsip-prinsip ekologi pertanian ini menjadi bekal penting dalam merancang sistem pertanian yang tidak hanya produktif secara ekonomi, tetapi juga lestari secara ekologis dan berkeadilan secara sosial, sebagaimana akan diperdalam lebih lanjut dalam pembahasan pertanian cerdas iklim pada bab berikutnya.



BAB IV
PERTANIAN CERDAS IKLIM
(CLIMATE SMART AGRICULTURE)

A. Perubahan Iklim dan Dampaknya terhadap Pertanian

Perubahan iklim global merupakan tantangan struktural yang secara langsung mengancam stabilitas produksi pangan dunia. Laporan terbaru *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2023) menegaskan bahwa peningkatan suhu rata-rata global yang telah mencapai sekitar 1,1 derajat Celsius di atas era praindustri telah menimbulkan dampak nyata terhadap produktivitas pertanian di berbagai kawasan, dengan wilayah tropis dan subtropis mengalami dampak yang relatif lebih berat dibandingkan wilayah lintang tinggi. Perubahan pola curah hujan, peningkatan frekuensi kejadian iklim ekstrem seperti kekeringan dan banjir, serta pergeseran musim tanam merupakan manifestasi konkret dari perubahan iklim yang dirasakan langsung oleh petani di lapangan. Bagi negara kepulauan tropis seperti Indonesia, kerentanan ini diperparah oleh tingginya ketergantungan sektor pertanian terhadap pola musim hujan dan kemarau yang semakin sulit diprediksi.

Dampak perubahan iklim terhadap pertanian dapat dikaji melalui beberapa jalur utama, yaitu dampak langsung terhadap fisiologi tanaman akibat perubahan suhu dan konsentrasi karbon dioksida atmosfer, dampak terhadap ketersediaan air melalui perubahan pola curah hujan, serta dampak tidak langsung melalui perubahan dinamika populasi hama dan penyakit tanaman. Wibisono *et al*. (2022) melalui simulasi model iklim pada tanaman padi di Jawa menemukan bahwa peningkatan suhu rata-rata sebesar 2 derajat Celsius berpotensi menurunkan hasil panen padi hingga 10 hingga 15 persen akibat percepatan fase generatif tanaman yang memperpendek periode pengisian bulir. Selain itu, peningkatan suhu malam hari yang konsisten dengan tren pemanasan

global turut berkontribusi terhadap penurunan kualitas gabah melalui peningkatan persentase gabah hampa.

Perubahan iklim juga mengubah dinamika distribusi dan intensitas serangan organisme pengganggu tanaman. Peningkatan suhu memungkinkan perluasan wilayah sebaran hama dan penyakit ke daerah-daerah yang sebelumnya berada di luar jangkauan ekologisnya, sekaligus mempercepat siklus hidup beberapa jenis hama sehingga jumlah generasi per musim tanam meningkat. Kartika dan Ramadhan (2021) mendokumentasikan perluasan sebaran hama penggerek batang pada tanaman jagung di dataran tinggi yang sebelumnya relatif bebas dari serangan hama tersebut, sebagai konsekuensi peningkatan suhu rata-rata kawasan yang memungkinkan hama beradaptasi pada ketinggian yang lebih besar. Fenomena pergeseran distribusi hama semacam ini menuntut pembaruan strategi pengendalian hama terpadu yang sebelumnya disusun berdasarkan pola distribusi hama pada kondisi iklim historis.

Selain dampak biofisik terhadap tanaman, perubahan iklim turut memengaruhi dimensi sosial-ekonomi rumah tangga petani, termasuk peningkatan risiko gagal panen, fluktuasi pendapatan, hingga potensi migrasi tenaga kerja pertanian ke sektor non-pertanian akibat ketidakpastian usaha tani yang semakin tinggi. Yuliana *et al*. (2023) melalui survei rumah tangga petani di wilayah rentan kekeringan Jawa Tengah menemukan bahwa lebih dari 60 persen responden melaporkan penurunan pendapatan usaha tani dalam lima tahun terakhir yang mereka atribusikan pada pergeseran pola musim tanam dan meningkatnya frekuensi kekeringan. Kondisi ini menegaskan urgensi penerapan strategi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim di sektor pertanian secara sistematis, bukan sekadar respons reaktif terhadap kejadian iklim ekstrem yang telah terjadi.

Tabel 4.1 Dampak Perubahan Iklim terhadap Subsektor Pertanian

Jalur Dampak	Manifestasi	Contoh Konsekuensi
Peningkatan suhu	Percepatan fase fenologi, tekanan panas	Penurunan hasil, gabah hampa meningkat
Perubahan curah hujan	Musim tanam bergeser, kekeringan/banjir	Gagal tanam, gagal panen

Jalur Dampak	Manifestasi	Contoh Konsekuensi
Dinamika hama-penyakit	Perluasan wilayah sebaran, siklus hidup lebih cepat	Serangan hama pada kawasan baru
Sosial-ekonomi	Fluktuasi pendapatan, risiko usaha tani	Migrasi tenaga kerja pertanian

Sumber: Wibisono *et al*. (2022), dan Yuliana *et al*. (2023)

Menghadapi kompleksitas dampak tersebut, diperlukan kerangka respons yang tidak hanya berfokus pada adaptasi semata, tetapi juga mempertimbangkan kontribusi mitigasi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian itu sendiri, mengingat pertanian merupakan salah satu kontributor emisi sekaligus pihak yang paling rentan terdampak oleh perubahan iklim. Kerangka respons terpadu inilah yang mendasari lahirnya konsep pertanian cerdas iklim atau *Climate Smart Agriculture* (CSA) sebagai pendekatan holistik untuk menyelaraskan tujuan peningkatan produktivitas, ketahanan terhadap iklim, dan penurunan emisi secara simultan.

1. Variabilitas Iklim Regional dan Kerentanan Diferensial Antarwilayah

Dampak perubahan iklim terhadap pertanian tidak terdistribusi secara merata antarwilayah, melainkan sangat dipengaruhi oleh karakteristik geografis, jenis komoditas, serta kapasitas adaptif masyarakat setempat. Wilayah pesisir menghadapi ancaman spesifik berupa intrusi air laut dan salinisasi lahan pertanian akibat kenaikan muka air laut, sementara wilayah dataran tinggi menghadapi risiko pergeseran zona agroklimat yang memengaruhi kesesuaian lahan bagi komoditas tertentu seperti kopi dan teh. Wibisono *et al*. (2022) menegaskan bahwa perumusan strategi respons perubahan iklim sektor pertanian perlu didasarkan pada analisis kerentanan spesifik wilayah, bukan pendekatan generik yang seragam di seluruh Indonesia, mengingat keragaman kondisi agroekologi dan sosial-ekonomi antarwilayah yang sangat tinggi.

Pemetaan kerentanan iklim pertanian pada skala kabupaten menjadi instrumen penting bagi perencanaan pembangunan daerah yang

responsif terhadap risiko iklim. Berikut adalah beberapa poin penting terkait dampak perubahan iklim terhadap pertanian yang perlu menjadi perhatian dalam perencanaan pembangunan sektor pertanian ke depan.

a) Melakukan pemetaan kerentanan iklim spesifik wilayah sebagai basis perencanaan program adaptasi dan mitigasi sektor pertanian.
b) Memperkuat sistem pemantauan hama dan penyakit tanaman untuk mengantisipasi pergeseran wilayah sebaran akibat perubahan suhu.
c) Mengintegrasikan proyeksi iklim jangka panjang ke dalam perencanaan tata guna lahan pertanian.
d) Membangun basis data dampak iklim historis terhadap produktivitas komoditas strategis pada tingkat kabupaten.
e) Memperkuat koordinasi antara sektor pertanian, meteorologi, dan penanggulangan bencana dalam merespons risiko iklim ekstrem.

2. Interaksi antara Perubahan Iklim dan Degradasi Lahan

Perubahan iklim dan degradasi lahan memiliki hubungan yang saling memperkuat (*mutually reinforcing*), di mana kejadian iklim ekstrem seperti curah hujan intensitas tinggi mempercepat laju erosi pada lahan yang telah terdegradasi, sementara lahan yang terdegradasi memiliki kapasitas infiltrasi dan penyimpanan air yang lebih rendah, sehingga lebih rentan mengalami kekeringan pada musim kemarau. Yuliana *et al*. (2023) mengidentifikasi bahwa wilayah dengan tingkat degradasi lahan tinggi cenderung mengalami dampak perubahan iklim yang lebih parah dibandingkan wilayah dengan kondisi lahan yang lebih sehat, menegaskan pentingnya integrasi antara program rehabilitasi lahan dan program adaptasi perubahan iklim sebagai satu kesatuan strategi, bukan program yang berjalan secara terpisah dan tidak terkoordinasi.

Implikasi dari interaksi ini adalah bahwa investasi dalam pemulihan kesehatan tanah dan konservasi lahan, sesungguhnya juga merupakan investasi dalam ketahanan iklim jangka panjang. Perumusan kebijakan pertanian ke depan perlu memandang kedua isu ini sebagai satu kesatuan yang tidak terpisahkan, mengingat keterkaitan kausal yang erat antara kondisi ekologis lahan dan kerentanan terhadap dampak perubahan iklim yang telah didokumentasikan secara konsisten dalam berbagai penelitian empiris.

Tabel 4.2 Tiga Pilar *Climate Smart Agriculture* Menurut FAO

Pilar	Tujuan Utama	Contoh Praktik
Peningkatan produktivitas	Meningkatkan hasil dan pendapatan petani	Varietas unggul, pemupukan presisi
Peningkatan resiliensi	Mengurangi kerentanan terhadap risiko iklim	Varietas toleran cekaman, diversifikasi usaha tani
Penurunan emisi	Menekan emisi gas rumah kaca per unit produk	AWD, restorasi gambut, pemupukan berimbang

B. Mitigasi Emisi Sektor Pertanian

Sektor pertanian, kehutanan, dan penggunaan lahan lainnya (*Agriculture, Forestry and Other Land Use*/AFOLU) berkontribusi terhadap sekitar 22 hingga 24 persen emisi gas rumah kaca global, menjadikannya salah satu sektor kunci dalam upaya mitigasi perubahan iklim (IPCC, 2022). Emisi dari sektor pertanian bersumber dari tiga gas rumah kaca utama, yaitu metana (CH4) yang dihasilkan dari fermentasi enterik ternak ruminansia dan lahan sawah tergenang, dinitrogen oksida (N2O) yang dihasilkan dari proses nitrifikasi dan denitrifikasi pupuk nitrogen di dalam tanah, serta karbon dioksida (CO2) yang dihasilkan dari perubahan penggunaan lahan, termasuk deforestasi dan alih fungsi lahan gambut. Pemahaman terhadap sumber-sumber emisi ini menjadi dasar penting bagi perumusan strategi mitigasi yang tepat sasaran dan efektif.

Lahan sawah tergenang merupakan salah satu sumber emisi metana terbesar dari sektor pertanian, mengingat kondisi anaerobik pada tanah tergenang mendorong aktivitas bakteri metanogen yang menghasilkan metana sebagai produk sampingan dekomposisi bahan organik. Teknik budidaya *Alternate Wetting and Drying* (AWD) yang telah dibahas sebelumnya dalam konteks konservasi air terbukti pula efektif sebagai strategi mitigasi emisi, karena periode pengeringan berkala pada AWD menciptakan kondisi aerobik yang menekan aktivitas bakteri metanogen. Hartono *et al*. (2022) melaporkan bahwa penerapan

AWD pada lahan sawah di Jawa Tengah mampu menurunkan emisi metana hingga 35 hingga 48 persen dibandingkan sistem penggenangan kontinu, tanpa mengurangi hasil gabah secara signifikan, menjadikan teknik ini sebagai contoh nyata sinergi antara mitigasi emisi dan efisiensi penggunaan air.

Emisi dinitrogen oksida dari penggunaan pupuk nitrogen sintetis dapat diminimalkan melalui penerapan prinsip pemupukan presisi berbasis konsep *4R Nutrient Stewardship*, yaitu pemberian pupuk dengan sumber yang tepat (*right source*), dosis yang tepat (*right rate*), waktu yang tepat (*right time*), dan penempatan yang tepat (*right place*). Pendekatan ini tidak hanya menurunkan kehilangan nitrogen ke atmosfer dan badan air, tetapi juga meningkatkan efisiensi serapan hara oleh tanaman, sehingga berdampak positif ganda terhadap produktivitas dan lingkungan. Amelia *et al*. (2023) melalui penelitian pada tanaman jagung di Lampung menunjukkan bahwa penerapan pemupukan nitrogen berbasis uji tanah dan aplikasi bertahap mampu menurunkan emisi N2O hingga 25 persen dibandingkan pemupukan konvensional dengan dosis seragam, sekaligus mempertahankan hasil panen pada tingkat yang setara.

Pengelolaan lahan gambut memerlukan perhatian khusus dalam strategi mitigasi emisi sektor pertanian di Indonesia, mengingat konversi lahan gambut menjadi lahan pertanian yang disertai drainase intensif melepaskan karbon dalam jumlah besar yang telah tersimpan selama ribuan tahun. Restorasi tinggi muka air tanah pada lahan gambut melalui pembangunan sekat kanal (*canal blocking*) terbukti efektif menekan laju dekomposisi gambut dan emisi karbon yang menyertainya, sebagaimana ditunjukkan oleh berbagai program restorasi gambut di Sumatra dan Kalimantan. Prayoga *et al*. (2021) mencatat bahwa penerapan budidaya pertanian tanpa bakar (*zero burning*) yang dikombinasikan dengan pengelolaan tata air mikro pada lahan gambut mampu menurunkan emisi karbon hingga 40 persen dibandingkan praktik konvensional yang mengandalkan pembakaran untuk pembukaan lahan.

Tabel 4.3 Sumber Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Pertanian dan Strategi Mitigasinya

Gas Rumah Kaca	Sumber Utama	Strategi Mitigasi
Metana (CH4)	Sawah tergenang, fermentasi enterik ternak	AWD, pakan ternak berkualitas, biogas kotoran ternak
Dinitrogen oksida (N2O)	Pemupukan nitrogen sintetis berlebih	Pemupukan presisi (4R), pupuk lepas lambat
Karbon dioksida (CO2)	Deforestasi, drainase lahan gambut	Restorasi gambut, pertanian tanpa bakar

Sumber: Hartono *et al*. (2022), dan Prayoga *et al*. (2021)

Selain strategi teknis di tingkat lahan, mitigasi emisi sektor pertanian juga memerlukan dukungan kebijakan insentif yang mendorong adopsi praktik rendah emisi secara lebih luas, termasuk skema perdagangan karbon berbasis pertanian dan kehutanan, subsidi input rendah karbon, serta program sertifikasi produk pertanian ramah iklim. Perkembangan pasar karbon sukarela dalam beberapa tahun terakhir membuka peluang baru bagi petani untuk memperoleh insentif finansial dari praktik mitigasi yang mereka terapkan, meskipun tantangan terkait mekanisme verifikasi, biaya transaksi, dan keterjangkauan bagi petani skala kecil masih memerlukan penyelesaian lebih lanjut agar manfaat pasar karbon dapat dirasakan secara inklusif oleh seluruh pelaku usaha tani.

1. Perhitungan dan Verifikasi Emisi pada Tingkat Usaha Tani

Salah satu tantangan teknis utama dalam implementasi skema insentif berbasis karbon pada sektor pertanian adalah kompleksitas perhitungan dan verifikasi emisi pada tingkat usaha tani skala kecil, yang berbeda signifikan dari sektor industri dengan sumber emisi yang lebih mudah diukur secara langsung. Metodologi perhitungan emisi pertanian umumnya menggunakan pendekatan faktor emisi (*emission factor*) yang dikalikan dengan data aktivitas, seperti luas lahan sawah tergenang atau jumlah ternak, namun akurasi faktor emisi tersebut sangat bergantung pada kesesuaiannya dengan kondisi agroekologi lokal. Amelia *et al*. (2023) mencatat bahwa penggunaan faktor emisi generik tanpa

penyesuaian terhadap kondisi tanah dan iklim setempat berpotensi menghasilkan estimasi yang bias, sehingga diperlukan pengembangan faktor emisi spesifik lokasi melalui penelitian lapangan yang lebih intensif.

Pengembangan sistem verifikasi emisi yang murah dan dapat diakses oleh petani skala kecil menjadi prasyarat penting bagi perluasan manfaat pasar karbon pertanian secara inklusif. Beberapa poin strategis berikut merangkum langkah-langkah mitigasi emisi sektor pertanian yang relevan diterapkan pada konteks Indonesia.

a. Memperluas adopsi teknik *Alternate Wetting and Drying* pada lahan sawah beririgasi teknis sebagai strategi mitigasi metana.
b. Menerapkan prinsip pemupukan presisi 4R untuk menekan emisi dinitrogen oksida dari lahan pertanian.
c. Melanjutkan dan memperluas program restorasi lahan gambut melalui pembangunan sekat kanal dan pengelolaan tata air mikro.
d. Mengembangkan faktor emisi spesifik lokasi untuk meningkatkan akurasi perhitungan emisi sektor pertanian nasional.
e. Menyederhanakan mekanisme verifikasi emisi agar dapat diakses oleh petani skala kecil dengan biaya transaksi yang wajar.

2. Sinergi dan *Trade-off* antara Mitigasi Emisi dan Produktivitas

Perumusan kebijakan mitigasi emisi sektor pertanian perlu mempertimbangkan secara cermat potensi *trade-off* antara penurunan emisi dan pencapaian target produktivitas pangan, mengingat kedua tujuan tersebut tidak selalu sejalan secara otomatis. Beberapa praktik mitigasi, seperti pengurangan penggunaan pupuk nitrogen secara drastis tanpa disertai perbaikan efisiensi serapan hara, berpotensi menurunkan produktivitas tanaman apabila diterapkan tanpa perhitungan yang tepat. Hartono *et al*. (2022) menegaskan bahwa strategi mitigasi yang ideal adalah strategi yang menghasilkan sinergi (*co-benefit*) antara penurunan emisi dan peningkatan atau setidaknya mempertahankan produktivitas, sebagaimana ditunjukkan oleh teknik AWD yang secara simultan menurunkan emisi metana dan penggunaan air tanpa mengorbankan hasil panen secara signifikan.

Identifikasi praktik-praktik yang menghasilkan sinergi semacam ini perlu menjadi prioritas riset dan pengembangan teknologi pertanian

rendah karbon ke depan, mengingat penerimaan petani terhadap praktik mitigasi emisi akan jauh lebih tinggi apabila praktik tersebut juga memberikan manfaat langsung berupa peningkatan produktivitas atau efisiensi biaya produksi, dibandingkan praktik yang semata menuntut pengorbanan produktivitas demi tujuan lingkungan tanpa manfaat ekonomi yang jelas bagi petani sebagai pelaku utama di lapangan.

C. Adaptasi Pertanian Terhadap Perubahan Iklim

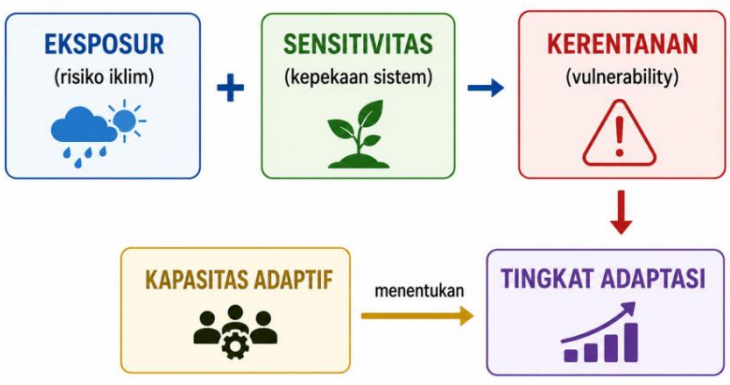
Adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim merupakan proses penyesuaian sistem produksi pertanian untuk mengurangi kerentanan dan memanfaatkan peluang yang timbul dari perubahan kondisi iklim. Berbeda dengan mitigasi yang berorientasi pada pengurangan penyebab perubahan iklim, adaptasi berfokus pada pengelolaan dampak yang telah dan akan terjadi. Smit dan Wandel yang teorinya terus dirujuk dan dikembangkan dalam literatur adaptasi kontemporer menekankan bahwa kapasitas adaptasi suatu sistem pertanian ditentukan oleh interaksi antara eksposur terhadap risiko iklim, sensitivitas sistem terhadap risiko tersebut, dan kapasitas adaptif yang dimiliki oleh pelaku usaha tani. Kurniasari *et al*. (2022) mengaplikasikan kerangka ini dan menemukan bahwa kapasitas adaptif petani sangat dipengaruhi oleh akses terhadap informasi iklim, modal sosial komunitas, serta diversifikasi sumber pendapatan rumah tangga.

Salah satu strategi adaptasi yang paling mendasar adalah pengembangan dan penyebarluasan varietas tanaman yang toleran terhadap cekaman lingkungan, seperti varietas toleran kekeringan, toleran genangan, dan toleran salinitas. Perkembangan bioteknologi pemuliaan tanaman dalam dekade terakhir telah mempercepat pelepasan varietas-varietas adaptif tersebut, termasuk varietas padi toleran genangan yang mampu bertahan hidup terendam air hingga dua minggu, jauh melampaui kemampuan varietas konvensional yang umumnya mati setelah tiga hingga empat hari terendam. Anggraeni *et al*. (2023) melaporkan bahwa adopsi varietas padi toleran genangan di kawasan rawan banjir mampu menyelamatkan hingga 80 persen potensi hasil pada musim tanam dengan kejadian banjir dibandingkan varietas konvensional yang mengalami gagal panen total pada kondisi serupa.

Penyesuaian kalender tanam berdasarkan prakiraan iklim musiman merupakan strategi adaptasi lain yang relatif murah namun memerlukan akses informasi iklim yang akurat dan tepat waktu. Sistem informasi iklim pertanian yang dikembangkan oleh lembaga meteorologi dan klimatologi memungkinkan petani menyesuaikan waktu tanam untuk menghindari periode kekeringan atau curah hujan ekstrem yang diprediksi terjadi. Namun demikian, Rahmawati dan Susilo (2021) mengingatkan bahwa efektivitas informasi iklim sangat bergantung pada kemampuan petani dalam menginterpretasikan informasi probabilistik menjadi keputusan agronomis yang konkret, sehingga pendampingan penyuluh pertanian dalam menerjemahkan prakiraan iklim menjadi rekomendasi teknis yang mudah dipahami menjadi elemen krusial dalam keberhasilan strategi ini.

Diversifikasi usaha tani, baik melalui diversifikasi komoditas maupun integrasi tanaman-ternak merupakan strategi adaptasi yang efektif dalam mengelola risiko iklim karena menyebar risiko kegagalan pada satu komoditas ke berbagai sumber pendapatan lainnya. Selain diversifikasi produksi, diversifikasi mata pencaharian di luar sektor pertanian, seperti kegiatan ekonomi non-pertanian musiman, juga berperan sebagai strategi coping rumah tangga tani dalam menghadapi guncangan iklim jangka pendek. Teknologi irigasi suplementer, sebagaimana telah dibahas pada subbab konservasi air, juga merupakan bagian integral dari strategi adaptasi karena memungkinkan petani mempertahankan produksi pada periode curah hujan rendah yang semakin sering terjadi akibat perubahan pola iklim.

Gambar 4.1 Kerangka Kapasitas Adaptasi Sistem Pertanian terhadap Perubahan Iklim



Kerangka ini menegaskan bahwa kerentanan bukan semata fungsi dari besaran risiko iklim, melainkan juga dipengaruhi oleh kapasitas adaptif yang dimiliki sistem pertanian dan pelaku usaha taninya. Pada tingkat kebijakan, penguatan adaptasi pertanian memerlukan integrasi antara sistem peringatan dini iklim, penelitian dan pengembangan varietas adaptif, penyuluhan pertanian yang responsif terhadap dinamika iklim, serta skema pembiayaan yang mendukung investasi adaptasi di tingkat usaha tani. Implementasi kebijakan tersebut di lapangan tetap memerlukan penguatan koordinasi antarlembaga serta peningkatan kapasitas kelembagaan petani agar strategi adaptasi dapat diterapkan secara efektif dan berkelanjutan.

1. Peran Penyuluhan Pertanian dalam Diseminasi Teknologi Adaptif

Penyuluh pertanian memegang peran sentral sebagai penghubung antara hasil penelitian dan pengembangan teknologi adaptif dengan praktik lapangan petani sehari-hari. Efektivitas diseminasi teknologi adaptif, seperti varietas toleran cekaman iklim dan teknik budidaya hemat air, sangat bergantung pada intensitas interaksi antara penyuluh dan petani, serta kesesuaian metode penyuluhan dengan karakteristik sosial-budaya komunitas setempat. Kurniasari *et al*. (2022) menemukan bahwa metode penyuluhan partisipatif melalui sekolah lapang (*farmer field school*) terbukti lebih efektif dalam mendorong adopsi teknologi adaptif dibandingkan metode penyuluhan konvensional yang bersifat satu arah, karena petani memperoleh kesempatan untuk menguji dan memodifikasi teknologi sesuai kondisi lahan mereka sendiri sebelum mengadopsinya secara penuh.

Keterbatasan jumlah tenaga penyuluh pertanian dibandingkan jumlah petani yang harus dilayani merupakan tantangan struktural yang dihadapi banyak wilayah di Indonesia, sehingga pemanfaatan teknologi digital untuk memperluas jangkauan penyuluhan menjadi semakin relevan. Poin-poin berikut merangkum strategi adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim yang perlu diperkuat pada masa mendatang.

a. Mempercepat pelepasan dan diseminasi varietas tanaman toleran cekaman kekeringan, genangan, dan salinitas.
b. Memperkuat sistem informasi iklim musiman yang mudah diakses dan dipahami oleh petani di berbagai tingkat literasi.

c. Mendorong metode penyuluhan partisipatif seperti sekolah lapang untuk mempercepat adopsi teknologi adaptif.
d. Mengembangkan skema diversifikasi usaha tani sebagai strategi pengelolaan risiko iklim tingkat rumah tangga.
e. Memanfaatkan teknologi digital untuk memperluas jangkauan layanan penyuluhan pertanian ke wilayah terpencil.

2. Adaptasi Berbasis Ekosistem sebagai Pelengkap Adaptasi Teknis

Selain strategi adaptasi berbasis teknologi dan agronomi, pendekatan adaptasi berbasis ekosistem (*ecosystem-based adaptation*) yang memanfaatkan fungsi jasa ekosistem alami untuk mengurangi kerentanan terhadap perubahan iklim semakin mendapat perhatian dalam literatur adaptasi kontemporer. Rehabilitasi vegetasi riparian di sepanjang daerah aliran sungai, misalnya, tidak hanya berfungsi sebagai strategi konservasi biodiversitas, tetapi juga berperan sebagai strategi adaptasi yang mengurangi risiko banjir bandang dan menstabilkan pasokan air pada musim kemarau melalui perbaikan fungsi tangkapan air kawasan hulu. Kurniasari *et al*. (2022) menegaskan bahwa integrasi adaptasi berbasis ekosistem dengan adaptasi teknis konvensional menghasilkan strategi yang lebih komprehensif dan berbiaya lebih efisien dalam jangka panjang dibandingkan mengandalkan infrastruktur keras semata, seperti tanggul beton, yang memerlukan biaya pemeliharaan tinggi dan rentan terhadap kegagalan struktural pada kejadian iklim ekstrem yang melampaui kapasitas desainnya.

Penerapan adaptasi berbasis ekosistem memerlukan horizon waktu perencanaan yang lebih panjang dibandingkan intervensi infrastruktur konvensional, mengingat fungsi ekosistem yang direhabilitasi umumnya memerlukan waktu beberapa tahun hingga mencapai fungsi optimal. Oleh karena itu, kesabaran dan komitmen jangka panjang dari pembuat kebijakan menjadi prasyarat penting bagi keberhasilan strategi adaptasi berbasis ekosistem, yang kerap kalah populer dibandingkan proyek infrastruktur fisik yang memberikan hasil lebih cepat terlihat secara politis, meskipun manfaat jangka panjangnya berpotensi lebih besar dan berkelanjutan.

Tabel 4.4 Contoh Strategi Adaptasi Berdasarkan Jenis Risiko Iklim

Risiko Iklim	Strategi Adaptasi Utama
Kekeringan	Varietas toleran kekeringan, irigasi suplementer, panen air hujan
Genangan/banjir	Varietas toleran genangan, penyesuaian kalender tanam
Kenaikan suhu	Pergeseran zona tanam, naungan agroforestri untuk komoditas sensitif
Salinitas	Varietas toleran salin, perbaikan drainase lahan pesisir

Sumber: Kurniasari *et al*. (2022) dan Anggraeni *et al*. (2023)

D. Sistem Produksi Rendah Karbon

Sistem produksi rendah karbon (*low carbon agriculture*) merupakan pendekatan produksi pertanian yang dirancang untuk meminimalkan jejak karbon per unit produk yang dihasilkan, tanpa mengorbankan produktivitas dan pendapatan petani secara signifikan. Konsep ini berbeda dengan pendekatan mitigasi emisi absolut, karena berfokus pada efisiensi karbon relatif terhadap output produksi, sehingga lebih realistis diterapkan pada konteks negara berkembang yang masih memerlukan peningkatan produksi pangan untuk memenuhi kebutuhan populasi yang terus bertambah. Handayani *et al*. (2022) menegaskan bahwa strategi produksi rendah karbon idealnya diukur melalui indikator intensitas emisi (*emission intensity*), yaitu jumlah emisi gas rumah kaca yang dihasilkan per kilogram produk pangan, sehingga peningkatan produktivitas yang disertai efisiensi input sekaligus dapat menurunkan intensitas emisi meskipun total produksi meningkat.

Penerapan sistem produksi rendah karbon pada budidaya padi, sebagai komoditas dengan kontribusi emisi metana signifikan, dapat dicapai melalui kombinasi teknik AWD, penggunaan varietas dengan periode pertumbuhan lebih pendek, serta pengelolaan jerami pascapanen yang tepat, misalnya melalui pengomposan alih-alih pembakaran. Pratiwi *et al*. (2023) melaporkan bahwa penerapan paket teknologi rendah karbon pada budidaya padi di Sumatera Selatan yang menggabungkan AWD, pemupukan berimbang, dan pengelolaan jerami

mampu menurunkan intensitas emisi hingga 30 persen dibandingkan praktik konvensional petani setempat, sekaligus meningkatkan produktivitas sebesar 8 persen berkat perbaikan efisiensi hara dan pengurangan kompetisi tanaman terhadap gulma pada fase pengeringan.

Pada subsektor peternakan, strategi produksi rendah karbon mencakup perbaikan kualitas pakan ternak untuk menurunkan emisi metana dari fermentasi enterik, pemanfaatan aditif pakan yang terbukti menekan produksi metana rumen, serta pengelolaan kotoran ternak melalui instalasi biogas yang sekaligus menghasilkan energi terbarukan bagi rumah tangga peternak. Nugraha dan Wicaksana (2021) mendemonstrasikan bahwa pemberian pakan ternak sapi potong dengan kualitas serat yang lebih baik dan suplementasi mineral yang tepat mampu menurunkan emisi metana per kilogram bobot badan yang dihasilkan hingga 18 persen, sekaligus mempercepat laju pertumbuhan ternak, sehingga periode penggemukan menjadi lebih singkat dan total emisi sepanjang siklus produksi turut menurun.

Pertanian presisi (*precision agriculture*) yang memanfaatkan teknologi sensor, citra satelit, dan sistem informasi geografis turut berkontribusi terhadap penurunan intensitas karbon melalui optimalisasi penggunaan input produksi sesuai kebutuhan aktual tanaman secara spasial dan temporal. Teknologi ini memungkinkan petani menghindari pemborosan pupuk dan air pada area yang sebenarnya tidak memerlukan input tambahan, sekaligus meningkatkan hasil pada area yang mengalami defisiensi hara. Wicaksono *et al*. (2023) mencatat bahwa penerapan pemupukan berbasis peta variabilitas kesuburan lahan (*variable rate application*) pada perkebunan tebu di Jawa Timur mampu menurunkan penggunaan pupuk nitrogen hingga 15 persen tanpa penurunan produktivitas, yang secara langsung berkorelasi dengan penurunan emisi N2O dari lahan tersebut.

Tabel 4.5 Praktik Produksi Rendah Karbon pada Berbagai Subsektor Pertanian

Subsektor	Praktik Rendah Karbon	Manfaat Tambahan
Tanaman pangan (padi)	AWD, pengelolaan jerami, pemupukan berimbang	Hemat air, peningkatan produktivitas

Subsektor	Praktik Rendah Karbon	Manfaat Tambahan
Peternakan	Perbaikan kualitas pakan, biogas kotoran ternak	Energi terbarukan, pertumbuhan ternak lebih cepat
Perkebunan	Pertanian presisi, variable rate application	Efisiensi input, penurunan biaya produksi

Sumber: Pratiwi *et al*. (2023), Nugraha & Wicaksana (2021), dan Wicaksono *et al*. (2023)

1. Integrasi Energi Terbarukan dalam Sistem Produksi Rendah Karbon

Integrasi sumber energi terbarukan ke dalam rantai produksi pertanian merupakan dimensi penting lainnya dari sistem produksi rendah karbon yang kerap kurang mendapat perhatian dibandingkan praktik agronomis di lahan. Pemanfaatan panel surya untuk menggerakkan pompa irigasi, instalasi biogas berbahan baku limbah pertanian dan peternakan, serta penggunaan mesin pengering hasil panen bertenaga surya merupakan beberapa contoh penerapan energi terbarukan yang secara langsung menurunkan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dalam rantai produksi pertanian. Handayani *et al*. (2022) mencatat bahwa investasi awal yang relatif tinggi masih menjadi kendala utama adopsi teknologi energi terbarukan di tingkat petani, sehingga skema pembiayaan mikro dan subsidi teknologi menjadi instrumen penting untuk mempercepat transisi ini.

Sinergi antara praktik agronomis rendah karbon dan integrasi energi terbarukan menciptakan sistem produksi yang secara komprehensif menurunkan jejak karbon sepanjang rantai nilai, mulai dari praproduksi hingga pascapanen. Poin-poin berikut merangkum elemen kunci sistem produksi rendah karbon yang perlu diperkuat dalam kebijakan pembangunan pertanian ke depan.

a. Memperluas adopsi teknik AWD dan pemupukan berimbang pada sentra produksi padi nasional.
b. Mendorong perbaikan kualitas pakan ternak dan pemanfaatan biogas kotoran ternak pada usaha peternakan skala kecil dan menengah.

c. Memfasilitasi adopsi pertanian presisi berbasis data spasial untuk optimalisasi penggunaan input produksi.
d. Menyediakan skema pembiayaan mikro bagi adopsi teknologi energi terbarukan di tingkat usaha tani.
e. Mengukur dan melaporkan intensitas emisi produk pertanian secara berkala sebagai basis evaluasi kebijakan rendah karbon.

2. Sertifikasi dan Pelabelan Produk Rendah Karbon

Perkembangan pasar produk pertanian berkelanjutan dalam beberapa tahun terakhir mendorong tumbuhnya berbagai skema sertifikasi dan pelabelan yang memberikan informasi kepada konsumen mengenai jejak karbon produk yang mereka konsumsi, mulai dari sertifikasi organik, sertifikasi karbon netral, hingga label jejak karbon produk (*carbon footprint label*) yang mulai diadopsi oleh beberapa produsen pangan skala besar. Wicaksono *et al*. (2023) mencatat bahwa premi harga dari sertifikasi produk rendah karbon dapat menjadi insentif ekonomi yang signifikan bagi petani, meskipun akses terhadap skema sertifikasi tersebut masih terkonsentrasi pada petani dengan skala usaha yang lebih besar dan terhubung dengan rantai pasok ekspor, sementara petani skala kecil yang berorientasi pasar domestik masih menghadapi keterbatasan akses terhadap manfaat premi harga tersebut.

Perluasan akses sertifikasi produk rendah karbon bagi petani skala kecil memerlukan penyederhanaan prosedur sertifikasi, subsidi biaya sertifikasi awal, serta penguatan kelembagaan kelompok tani yang memungkinkan sertifikasi dilakukan secara kolektif untuk menekan biaya per petani. Tanpa upaya inklusi semacam ini, manfaat ekonomi dari transisi menuju produksi rendah karbon berisiko hanya dinikmati oleh segelintir petani dengan modal dan akses pasar yang lebih baik, sementara mayoritas petani skala kecil yang justru memerlukan insentif tambahan untuk bertransisi tetap tertinggal dari manfaat pasar produk berkelanjutan yang terus berkembang.

Transisi menuju sistem produksi rendah karbon secara masif memerlukan dukungan ekosistem kebijakan yang komprehensif, termasuk penyediaan insentif fiskal bagi petani yang mengadopsi praktik rendah karbon, penguatan riset dan pengembangan teknologi adaptif lokal, serta peningkatan kapasitas penyuluh pertanian dalam mendiseminasikan paket teknologi rendah karbon kepada petani secara

luas. Tanpa dukungan ekosistem kebijakan yang memadai, adopsi praktik rendah karbon berisiko hanya terbatas pada skala percontohan tanpa mampu memberikan dampak signifikan terhadap penurunan emisi sektor pertanian secara nasional.

E. Pertanian Regeneratif

Pertanian regeneratif (*regenerative agriculture*) merupakan pendekatan produksi pertanian yang berorientasi tidak sekadar pada keberlanjutan (*sustainability*), yaitu mempertahankan kondisi sumber daya alam agar tidak menurun, tetapi lebih jauh berupaya memulihkan dan meningkatkan kualitas ekosistem, terutama kesehatan tanah, dari waktu ke waktu. Newton *et al*. (2020) mengidentifikasi bahwa meskipun definisi pertanian regeneratif masih beragam dalam literatur, terdapat konsensus mengenai lima prinsip inti yang menjadi ciri khasnya, yaitu meminimalkan gangguan tanah, menjaga tanah tetap tertutup vegetasi sepanjang tahun, memaksimalkan keragaman tanaman, mempertahankan akar hidup di dalam tanah secara kontinu, serta mengintegrasikan ternak ke dalam sistem produksi tanaman. Prinsip-prinsip tersebut secara kolektif dirancang untuk memulihkan fungsi biologis tanah yang telah terdegradasi akibat praktik pertanian intensif konvensional.

Praktik olah tanah minimum atau tanpa olah tanah (*no-till*) merupakan fondasi utama pertanian regeneratif karena gangguan mekanis pada tanah terbukti menghancurkan jejaring hifa fungi mikoriza dan struktur agregat tanah yang telah terbentuk melalui proses biologis alami. Setiawan *et al*. (2023) melalui penelitian jangka panjang selama tujuh tahun pada lahan jagung di Jawa Timur menemukan bahwa penerapan sistem tanpa olah tanah yang dikombinasikan dengan tanaman penutup tanah secara konsisten meningkatkan kandungan karbon organik tanah pada lapisan permukaan sebesar 0,3 persen per tahun, jauh lebih tinggi dibandingkan sistem olah tanah konvensional yang justru menunjukkan tren penurunan karbon organik tanah dalam periode yang sama. Peningkatan karbon organik tanah tersebut berkorelasi positif dengan perbaikan kapasitas tanah menahan air dan peningkatan populasi cacing tanah sebagai indikator kesehatan biologi tanah.

Penanaman tanaman penutup tanah multispesies (*multispecies cover crop*) merupakan praktik kunci lainnya dalam pertanian regeneratif, karena kombinasi berbagai spesies tanaman penutup dengan karakteristik perakaran dan fungsi ekologis yang berbeda mampu memberikan manfaat yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan spesies tunggal. Kombinasi tanaman legum yang memfiksasi nitrogen, tanaman berakar dalam yang memecah lapisan tanah padat, dan tanaman penutup permukaan yang menekan pertumbuhan gulma menciptakan sinergi fungsional yang memperkaya kompleksitas biologis tanah. Fernandez *et al*. (2021) dalam kajian komparatif di berbagai wilayah pertanian tropis menyimpulkan bahwa penggunaan campuran empat hingga enam spesies tanaman penutup tanah menghasilkan peningkatan biomassa mikroba tanah yang secara signifikan lebih tinggi dibandingkan penggunaan spesies tunggal, meskipun manfaat marginal cenderung menurun ketika jumlah spesies ditambahkan melebihi delapan jenis.

Integrasi ternak ke dalam sistem pertanian regeneratif, khususnya melalui praktik penggembalaan terkelola (*managed grazing* atau *holistic grazing*), berperan penting dalam mempercepat siklus hara dan menstimulasi pertumbuhan kembali vegetasi melalui mekanisme pemangkasan alami oleh ternak yang merangsang perakaran tanaman menjadi lebih dalam dan ekstensif. Praharsini *et al*. (2022) mencatat bahwa penerapan sistem penggembalaan rotasi intensif pada padang rumput di kawasan peternakan Jawa Barat mampu meningkatkan produktivitas biomassa hijauan hingga 22 persen dibandingkan penggembalaan kontinu tanpa pengaturan rotasi, sekaligus menurunkan kebutuhan pupuk kimia karena distribusi kotoran ternak yang lebih merata di seluruh area penggembalaan berkat pergerakan ternak yang terkontrol.

Gambar 4.2 Lima Prinsip Inti Pertanian Regeneratif



Kelima prinsip bersifat saling memperkuat dan idealnya diterapkan secara simultan agar proses regenerasi biologis tanah berlangsung optimal (Newton et al., 2020). Meskipun manfaat ekologis pertanian regeneratif telah banyak didokumentasikan, adopsinya di kalangan petani menghadapi tantangan berupa periode transisi yang memerlukan penyesuaian pengetahuan dan keterampilan baru, potensi penurunan hasil sementara pada masa awal transisi sebelum ekosistem tanah pulih sepenuhnya, serta keterbatasan akses terhadap benih tanaman penutup tanah yang beragam. Oleh karena itu, dukungan pendampingan teknis yang intensif selama masa transisi, disertai skema insentif finansial yang dapat menutupi potensi penurunan pendapatan sementara, menjadi faktor penentu keberhasilan perluasan adopsi pertanian regeneratif secara lebih luas di tingkat petani skala kecil.

1. Pengukuran Dampak Regeneratif Melalui Indikator Kesehatan Tanah

Evaluasi keberhasilan penerapan pertanian regeneratif memerlukan pengukuran indikator kesehatan tanah secara periodik, guna memastikan bahwa praktik yang diterapkan benar-benar menghasilkan tren perbaikan kualitas tanah dari waktu ke waktu, bukan sekadar klaim tanpa dasar empiris. Indikator karbon organik tanah, stabilitas agregat, dan populasi cacing tanah merupakan parameter yang relatif mudah diukur secara berkala oleh petani dengan pendampingan teknis minimal,

sehingga dapat digunakan sebagai alat pemantauan mandiri untuk menilai kemajuan transisi menuju sistem regeneratif. Setiawan *et al*. (2023) merekomendasikan penggunaan kartu skor kesehatan tanah sederhana (*simple soil health scorecard*) yang dapat diisi petani secara mandiri sebagai instrumen pemantauan partisipatif yang murah namun informatif.

Selain manfaat pemantauan teknis, keterlibatan petani dalam pengukuran indikator kesehatan tanah juga berfungsi sebagai media pembelajaran yang memperkuat pemahaman mereka terhadap prinsip-prinsip ekologis yang mendasari praktik regeneratif. Poin-poin berikut merangkum prinsip dan strategi penerapan pertanian regeneratif yang relevan bagi konteks pertanian tropis Indonesia.

a. Mengurangi intensitas pengolahan tanah secara bertahap menuju sistem tanpa olah tanah pada lahan yang sesuai.
b. Menanam kombinasi tanaman penutup tanah multispesies untuk memperkaya keragaman fungsional biologi tanah.
c. Mengintegrasikan ternak melalui sistem penggembalaan terkelola guna mempercepat siklus hara pada lahan campuran.
d. Memantau indikator kesehatan tanah secara berkala menggunakan kartu skor sederhana sebagai alat evaluasi mandiri petani.
e. Menyediakan pendampingan teknis intensif selama masa transisi guna meminimalkan risiko penurunan hasil sementara.

2. Pertanian Regeneratif dan Ketahanan Pangan Jangka Panjang

Argumen fundamental yang mendasari gerakan pertanian regeneratif adalah bahwa ketahanan pangan jangka panjang tidak dapat dicapai melalui sistem produksi yang secara bertahap menguras kapasitas produktif sumber daya alam yang menjadi basis produksi itu sendiri. Newton *et al*. (2020) menegaskan bahwa paradigma produktivitas jangka pendek yang mengabaikan dampak jangka panjang terhadap kesehatan tanah pada dasarnya adalah strategi yang secara struktural tidak berkelanjutan, sekalipun mampu menghasilkan hasil panen tinggi dalam periode tertentu, karena kapasitas produktif tanah yang terus terkuras pada akhirnya akan membatasi produktivitas di masa depan, bahkan dengan input eksternal yang semakin tinggi sekalipun.

Perspektif jangka panjang semacam ini menuntut perubahan paradigma dalam evaluasi kebijakan pertanian, dari semata mengukur keberhasilan berdasarkan produktivitas tahunan menuju evaluasi yang turut mempertimbangkan tren perubahan kapasitas produktif sumber daya alam dari waktu ke waktu. Pengintegrasian indikator kesehatan tanah ke dalam sistem statistik pertanian nasional, sebagaimana telah mulai dirintis di beberapa negara maju, dapat menjadi langkah penting bagi Indonesia dalam membangun basis kebijakan pertanian yang benar-benar berorientasi keberlanjutan jangka panjang, bukan sekadar keberlanjutan dalam retorika kebijakan semata.

Tabel 4.6 Perbandingan Sistem Konvensional dan Sistem Regeneratif pada Indikator Agronomis

Indikator	Sistem Konvensional	Sistem Regeneratif
Karbon organik tanah	Cenderung stagnan/menurun	Meningkat ±0,3%/tahun (Setiawan *et al*., 2023)
Kapasitas menahan air	Rendah hingga sedang	Meningkat seiring perbaikan struktur tanah
Biomassa mikroba tanah	Rendah pada olah tanah intensif	Meningkat dengan cover crop multispesies

Sumber: Setiawan *et al*. (2023) dan Fernandez *et al*. (2021)

3. Diversifikasi Pembiayaan Risiko Iklim Berbasis Komunitas

Selain instrumen asuransi formal dan sistem peringatan dini, skema pembiayaan risiko iklim berbasis komunitas, seperti lumbung pangan komunal dan tabungan kelompok tani, memberikan lapisan perlindungan tambahan yang relevan khususnya bagi petani skala kecil yang belum terjangkau layanan asuransi formal. Skema semacam ini mengandalkan modal sosial dan mekanisme gotong royong yang telah lama menjadi bagian dari struktur sosial masyarakat pedesaan Indonesia, sehingga relatif mudah diterima dan dikelola secara mandiri oleh komunitas. Dewi *et al*. (2022) mencatat bahwa kombinasi antara skema formal seperti asuransi indeks iklim dengan skema informal berbasis komunitas menghasilkan cakupan perlindungan risiko yang lebih komprehensif dibandingkan mengandalkan salah satu skema saja, karena

keduanya saling melengkapi pada dimensi jangkauan dan kecepatan respons terhadap kejadian iklim ekstrem.

Penguatan sinergi antara skema formal dan informal tersebut memerlukan dukungan kebijakan yang mengakui keberadaan mekanisme informal sebagai bagian integral dari sistem manajemen risiko iklim nasional, bukan semata mengandalkan instrumen formal yang kerap terbatas jangkauannya di wilayah pedesaan terpencil. Poin-poin berikut merangkum strategi manajemen risiko iklim yang relevan diterapkan secara berlapis pada konteks pertanian Indonesia.

a. Memperluas cakupan asuransi pertanian berbasis indeks iklim dengan penyederhanaan mekanisme klaim bagi petani.
b. Memperkuat sistem peringatan dini berbasis teknologi digital yang terjangkau bagi petani di wilayah terpencil.
c. Mendorong penguatan kelembagaan tani sebagai wadah berbagi risiko dan advokasi kolektif.
d. Mengintegrasikan skema pembiayaan risiko formal dan informal berbasis komunitas secara saling melengkapi.
e. Membangun basis data risiko iklim tingkat kabupaten sebagai acuan perumusan kebijakan manajemen risiko yang kontekstual.

4. Kesenjangan Gender dalam Akses Manajemen Risiko Iklim

Dimensi kesetaraan gender merupakan aspek penting yang kerap terabaikan dalam perumusan kebijakan manajemen risiko iklim sektor pertanian, padahal petani perempuan menghadapi tantangan akses yang berbeda dibandingkan petani laki-laki terhadap informasi iklim, layanan asuransi, dan sumber daya produksi secara umum. Data global menunjukkan bahwa petani perempuan cenderung memiliki akses lebih rendah terhadap input produksi dan informasi teknis, yang berkontribusi pada kesenjangan hasil panen antara lahan yang dikelola perempuan dan laki-laki. Ismail *et al*. (2022) merekomendasikan agar program manajemen risiko iklim dirancang dengan mempertimbangkan kebutuhan spesifik petani perempuan, termasuk melalui penyediaan materi informasi iklim dalam format yang lebih mudah diakses dan penguatan kepemimpinan perempuan dalam kelembagaan kelompok tani.

Pengarusutamaan gender dalam kebijakan manajemen risiko iklim bukan semata isu keadilan sosial, melainkan juga strategi untuk

meningkatkan efektivitas program secara keseluruhan, mengingat perempuan tani kerap memegang peran penting dalam pengambilan keputusan rumah tangga terkait pengelolaan sumber daya dan strategi bertahan hidup pada masa krisis, sehingga pengabaian perspektif gender berpotensi menurunkan efektivitas program manajemen risiko iklim secara keseluruhan, terlepas dari kecanggihan instrumen teknis yang digunakan dalam program tersebut.

Manajemen risiko iklim yang efektif memerlukan pendekatan berlapis yang mengombinasikan instrumen finansial, teknologi informasi, dan penguatan kelembagaan sosial secara simultan. Tidak ada satu instrumen tunggal yang mampu menyelesaikan seluruh dimensi risiko iklim yang dihadapi petani, sehingga perumusan kebijakan manajemen risiko iklim yang komprehensif perlu mempertimbangkan karakteristik spesifik wilayah, jenis komoditas, serta kapasitas sosial-ekonomi petani setempat agar strategi yang diterapkan benar-benar responsif terhadap kebutuhan riil di lapangan.

Tabel 4.7 Tahapan Kerangka Manajemen Risiko Iklim Pertanian

Tahapan	Deskripsi Singkat
Identifikasi risiko	Analisis data iklim historis dan proyeksi ke depan
Penilaian kerentanan	Menilai sensitivitas sistem pertanian terhadap risiko teridentifikasi
Perumusan strategi	Menyusun langkah preventif dan responsif terhadap risiko
Pemantauan & evaluasi	Menilai efektivitas strategi secara berkelanjutan

Sumber: Dewi *et al*. (2022)

F. Studi Kasus Climate Smart Agriculture

Implementasi konsep pertanian cerdas iklim telah diterapkan pada berbagai konteks agroekologi dan sosial-ekonomi di berbagai belahan dunia, memberikan pembelajaran berharga mengenai faktor-faktor kunci keberhasilan maupun tantangan yang dihadapi dalam penerapannya di lapangan. Program *Climate-Smart Villages* yang

diinisiasi oleh *CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security* (CCAFS) merupakan salah satu model implementasi CSA yang paling banyak dirujuk dalam literatur global, dengan pendekatan yang melibatkan komunitas desa secara partisipatif dalam merancang dan menguji paket teknologi cerdas iklim yang sesuai dengan konteks lokal masing-masing. Aggarwal *et al*. (2021) melalui evaluasi program di beberapa desa percontohan di Asia Selatan menemukan bahwa desa-desa yang menerapkan paket teknologi CSA secara terintegrasi, meliputi varietas toleran cekaman, irigasi hemat air, dan informasi iklim presisi, menunjukkan peningkatan pendapatan usaha tani rata-rata 15 hingga 20 persen dibandingkan desa kontrol yang belum menerapkan paket teknologi tersebut.

Di tingkat nasional, Indonesia telah mengembangkan berbagai inisiatif yang selaras dengan prinsip CSA, salah satunya melalui program Kalender Tanam Terpadu yang dikembangkan oleh Kementerian Pertanian bekerja sama dengan lembaga penelitian iklim untuk memberikan rekomendasi waktu tanam berbasis prediksi iklim musiman kepada petani di seluruh Indonesia. Sulistyowati *et al*. (2022) mengevaluasi efektivitas program tersebut di sentra produksi padi Jawa Tengah dan menemukan bahwa petani yang mengikuti rekomendasi kalender tanam terpadu mengalami penurunan risiko gagal panen akibat kekeringan maupun kebanjiran secara signifikan dibandingkan petani yang tetap menggunakan pola tanam tradisional berbasis pengalaman semata, meskipun tingkat kepatuhan terhadap rekomendasi masih bervariasi antarwilayah karena keterbatasan diseminasi informasi hingga ke tingkat petani secara merata.

Studi kasus lain yang relevan adalah penerapan pertanian cerdas iklim pada komoditas kopi di dataran tinggi, yang menggabungkan sistem agroforestri kopi-naungan sebagaimana dibahas pada Bab 3, dengan praktik konservasi tanah dan air, serta diversifikasi varietas kopi yang lebih toleran terhadap kenaikan suhu. Program yang dikembangkan bersama antara lembaga penelitian kopi dan kelompok tani di Jawa Timur ini menunjukkan bahwa kombinasi pendekatan ekologis dan agronomis mampu mempertahankan produktivitas kopi pada kondisi iklim yang semakin tidak menentu, sekaligus meningkatkan nilai jual produk melalui sertifikasi kopi berkelanjutan yang semakin diminati pasar ekspor. Handoko *et al*. (2023) mencatat bahwa premi harga dari

sertifikasi kopi berkelanjutan tersebut mampu meningkatkan pendapatan petani hingga 12 persen dibandingkan penjualan kopi konvensional tanpa sertifikasi, memberikan insentif ekonomi konkret bagi keberlanjutan penerapan praktik cerdas iklim.

Pembelajaran lintas studi kasus tersebut menegaskan beberapa faktor kunci keberhasilan implementasi CSA, yaitu pentingnya pendekatan partisipatif yang melibatkan petani sejak tahap perencanaan, kombinasi paket teknologi yang disesuaikan dengan konteks agroekologi dan sosial-ekonomi lokal, ketersediaan insentif ekonomi yang jelas bagi petani pengadopsi, serta dukungan kelembagaan yang konsisten dalam jangka panjang. Tanpa kehadiran faktor-faktor tersebut secara simultan, program CSA berisiko hanya berhasil pada skala percontohan tanpa mampu direplikasi secara luas dan berkelanjutan, sebagaimana ditegaskan berulang kali dalam berbagai evaluasi program CSA di berbagai negara berkembang.

1. Sintesis Pembelajaran dan Arah Pengembangan Ke Depan

Sintesis dari berbagai studi kasus implementasi pertanian cerdas iklim yang telah diuraikan menegaskan bahwa keberhasilan program CSA bukan semata ditentukan oleh kecanggihan teknologi yang diterapkan, melainkan oleh kesesuaian teknologi tersebut dengan konteks agroekologi, sosial, dan ekonomi setempat, serta konsistensi dukungan kelembagaan dalam jangka panjang. Program yang dirancang tanpa melibatkan partisipasi aktif petani sejak tahap awal cenderung menghadapi resistensi adopsi, sekalipun secara teknis terbukti efektif pada uji coba awal. Aggarwal *et al*. (2021) menekankan pentingnya pendekatan iteratif dalam pengembangan CSA, di mana paket teknologi terus disesuaikan berdasarkan umpan balik petani selama proses implementasi, bukan dirancang secara kaku sejak awal tanpa ruang penyesuaian.

Ke depan, pengembangan pertanian cerdas iklim di Indonesia perlu diarahkan pada penguatan basis data iklim dan pertanian yang terintegrasi, perluasan skema pembiayaan inovatif yang menjangkau petani skala kecil, serta penguatan kapasitas kelembagaan petani sebagai unit implementasi utama di lapangan. Poin-poin berikut merangkum arah strategis pengembangan pertanian cerdas iklim yang relevan bagi konteks Indonesia ke depan.

a. Memperkuat basis data iklim dan pertanian terintegrasi sebagai acuan perencanaan program CSA berbasis bukti.
b. Mengembangkan paket teknologi CSA yang disesuaikan secara kontekstual dengan agroekologi dan sosial-ekonomi lokal.
c. Memperluas skema pembiayaan inovatif, termasuk pasar karbon dan sertifikasi berkelanjutan, yang menjangkau petani skala kecil.
d. Menguatkan kapasitas kelembagaan petani sebagai unit implementasi utama program CSA di tingkat lapangan.
e. Mendorong pendekatan iteratif dan partisipatif dalam pengembangan dan penyempurnaan paket teknologi CSA dari waktu ke waktu.

2. Tantangan Replikasi dan Skalabilitas Program CSA

Salah satu tantangan paling mendasar yang dihadapi dalam pengembangan pertanian cerdas iklim secara global adalah kesenjangan antara keberhasilan program pada skala percontohan dengan keberhasilan replikasi pada skala yang lebih luas. Banyak program CSA yang menunjukkan hasil menjanjikan pada beberapa desa percontohan, namun mengalami kesulitan signifikan ketika direplikasi pada skala kabupaten atau provinsi, terutama karena keterbatasan sumber daya manusia pendamping, variasi kondisi agroekologi antarwilayah, serta perbedaan kapasitas kelembagaan petani di berbagai lokasi. Sulistyowati *et al*. (2022) mencatat bahwa program yang berhasil direplikasi secara luas umumnya memiliki desain yang cukup fleksibel untuk disesuaikan dengan konteks lokal, namun tetap mempertahankan prinsip-prinsip inti yang menjadi basis keberhasilan program tersebut, sebuah keseimbangan yang tidak mudah dicapai dalam praktik perancangan program pembangunan pertanian.

Pembelajaran dari tantangan replikasi ini menegaskan pentingnya investasi jangka panjang dalam penguatan kapasitas kelembagaan lokal, bukan semata transfer teknologi dari luar, sebagai fondasi bagi keberlanjutan dan skalabilitas program pertanian cerdas iklim di masa depan. Pengembangan pusat pembelajaran regional yang memungkinkan pertukaran pengalaman antarwilayah, serta penguatan peran perguruan tinggi dan lembaga penelitian lokal dalam pendampingan teknis berkelanjutan, merupakan investasi strategis yang

perlu diprioritaskan agar keberhasilan program CSA tidak hanya terbatas pada skala percontohan, melainkan benar-benar memberikan dampak transformatif terhadap ketahanan pangan nasional secara luas dan merata.

Tabel 4.8 Faktor Kunci Keberhasilan Implementasi *Climate Smart Agriculture*

Faktor Kunci	Penjelasan Singkat
Pendekatan partisipatif	Melibatkan petani sejak tahap perencanaan program
Kesesuaian kontekstual	Paket teknologi disesuaikan dengan agroekologi dan sosial-ekonomi lokal
Insentif ekonomi jelas	Manfaat finansial yang nyata bagi petani pengadopsi
Dukungan kelembagaan jangka panjang	Konsistensi dukungan melampaui masa proyek

Sumber: Aggarwal *et al*. (2021) dan Sulistyowati *et al*. (2022)

Pertanian cerdas iklim merupakan kerangka pendekatan yang mengintegrasikan tiga tujuan utama, yaitu peningkatan produktivitas dan pendapatan, penguatan ketahanan terhadap risiko iklim, serta penurunan emisi gas rumah kaca, secara simultan dan saling memperkuat. Berbagai studi kasus yang telah diuraikan menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi CSA tidak dapat dilepaskan dari konteks ekologi dan sosial-ekonomi lokal, sehingga replikasi program CSA dari satu wilayah ke wilayah lain memerlukan proses adaptasi kontekstual, bukan sekadar transfer teknologi secara langsung. Pemahaman komprehensif mengenai ekologi pertanian, dipadukan dengan prinsip-prinsip pertanian cerdas iklim, menjadi landasan konseptual penting bagi pengembangan sistem pertanian berkelanjutan yang mampu menjawab tantangan ketahanan pangan di tengah ketidakpastian iklim global yang terus meningkat.



BAB V
INOVASI TEKNOLOGI DALAM PERTANIAN BERKELANJUTAN

A. Transformasi Digital Pertanian

Transformasi digital pertanian merujuk pada proses adopsi dan integrasi teknologi digital ke dalam seluruh rantai nilai pertanian, mulai dari perencanaan produksi, budi daya, panen, pascapanen, hingga distribusi dan pemasaran. Klerkx dan Rose (2020) menegaskan bahwa teknologi digital dalam pertanian bersifat *game-changing* karena mengubah secara fundamental cara petani mengambil keputusan, yaitu dari pendekatan berbasis pengalaman turun-temurun menjadi pendekatan berbasis bukti dan data real-time. Digitalisasi pertanian mencakup empat pilar utama yaitu konektivitas (*connectivity*), otomasi (*automation*), analitik data (*data analytics*), dan platform digital yang menghubungkan aktor-aktor dalam rantai pasok pangan secara terintegrasi.

Basso dan Antle (2020) menyatakan bahwa pertanian digital (*digital agriculture*) dirancang untuk menghasilkan sistem produksi pangan yang tidak hanya produktif, tetapi juga berkelanjutan secara ekologis melalui optimalisasi penggunaan input produksi seperti air, pupuk, dan pestisida berdasarkan kebutuhan aktual tanaman. Pendekatan ini memungkinkan terjadinya efisiensi sumber daya yang signifikan tanpa mengorbankan produktivitas, sekaligus menekan dampak negatif terhadap lingkungan seperti pencemaran air tanah akibat pemupukan berlebih dan degradasi kesuburan lahan akibat eksploitasi yang tidak terkendali.

Dorongan utama transformasi digital pertanian bersumber dari sejumlah tekanan global, di antaranya pertumbuhan populasi dunia yang diproyeksikan mencapai hampir sepuluh miliar jiwa pada tahun 2050, perubahan iklim yang meningkatkan frekuensi cuaca ekstrem, serta

keterbatasan lahan pertanian produktif akibat alih fungsi lahan. Fraser dan Campbell (2019) memperkenalkan konsep *Agriculture 5.0* sebagai kelanjutan dari *Agriculture 4.0*, yang menekankan rekonsiliasi antara peningkatan produksi pangan dan pemeliharaan kesehatan planet (*planetary health*) melalui pemanfaatan teknologi cerdas yang mampu beradaptasi secara mandiri terhadap kondisi lingkungan.

Meskipun potensi transformasi digital sangat besar, adopsinya di lapangan menghadapi berbagai hambatan struktural. Shepherd, Turner, Small, dan Wheeler (2020) mengidentifikasi sejumlah kendala utama, yaitu rendahnya literasi digital petani, keterbatasan infrastruktur telekomunikasi di wilayah pedesaan, tingginya biaya investasi awal, serta ketimpangan akses teknologi antara petani skala besar dan skala kecil. Kesenjangan digital (*digital divide*) ini berpotensi memperlebar disparitas ekonomi antarwilayah apabila tidak diimbangi dengan kebijakan afirmatif yang mendukung inklusivitas teknologi bagi petani kecil dan menengah.

Di Indonesia, pemerintah melalui Kementerian Pertanian telah menginisiasi berbagai program digitalisasi pertanian, antara lain pengembangan Kartu Tani, aplikasi informasi pasar, serta sistem pelaporan data pertanian berbasis digital yang terintegrasi dengan program Komando Strategi Pembangunan Pertanian (Kostratani) (Kementerian Pertanian RI, 2022). Inisiatif tersebut bertujuan untuk mempercepat penyebaran informasi, mempermudah akses petani terhadap sarana produksi, serta meningkatkan akurasi data produksi nasional sebagai dasar perumusan kebijakan ketahanan pangan yang lebih responsif dan berbasis bukti.

Tabel 5.1 Evolusi Paradigma Pertanian dari Era 1.0 hingga 5.0

Era	Periode Indikatif	Karakteristik Utama	Teknologi Kunci
Pertanian 1.0	Sebelum abad ke-20	Tenaga manual dan hewan, mengandalkan pengalaman turun-temurun	Alat tradisional, irigasi sederhana

Era	Periode Indikatif	Karakteristik Utama	Teknologi Kunci
Pertanian 2.0	Awal-pertengahan abad ke-20	Revolusi Hijau, mekanisasi, pemuliaan varietas unggul	Traktor, pupuk kimia, benih hibrida
Pertanian 3.0	Akhir abad ke-20	Otomatisasi parsial, penggunaan komputer dan GPS awal	GPS, komputer, mesin semi-otomatis
Pertanian 4.0	Awal abad ke-21	Digitalisasi menyeluruh, IoT, big data, AI	Sensor, *cloud computing, machine learning*
Pertanian 5.0	Masa kini dan masa depan	Kolaborasi manusia-mesin cerdas, keberlanjutan planet	Robotika kognitif, AI generatif, sistem otonom

Tabel di atas menunjukkan bahwa transformasi pertanian bersifat kumulatif dan tidak menggantikan sepenuhnya teknologi era sebelumnya, melainkan mengintegrasikannya ke dalam sistem yang lebih kompleks. Pemahaman terhadap tahapan evolusi ini penting bagi perumus kebijakan untuk menentukan strategi intervensi yang sesuai dengan tingkat kesiapan teknologi petani di suatu wilayah, mengingat pada praktiknya berbagai era teknologi tersebut masih berjalan berdampingan, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia.

1. Pilar Pendukung Transformasi Digital Pertanian

Transformasi digital pertanian bertumpu pada empat pilar yang saling berkaitan, yaitu konektivitas jaringan yang menjamin aliran data dari lahan ke pusat pengolahan, otomasi proses budi daya yang mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual, analitik data yang mengubah informasi mentah menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti, serta platform digital yang menjembatani interaksi antara petani, penyuluh, penyedia sarana produksi, dan pembeli hasil panen.

Abbasi, Martinez, dan Ahmad (2022) menekankan bahwa keempat pilar tersebut harus dibangun secara simultan karena kelemahan pada salah satu pilar, misalnya minimnya konektivitas, akan membatasi efektivitas pilar lainnya sekalipun teknologi analitik yang tersedia sudah sangat canggih.

Selain aspek teknis, dimensi kelembagaan turut memegang peranan penting dalam keberhasilan transformasi digital pertanian. Bahn, Yehya, dan Zurayk (2021) menggarisbawahi bahwa digitalisasi sistem pangan yang berkelanjutan memerlukan tata kelola kolaboratif antara pemerintah, sektor swasta, lembaga riset, dan komunitas petani agar manfaat teknologi tidak hanya dinikmati oleh segelintir pelaku usaha bermodal besar, melainkan dapat diakses secara inklusif oleh petani kecil yang menjadi tulang punggung produksi pangan nasional di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia.

2. Model Bisnis Baru dalam Ekosistem Pertanian Digital

Digitalisasi pertanian turut melahirkan model bisnis baru yang sebelumnya tidak dikenal dalam sistem pertanian konvensional, seperti platform pasar digital yang mempertemukan petani secara langsung dengan konsumen tanpa melalui rantai perantara yang panjang, layanan penyewaan alat mesin pertanian berbasis aplikasi, serta skema pembiayaan pertanian berbasis data (*agri-fintech*) yang memanfaatkan riwayat data produksi petani sebagai dasar penilaian kelayakan kredit. Model-model bisnis tersebut berpotensi meningkatkan efisiensi rantai nilai pertanian sekaligus membuka akses pembiayaan yang lebih inklusif bagi petani yang selama ini kesulitan memenuhi persyaratan agunan pada lembaga keuangan konvensional.

Perkembangan ekosistem digital pertanian juga mendorong tumbuhnya perusahaan rintisan (*startup*) di bidang teknologi pertanian atau *agritech* yang menawarkan berbagai solusi mulai dari aplikasi budi daya pintar hingga platform logistik hasil pertanian. Pertumbuhan sektor agritech di Indonesia menunjukkan tren yang positif dalam beberapa tahun terakhir, seiring dengan meningkatnya minat investor terhadap potensi pasar pertanian digital yang besar, mengingat sektor pertanian masih menyerap proporsi tenaga kerja yang signifikan dalam struktur perekonomian nasional dan menyimpan potensi efisiensi yang besar untuk dioptimalkan melalui intervensi teknologi.

3. Kesiapan Kelembagaan dan Sumber Daya Manusia

Kesiapan kelembagaan menjadi prasyarat mendasar sebelum teknologi digital diterapkan secara luas di lapangan. Penyuluh pertanian memiliki peran strategis sebagai penghubung antara inovasi teknologi dengan petani di lapangan, sehingga kapasitas mereka dalam memahami dan mendemonstrasikan teknologi digital perlu terus ditingkatkan melalui pelatihan berkelanjutan. Klerkx, Jakku, dan Labarthe (2019) menekankan bahwa keberhasilan difusi inovasi digital pertanian sangat bergantung pada kualitas sistem pengetahuan dan inovasi pertanian (*agricultural knowledge and innovation system*) yang menghubungkan berbagai aktor, termasuk peneliti, penyuluh, dan petani, dalam suatu jaringan pembelajaran kolektif yang dinamis.

Regenerasi petani muda yang melek teknologi digital menjadi tantangan sekaligus peluang penting bagi keberlanjutan transformasi digital pertanian jangka panjang. Fenomena penuaan populasi petani yang terjadi di banyak wilayah pedesaan Indonesia berpotensi menghambat adopsi teknologi apabila tidak diimbangi dengan upaya menarik minat generasi muda untuk terjun ke sektor pertanian melalui pendekatan yang lebih modern dan berbasis teknologi, seperti pengembangan konsep pertanian cerdas yang dikemas secara menarik dan relevan dengan preferensi generasi digital native saat ini.

4. Indikator Keberhasilan Transformasi Digital Pertanian

Pengukuran keberhasilan transformasi digital pertanian memerlukan indikator yang komprehensif, tidak hanya berfokus pada jumlah petani yang mengadopsi teknologi, tetapi juga mencakup dampak nyata terhadap produktivitas, pendapatan, dan keberlanjutan lingkungan. Indikator kuantitatif seperti tingkat penetrasi aplikasi digital pertanian, volume transaksi pada platform pasar digital, serta perubahan hasil panen sebelum dan sesudah adopsi teknologi perlu dilengkapi dengan indikator kualitatif, seperti tingkat kepuasan dan kepercayaan petani terhadap teknologi yang digunakan, guna memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai keberhasilan program transformasi digital pertanian secara menyeluruh.

Pemantauan dan evaluasi berkala terhadap program digitalisasi pertanian menjadi penting agar kebijakan dapat disesuaikan secara

adaptif berdasarkan bukti empiris dari lapangan, bukan sekadar mengandalkan asumsi awal perencanaan program. Basso dan Antle (2020) menekankan pentingnya pendekatan berbasis bukti (*evidence-based approach*) dalam merancang kebijakan pertanian digital, di mana data hasil pemantauan program yang telah berjalan digunakan untuk terus menyempurnakan strategi intervensi pada tahap pengembangan berikutnya secara berkelanjutan.

5. Peran Media Sosial dan Komunitas Digital Petani

Media sosial dan platform komunitas digital turut berperan dalam mempercepat transformasi digital pertanian melalui penyebaran informasi dan pertukaran pengalaman antarpetani secara horizontal, tanpa harus selalu bergantung pada jalur penyuluhan formal pemerintah. Kelompok diskusi daring yang dibentuk oleh sesama petani komoditas sejenis memungkinkan terjadinya pembelajaran kolektif mengenai praktik budi daya terbaik, termasuk berbagi pengalaman mengenai penggunaan teknologi digital tertentu, sehingga mempercepat proses difusi inovasi secara organik di kalangan komunitas petani yang memiliki kepercayaan tinggi terhadap sesama anggota kelompoknya.

Fenomena munculnya figur petani digital (*digital farmer influencer*) yang aktif berbagi konten edukatif mengenai praktik pertanian modern melalui platform video daring turut berkontribusi terhadap perubahan persepsi masyarakat, khususnya generasi muda, terhadap citra profesi petani yang sebelumnya cenderung dianggap kurang menarik. Perubahan persepsi ini penting untuk mendukung regenerasi petani dan menarik minat generasi muda terdidik untuk terjun ke sektor pertanian dengan pendekatan yang lebih modern dan berbasis teknologi digital.

6. Risiko dan Mitigasi Kesenjangan Digital di Pedesaan

Kesenjangan digital yang terjadi di wilayah pedesaan tidak hanya disebabkan oleh keterbatasan infrastruktur telekomunikasi, tetapi juga oleh faktor sosial ekonomi seperti tingkat pendidikan, usia, dan gender petani. Perempuan petani dan petani lanjut usia sering kali menghadapi hambatan tambahan dalam mengadopsi teknologi digital dibandingkan kelompok petani muda laki-laki, sehingga strategi intervensi digitalisasi pertanian perlu dirancang secara inklusif dengan mempertimbangkan

kebutuhan dan tantangan spesifik dari berbagai kelompok petani yang beragam karakteristik demografisnya.

Upaya mitigasi kesenjangan digital dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan, seperti penyediaan pusat layanan digital bersama di tingkat desa yang dapat diakses oleh petani yang belum memiliki perangkat pribadi, pelatihan literasi digital yang disesuaikan dengan tingkat kemampuan awal peserta, serta pengembangan antarmuka aplikasi yang mendukung perintah suara dalam bahasa daerah bagi petani dengan keterbatasan kemampuan membaca. Pendekatan yang inklusif dan kontekstual ini penting untuk memastikan bahwa manfaat transformasi digital pertanian dapat dinikmati secara merata oleh seluruh lapisan masyarakat petani Indonesia.

7. Sinergi Transformasi Digital dengan Target Pembangunan Berkelanjutan

Transformasi digital pertanian memiliki keterkaitan erat dengan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*/SDGs), khususnya tujuan kedua mengenai tanpa kelaparan dan tujuan kedua belas mengenai konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab. Efisiensi penggunaan sumber daya yang dihasilkan melalui digitalisasi pertanian berkontribusi langsung terhadap pengurangan kehilangan pangan pascapanen dan optimalisasi penggunaan lahan produktif, sehingga mendukung pencapaian target ketahanan pangan global yang telah disepakati bersama oleh negara-negara anggota Perserikatan Bangsa-Bangsa dalam kerangka agenda pembangunan berkelanjutan.

Pengintegrasian indikator keberlanjutan ke dalam kerangka evaluasi program digitalisasi pertanian nasional menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa kemajuan teknologi yang dicapai benar-benar sejalan dengan komitmen Indonesia terhadap agenda pembangunan berkelanjutan global, bukan sekadar peningkatan produktivitas semata tanpa mempertimbangkan aspek keberlanjutan lingkungan dan keadilan sosial dalam distribusi manfaat teknologi bagi seluruh lapisan masyarakat petani.

B. *Internet of Things* (IoT) dalam Pertanian

Internet of Things (IoT) merupakan jaringan perangkat fisik yang dilengkapi sensor, perangkat lunak, dan konektivitas untuk mengumpulkan serta bertukar data secara otomatis tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung. Dalam konteks pertanian, Friha, Ferrag, Shu, Maglaras, dan Wang (2021) menjelaskan bahwa IoT berfungsi sebagai tulang punggung infrastruktur pertanian cerdas karena mampu menyediakan data lingkungan dan agronomis secara real-time yang menjadi dasar pengambilan keputusan yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional yang bersifat estimatif dan berbasis pengalaman semata.

Arsitektur IoT pertanian umumnya terdiri atas empat lapisan fungsional, yaitu lapisan persepsi (*perception layer*) yang berisi sensor dan aktuator, lapisan jaringan (*network layer*) yang bertanggung jawab atas transmisi data, lapisan pengolahan data (*data processing layer*) yang melakukan analitik, serta lapisan aplikasi (*application layer*) yang menyajikan informasi kepada pengguna akhir dalam bentuk dasbor atau notifikasi (Yang *et al*., 2021). Struktur berlapis ini memungkinkan skalabilitas sistem serta interoperabilitas antarperangkat dari berbagai produsen, meskipun tantangan standardisasi protokol komunikasi masih menjadi isu yang perlu diselesaikan bersama oleh para pemangku kepentingan industri teknologi pertanian.

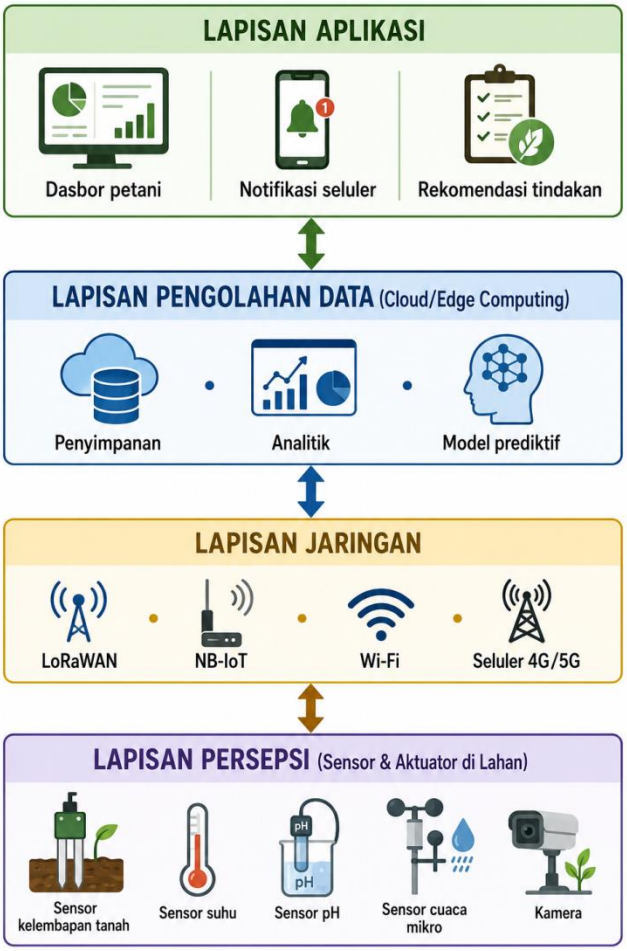
Berbagai jenis sensor telah dikembangkan untuk mendukung pemantauan kondisi lahan pertanian secara presisi, meliputi sensor kelembapan tanah (*soil moisture sensor*), sensor suhu dan kelembapan udara, sensor intensitas cahaya, sensor pH tanah, serta stasiun cuaca mikro yang mengukur curah hujan dan kecepatan angin. Data yang dihasilkan oleh sensor-sensor tersebut dikirimkan melalui jaringan komunikasi nirkabel berdaya rendah seperti *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), *LoRaWAN*, maupun *Narrowband IoT* (NB-IoT) yang dirancang khusus untuk mendukung transmisi data jarak jauh dengan konsumsi energi minimal, sehingga sesuai dengan karakteristik lahan pertanian yang luas dan sering kali minim infrastruktur listrik (Friha *et al*., 2021).

Penerapan IoT dalam pertanian memberikan manfaat nyata pada berbagai aspek operasional, di antaranya sistem irigasi cerdas (*smart*

irrigation) yang mengaktifkan pompa air secara otomatis berdasarkan tingkat kelembapan tanah aktual, pemantauan rumah kaca (*greenhouse monitoring*) yang mengendalikan suhu dan kelembapan secara otomatis, serta pelacakan ternak (*livestock tracking*) menggunakan kalung sensor untuk memantau kesehatan dan lokasi hewan secara berkelanjutan. Sott, Furstenau, Kipper, dan kolega (2020) mencatat bahwa penerapan sistem IoT pada sektor perkebunan kopi mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air irigasi secara signifikan sekaligus menjaga kualitas hasil panen melalui pemantauan kondisi mikroklimat yang lebih terkendali.

Meskipun demikian, implementasi IoT di lapangan masih dihadapkan pada sejumlah tantangan teknis dan ekonomis, antara lain keterbatasan daya baterai perangkat sensor yang beroperasi di lokasi terpencil, tingginya biaya investasi awal bagi petani skala kecil, permasalahan interoperabilitas antarplatform, serta kerentanan terhadap ancaman keamanan siber yang dapat mengganggu integritas data pertanian. Yang dan kolega (2021) menekankan pentingnya pengembangan protokol keamanan yang ringan (*lightweight security protocol*) agar sesuai dengan kapasitas komputasi perangkat IoT yang terbatas tanpa mengorbankan aspek keandalan sistem secara keseluruhan.

Gambar 5.1 Skema Arsitektur Empat Lapis Sistem IoT Pertanian



Gambar di atas menggambarkan alur data mulai dari titik pengambilan data di lahan hingga tersaji sebagai informasi yang dapat ditindaklanjuti oleh petani. Setiap lapisan memiliki fungsi yang saling bergantung satu sama lain, sehingga kegagalan pada salah satu lapisan, misalnya gangguan konektivitas jaringan, dapat menghambat keseluruhan proses pengambilan keputusan berbasis data secara real-time.

Tabel 5.2 Jenis Sensor IoT dan Fungsinya dalam Pertanian Presisi

Jenis Sensor	Parameter yang Diukur	Manfaat Agronomis
Sensor kelembapan tanah	Kadar air volumetrik tanah	Menentukan jadwal dan volume irigasi secara presisi
Sensor suhu dan kelembapan udara	Suhu lingkungan, kelembapan relatif	Mengendalikan iklim mikro rumah kaca
Sensor pH tanah	Tingkat keasaman tanah	Menentukan kebutuhan kapur dan jenis pupuk
Sensor intensitas cahaya	Radiasi fotosintesis aktif (PAR)	Mengoptimalkan pencahayaan tanaman dalam ruangan
Stasiun cuaca mikro	Curah hujan, kecepatan angin, suhu	Mendukung peringatan dini risiko iklim

1. Protokol Komunikasi dalam Jaringan IoT Pertanian

Pemilihan protokol komunikasi yang tepat merupakan faktor krusial dalam desain sistem IoT pertanian karena berkaitan langsung dengan jangkauan, konsumsi energi, dan kapasitas transmisi data. Quy, Van Hau, Anh, dan kolega (2022) menjelaskan bahwa protokol *LoRaWAN* menjadi pilihan populer untuk aplikasi pertanian karena mampu menjangkau jarak hingga belasan kilometer pada area terbuka dengan konsumsi daya yang sangat rendah, sehingga sesuai untuk perangkat sensor yang mengandalkan baterai dan panel surya berkapasitas kecil di lahan pertanian yang luas dan jauh dari sumber listrik permanen.

Selain LoRaWAN, protokol *Narrowband IoT* (NB-IoT) yang beroperasi pada jaringan seluler turut menjadi alternatif yang menjanjikan, terutama pada wilayah yang telah memiliki cakupan jaringan telekomunikasi seluler yang memadai. Kelebihan NB-IoT terletak pada kemampuannya menembus penetrasi sinyal yang lebih baik pada kondisi geografis yang menantang, seperti daerah berbukit atau lahan pertanian yang dikelilingi vegetasi lebat, meskipun konsumsi

dayanya relatif lebih tinggi dibandingkan LoRaWAN sehingga memerlukan pertimbangan matang terkait siklus penggantian atau pengisian ulang daya baterai perangkat sensor di lapangan.

2. Studi Kasus Penerapan IoT pada Berbagai Komoditas

Penerapan IoT pada budi daya tanaman pangan seperti padi umumnya difokuskan pada pemantauan ketinggian air sawah untuk mendukung teknik irigasi berselang yang terbukti mampu menghemat penggunaan air secara signifikan sekaligus menekan emisi metana dari lahan tergenang. Sementara itu, pada komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi seperti cabai dan tomat, sistem IoT umumnya diintegrasikan dengan sistem irigasi tetes otomatis yang mengatur volume air berdasarkan data kelembapan tanah real-time, sehingga mampu menjaga kondisi optimal pertumbuhan tanaman sepanjang siklus produksi tanpa memerlukan pemantauan manual yang intensif oleh petani.

Pada sektor peternakan, penerapan IoT berkembang melalui teknologi kalung pintar (*smart collar*) yang dilengkapi sensor untuk memantau suhu tubuh, aktivitas gerak, dan lokasi ternak secara real-time, memungkinkan peternak mendeteksi tanda-tanda awal penyakit atau gangguan kesehatan ternak sebelum kondisinya memburuk. Quy dan kolega (2022) mencatat bahwa integrasi data kesehatan ternak berbasis IoT dengan sistem analitik prediktif mampu meningkatkan efisiensi manajemen kesehatan hewan ternak secara signifikan, sekaligus menekan kerugian ekonomi akibat kematian ternak yang dapat dicegah melalui deteksi dini.

3. Keamanan Siber pada Infrastruktur IoT Pertanian

Seiring meningkatnya jumlah perangkat IoT yang terhubung dalam sistem pertanian, ancaman keamanan siber turut menjadi perhatian serius yang tidak dapat diabaikan. Yang dan kolega (2021) mengidentifikasi berbagai potensi kerentanan pada sistem IoT pertanian, termasuk serangan penyusupan data (*data injection attack*) yang dapat memanipulasi pembacaan sensor sehingga menghasilkan rekomendasi keliru, serta serangan penolakan layanan (*denial of service*) yang dapat melumpuhkan komunikasi antarperangkat dalam jaringan sensor,

sehingga berpotensi mengganggu operasional sistem irigasi atau pemantauan lahan secara keseluruhan pada waktu-waktu kritis.

Upaya mitigasi risiko keamanan siber pada sistem IoT pertanian memerlukan pendekatan berlapis, mulai dari enkripsi data pada level perangkat, autentikasi yang kuat pada setiap titik akses jaringan, hingga pembaruan perangkat lunak secara berkala untuk menutup celah kerentanan yang ditemukan. Mengingat keterbatasan kapasitas komputasi perangkat sensor berukuran kecil, pengembangan protokol keamanan ringan (*lightweight cryptography*) menjadi arah penelitian yang terus berkembang guna menyeimbangkan kebutuhan keamanan dengan keterbatasan sumber daya perangkat IoT yang beroperasi di lingkungan pertanian terbuka dan sering kali minim pengawasan fisik langsung.

4. Manajemen Daya pada Perangkat Sensor Lapangan

Keterbatasan sumber daya energi menjadi tantangan teknis yang signifikan dalam operasional jangka panjang perangkat sensor IoT di lahan pertanian, mengingat sebagian besar lokasi pertanian tidak memiliki akses jaringan listrik permanen. Solusi umum yang diterapkan meliputi penggunaan panel surya berkapasitas kecil yang dikombinasikan dengan baterai penyimpan energi, serta penerapan mode hemat daya (*sleep mode*) pada perangkat sensor yang hanya aktif mengirimkan data pada interval waktu tertentu, sehingga mampu memperpanjang usia operasional perangkat tanpa memerlukan penggantian baterai secara terlalu sering yang dapat menambah beban biaya pemeliharaan sistem.

Inovasi dalam desain sirkuit elektronik berdaya rendah (*low-power circuit design*) terus dikembangkan oleh produsen perangkat IoT pertanian untuk mengurangi konsumsi energi tanpa mengorbankan akurasi dan frekuensi pengambilan data yang diperlukan. Pengembangan teknologi pemanenan energi (*energy harvesting*) dari sumber alternatif, seperti getaran mekanis atau perbedaan suhu lingkungan, juga mulai dieksplorasi sebagai solusi jangka panjang untuk mengatasi keterbatasan daya pada perangkat sensor yang beroperasi di lokasi terpencil dan sulit dijangkau untuk pemeliharaan rutin secara berkala.

5. Prospek Pengembangan IoT Pertanian di Indonesia

Prospek pengembangan IoT pertanian di Indonesia semakin terbuka seiring dengan perluasan jaringan telekomunikasi seluler generasi keempat dan kelima ke wilayah pedesaan, serta penurunan harga perangkat sensor akibat skala ekonomi produksi yang semakin besar di tingkat global. Pengembangan produk sensor IoT pertanian buatan dalam negeri juga mulai bermunculan, menawarkan alternatif dengan harga yang lebih terjangkau dan disesuaikan dengan karakteristik komoditas dan kondisi agroklimat spesifik Indonesia dibandingkan produk impor yang umumnya dirancang untuk konteks pertanian negara maju dengan skala lahan yang jauh lebih luas.

Kolaborasi antara perguruan tinggi, lembaga riset pemerintah, dan industri teknologi dalam negeri menjadi kunci penting untuk mengembangkan solusi IoT pertanian yang benar-benar sesuai dengan kebutuhan spesifik petani Indonesia, baik dari sisi keterjangkauan harga maupun kesesuaian teknis dengan kondisi lapangan yang beragam. Dukungan kebijakan pemerintah melalui insentif riset dan pengembangan produk teknologi pertanian lokal diharapkan mampu mempercepat kemandirian teknologi IoT pertanian nasional dalam jangka panjang, mengurangi ketergantungan terhadap produk impor yang sering kali kurang sesuai dengan kondisi spesifik lapangan di Indonesia.

6. Pemeliharaan Ekosistem dan Instalasi Sensor Ramah Lingkungan

Instalasi jaringan sensor IoT di lahan pertanian perlu mempertimbangkan prinsip minimalisasi gangguan terhadap ekosistem lahan, termasuk penggunaan material perangkat yang tahan lama dan dapat didaur ulang guna mengurangi limbah elektronik yang berpotensi mencemari lingkungan pertanian dalam jangka panjang apabila perangkat sensor yang telah rusak tidak dikelola dengan baik pascapakai. Desain perangkat yang mempertimbangkan siklus hidup produk secara menyeluruh, mulai dari produksi hingga pembuangan, menjadi semakin penting seiring meningkatnya skala penerapan IoT di sektor pertanian secara luas.

Pengembangan kebijakan pengelolaan limbah elektronik pertanian yang mencakup mekanisme pengumpulan dan daur ulang

perangkat sensor yang telah rusak atau tidak terpakai perlu mulai dipertimbangkan oleh pemangku kepentingan industri teknologi pertanian, guna memastikan bahwa manfaat efisiensi yang dihasilkan oleh teknologi IoT tidak diimbangi oleh dampak lingkungan negatif dari akumulasi limbah elektronik yang tidak terkelola dengan baik di kawasan pertanian pedesaan.

C. Artificial Intelligence (AI) dan Machine Learning

Kecerdasan buatan (*artificial intelligence*/AI) dan pembelajaran mesin (*machine learning*/ML) merupakan cabang ilmu komputer yang memungkinkan sistem untuk belajar dari data historis guna menghasilkan prediksi atau keputusan tanpa diprogram secara eksplisit untuk setiap skenario. Javaid, Haleem, Singh, dan Suman (2022) menjelaskan bahwa penerapan AI dalam sektor pertanian mencakup berbagai domain, mulai dari deteksi penyakit tanaman, prediksi hasil panen, optimalisasi penggunaan air dan pupuk, hingga sistem pendukung keputusan bagi petani dalam menentukan waktu tanam dan panen yang paling optimal berdasarkan kondisi agroklimat setempat.

Salah satu aplikasi AI yang berkembang pesat adalah penggunaan *computer vision* berbasis *deep learning* untuk mendeteksi gejala penyakit dan hama pada tanaman melalui analisis citra daun secara otomatis. Sharma, Jain, Gupta, dan Chowdary (2021) melakukan tinjauan komprehensif terhadap berbagai algoritma pembelajaran mesin yang diterapkan dalam pertanian presisi dan menemukan bahwa model *Convolutional Neural Network* (CNN) menunjukkan akurasi yang tinggi dalam klasifikasi citra penyakit tanaman, sehingga memungkinkan deteksi dini yang dapat mencegah penyebaran penyakit secara lebih luas dan menekan kerugian ekonomi petani secara signifikan.

Selain deteksi penyakit, AI juga dimanfaatkan secara luas untuk prediksi hasil panen (*yield prediction*) dengan menganalisis kombinasi data historis produksi, data cuaca, karakteristik tanah, serta citra satelit. Model prediktif ini membantu petani dan pemangku kebijakan dalam merencanakan strategi produksi, distribusi, dan cadangan pangan secara lebih akurat. Rejeb *et al.,* (2022) menegaskan bahwa integrasi AI dalam industri *agrifood* tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga membuka peluang inovasi model bisnis baru, seperti pertanian

sebagai layanan (*farming-as-a-service*) yang memungkinkan petani kecil mengakses teknologi canggih tanpa harus memiliki infrastruktur secara mandiri.

Penerapan AI dalam manajemen hama terpadu juga menunjukkan hasil yang menjanjikan. Balaska, Adamidou, Vryzas, dan Gasteratos (2023) mengulas bagaimana kombinasi robotika dan AI dapat digunakan untuk mendeteksi keberadaan hama secara dini serta melakukan aplikasi pestisida secara tepat sasaran, sehingga secara signifikan mengurangi volume penggunaan bahan kimia dibandingkan metode penyemprotan konvensional yang bersifat menyeluruh. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip pertanian berkelanjutan yang menekankan minimalisasi dampak lingkungan tanpa mengorbankan efektivitas pengendalian organisme pengganggu tanaman.

Sekalipun potensi AI dalam pertanian sangat besar, penerapannya masih menghadapi sejumlah tantangan mendasar. Sharma dan kolega (2021) mengidentifikasi bahwa kualitas dan kuantitas data pelatihan yang terbatas, terutama untuk komoditas lokal spesifik, menjadi kendala utama dalam membangun model AI yang akurat dan dapat digeneralisasi. Selain itu, isu interpretabilitas model (*model interpretability*) juga menjadi perhatian karena petani dan penyuluh pertanian memerlukan pemahaman yang jelas mengenai dasar rekomendasi yang diberikan oleh sistem AI agar kepercayaan terhadap teknologi tersebut dapat terbangun secara bertahap dan berkelanjutan.

Tabel 5.3 Algoritma *Machine Learning* yang Umum Digunakan dalam Pertanian Presisi

Algoritma	Kategori	Contoh Aplikasi Pertanian
Random Forest	Pembelajaran terawasi	Prediksi hasil panen berdasarkan data iklim dan tanah
Convolutional Neural Network (CNN)	Pembelajaran mendalam	Klasifikasi citra penyakit dan hama pada daun tanaman
Support Vector Machine (SVM)	Pembelajaran terawasi	Klasifikasi jenis tanah dan tingkat kesuburan

Algoritma	Kategori	Contoh Aplikasi Pertanian
K-Means Clustering	Pembelajaran tak terawasi	Segmentasi zona manajemen lahan berdasarkan kesamaan karakteristik
Recurrent Neural Network (RNN/LSTM)	Pembelajaran mendalam	Peramalan data deret waktu seperti curah hujan dan harga komoditas

Pemilihan algoritma dalam praktik pertanian presisi sangat bergantung pada karakteristik data yang tersedia serta tujuan analisis yang hendak dicapai. Model berbasis pembelajaran mendalam umumnya memerlukan volume data yang besar untuk mencapai akurasi optimal, sementara algoritma klasik seperti *Random Forest* dan SVM tetap relevan digunakan pada kondisi ketersediaan data yang lebih terbatas, sebagaimana umum dijumpai pada konteks pertanian skala kecil di negara berkembang.

1. Tahapan Pengembangan Model AI untuk Pertanian

Pengembangan model kecerdasan buatan untuk aplikasi pertanian umumnya melalui beberapa tahapan sistematis, dimulai dari pengumpulan dan pelabelan data (*data labeling*), praproses data untuk membersihkan *noise* dan data yang tidak relevan, pelatihan model menggunakan algoritma yang sesuai dengan karakteristik permasalahan, validasi model menggunakan data uji yang terpisah dari data pelatihan, hingga penerapan model dalam sistem produksi yang dapat diakses oleh pengguna akhir. Javaid, Haleem, Singh, dan Suman (2022) menekankan bahwa tahap pengumpulan data lapangan yang representatif merupakan tahapan paling menantang dalam konteks pertanian negara berkembang, mengingat keterbatasan infrastruktur pengumpulan data yang terstandardisasi di banyak wilayah pedesaan.

Kualitas data pelatihan menjadi determinan utama akurasi model AI yang dihasilkan, sehingga diperlukan strategi pengumpulan data yang cermat, termasuk variasi kondisi pencahayaan, sudut pengambilan citra, dan tahap pertumbuhan tanaman yang berbeda-beda agar model mampu melakukan generalisasi dengan baik pada kondisi lapangan yang beragam. Sharma, Jain, Gupta, dan Chowdary (2021) menyarankan

penerapan teknik augmentasi data (*data augmentation*) sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan jumlah data pelatihan, khususnya untuk komoditas lokal yang belum banyak tersedia dalam basis data publik internasional yang umumnya didominasi oleh komoditas pertanian negara maju.

2. Aplikasi AI dalam Optimalisasi Rantai Pasok Pertanian

Penerapan kecerdasan buatan tidak terbatas pada tahap budi daya di lahan, melainkan juga meluas hingga optimalisasi rantai pasok pertanian secara keseluruhan, termasuk peramalan permintaan pasar, optimalisasi rute distribusi, dan manajemen persediaan hasil pertanian yang bersifat mudah rusak (*perishable*). Sharma, Kamble, Gunasekaran, Kumar, dan Kumar (2020) mengulas berbagai penerapan pembelajaran mesin dalam manajemen rantai pasok pertanian dan menemukan bahwa model prediktif berbasis AI mampu mengurangi kerugian pascapanen secara signifikan melalui perencanaan distribusi yang lebih akurat dan responsif terhadap fluktuasi permintaan pasar.

Pada aspek pemasaran, sistem rekomendasi berbasis AI juga dimanfaatkan untuk mencocokkan hasil produksi petani dengan preferensi pasar secara lebih efisien, termasuk memberikan rekomendasi harga jual yang kompetitif berdasarkan analisis tren pasar historis. Rejeb, Rejeb, Zailani, Keogh, dan Appolloni (2022) menegaskan bahwa integrasi AI dalam sistem informasi pasar pertanian berpotensi mengurangi asimetri informasi antara petani dan pembeli, yang selama ini kerap menjadi salah satu penyebab utama rendahnya posisi tawar petani dalam negosiasi harga hasil panen.

3. Etika dan Tanggung Jawab Penggunaan AI dalam Pertanian

Penerapan AI dalam pertanian juga menimbulkan pertanyaan etis yang perlu mendapat perhatian, termasuk isu kepemilikan dan privasi data petani yang dikumpulkan oleh berbagai platform teknologi, potensi bias algoritma yang dapat menghasilkan rekomendasi kurang akurat bagi kondisi spesifik lokal yang tidak terwakili secara memadai dalam data pelatihan, serta risiko ketergantungan berlebihan petani terhadap rekomendasi sistem tanpa mempertimbangkan kearifan lokal yang telah teruji selama bertahun-tahun dalam menghadapi kondisi agroklimat setempat yang unik dan spesifik.

Rejeb dan kolega (2022) menyerukan pentingnya kerangka tata kelola AI yang bertanggung jawab dalam sektor pertanian, yang mencakup transparansi algoritma, perlindungan data petani, serta mekanisme akuntabilitas ketika rekomendasi sistem AI menghasilkan kerugian bagi petani. Pengembangan kerangka etika ini menjadi semakin mendesak seiring meningkatnya adopsi teknologi AI dalam pengambilan keputusan pertanian yang berdampak langsung terhadap mata pencaharian jutaan petani kecil di berbagai belahan dunia, termasuk Indonesia yang tengah gencar mendorong digitalisasi sektor pertanian nasional.

4. *Deep Learning* untuk Segmentasi dan Deteksi Objek Pertanian

Teknik pembelajaran mendalam yang lebih canggih, seperti segmentasi semantik (*semantic segmentation*) dan deteksi objek (*object detection*), memungkinkan analisis citra pertanian yang lebih presisi dibandingkan klasifikasi citra sederhana. Segmentasi semantik memungkinkan identifikasi batas-batas objek secara piksel demi piksel, seperti membedakan area tanaman sehat, tanaman terserang penyakit, dan area tanah kosong dalam satu citra secara simultan, memberikan informasi yang jauh lebih detail dibandingkan sekadar klasifikasi citra secara keseluruhan yang hanya memberikan satu label untuk seluruh gambar.

Penerapan model deteksi objek seperti arsitektur *You Only Look Once* (YOLO) telah banyak digunakan dalam penghitungan otomatis jumlah buah pada tanaman untuk keperluan estimasi hasil panen, serta deteksi individu hama tertentu pada perangkap yang dipantau menggunakan kamera. Javaid, Haleem, Singh, dan Suman (2022) mencatat bahwa kecepatan pemrosesan model deteksi objek modern memungkinkan penerapan secara real-time pada perangkat dengan kapasitas komputasi terbatas, membuka peluang implementasi pada perangkat robotika dan *drone* pertanian yang memerlukan pengambilan keputusan cepat di lapangan.

5. Kolaborasi Riset AI Pertanian antara Akademisi dan Industri

Percepatan pengembangan model AI pertanian yang akurat dan relevan dengan konteks lokal memerlukan kolaborasi erat antara akademisi yang memiliki keahlian metodologis dalam pengembangan

algoritma, dengan industri dan pemerintah yang memiliki akses terhadap data lapangan dalam skala besar. Kemitraan riset semacam ini memungkinkan validasi model AI pada kondisi lapangan yang nyata dan beragam, sehingga hasil penelitian tidak hanya berhenti pada tahap publikasi ilmiah, melainkan dapat diterjemahkan menjadi solusi teknologi yang benar-benar diterapkan dan memberikan manfaat nyata bagi petani di lapangan.

Pengembangan pusat unggulan riset kecerdasan buatan untuk pertanian di berbagai perguruan tinggi Indonesia berpotensi mempercepat inovasi teknologi AI yang disesuaikan dengan komoditas dan kondisi agroklimat lokal, yang selama ini masih kurang mendapat perhatian dibandingkan riset AI untuk komoditas pertanian negara maju yang lebih banyak tersedia dalam literatur internasional. Investasi pemerintah dalam mendukung riset AI pertanian lokal menjadi strategi penting untuk membangun kemandirian teknologi dan mengurangi kesenjangan pengetahuan dengan negara-negara yang telah lebih maju dalam penerapan AI di sektor pertanian.

6. *Benchmark* Kinerja Model AI Pertanian secara Internasional

Pembandingan kinerja (*benchmarking*) model AI pertanian Indonesia dengan standar internasional menjadi penting untuk mengukur tingkat kematangan teknologi yang telah dikembangkan secara lokal, sekaligus mengidentifikasi kesenjangan yang perlu ditutup melalui investasi riset lebih lanjut. Partisipasi dalam kompetisi ilmiah internasional di bidang AI pertanian dan publikasi pada jurnal bereputasi dapat menjadi salah satu indikator kemajuan riset AI pertanian Indonesia dalam kancah global, sekaligus membuka peluang kolaborasi dengan peneliti dari berbagai negara yang memiliki keahlian komplementer di bidang ini.

Javaid, Haleem, Singh, dan Suman (2022) menekankan bahwa kemajuan riset AI pertanian tidak dapat dilepaskan dari ketersediaan basis data terbuka berkualitas tinggi yang dapat digunakan bersama oleh komunitas peneliti global, sehingga pengembangan basis data citra dan data agronomis spesifik komoditas tropis Indonesia yang dibagikan secara terbuka berpotensi memberikan kontribusi signifikan terhadap kemajuan riset AI pertanian tidak hanya di tingkat nasional, tetapi juga di tingkat regional dan internasional.

D. Big Data dan Decision Support System

Big data dalam konteks pertanian merujuk pada kumpulan data berukuran sangat besar dan beragam yang dihasilkan dari berbagai sumber, seperti sensor lahan, citra satelit, data cuaca, data pasar, hingga catatan transaksi petani. Karakteristik big data umumnya dijelaskan melalui konsep 5V, yaitu *volume* (jumlah data yang masif), *velocity* (kecepatan data dihasilkan), *variety* (keragaman jenis dan format data), *veracity* (tingkat keakuratan dan keandalan data), serta *value* (nilai manfaat yang dapat diekstraksi dari data). Rejeb *et al* (2022) menegaskan bahwa nilai strategis big data terletak bukan pada volumenya semata, melainkan pada kemampuan sistem analitik mengubah data mentah menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti secara operasional.

Sumber data pertanian sangat beragam dan tersebar, meliputi data agronomis dari sensor lapangan, data spasial dari citra penginderaan jauh, data meteorologis dari stasiun cuaca, data pasar mengenai fluktuasi harga komoditas, serta data sosial ekonomi petani yang dikumpulkan melalui survei maupun aplikasi digital. Integrasi berbagai sumber data yang heterogen tersebut memerlukan infrastruktur penyimpanan dan pengolahan data yang andal, seperti komputasi awan (*cloud computing*) dan komputasi tepi (*edge computing*), agar analisis dapat dilakukan secara efisien tanpa mengorbankan kecepatan respons sistem terhadap kondisi lapangan yang dinamis.

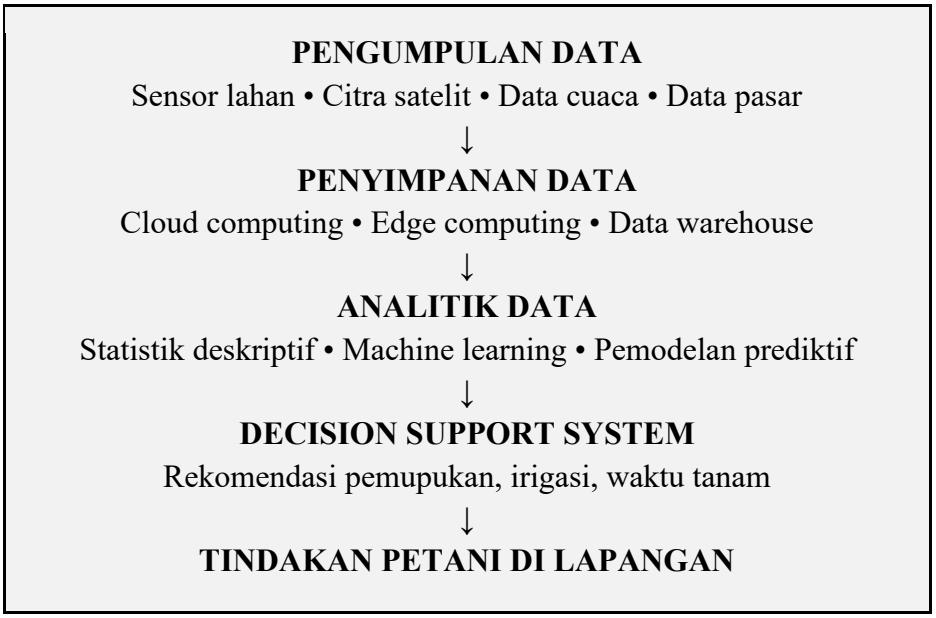
Sistem Pendukung Keputusan atau *Decision Support System* (DSS) merupakan perangkat lunak yang mengolah data dan menyajikan rekomendasi tindakan bagi pengguna dalam menghadapi permasalahan yang kompleks dan tidak terstruktur. Dalam konteks pertanian, DSS memanfaatkan data historis dan real-time untuk menghasilkan rekomendasi terkait waktu tanam optimal, dosis pemupukan, jadwal irigasi, hingga prediksi risiko serangan hama dan penyakit. Shepherd, Turner, Small, dan Wheeler (2020) menekankan bahwa efektivitas DSS sangat bergantung pada kualitas antarmuka pengguna yang ramah dan mudah dipahami oleh petani, mengingat kompleksitas algoritma di balik sistem tersebut tidak boleh menjadi penghalang bagi kemudahan penggunaan di lapangan.

Penerapan DSS berbasis big data telah terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan input produksi secara signifikan.

Sebagai contoh, sistem rekomendasi pemupukan berbasis data uji tanah dan kebutuhan spesifik tanaman dapat mengurangi pemborosan pupuk hingga mencegah pencemaran lingkungan akibat aplikasi yang berlebihan. Demikian pula, sistem peringatan dini berbasis data cuaca dan citra satelit memungkinkan petani mengambil langkah antisipatif terhadap potensi kekeringan atau banjir sebelum dampaknya merugikan produksi secara luas.

Namun demikian, tantangan integrasi data lintas sumber masih menjadi kendala signifikan dalam pengembangan DSS yang komprehensif. Perbedaan format data, standar pengukuran, serta kurangnya interoperabilitas antarplatform milik berbagai lembaga pemerintah dan swasta menyebabkan fragmentasi data yang menghambat analisis terpadu. Basso dan Antle (2020) menyoroti pentingnya tata kelola data (*data governance*) yang jelas, termasuk aspek kepemilikan data petani dan perlindungan privasi, agar ekosistem big data pertanian dapat berkembang secara berkelanjutan dan memberikan manfaat yang adil bagi seluruh pemangku kepentingan.

Gambar 5.2 Alur Transformasi Data Menjadi Keputusan Pertanian



Alur di atas menegaskan bahwa nilai big data baru dapat terwujud apabila seluruh tahapan, mulai dari pengumpulan hingga penerapan keputusan di lapangan, berjalan secara terintegrasi. Kegagalan pada

salah satu tahapan, misalnya kualitas data yang buruk pada tahap pengumpulan, akan berdampak pada rendahnya akurasi rekomendasi yang dihasilkan oleh sistem pendukung keputusan.

1. Infrastruktur Komputasi untuk Pengolahan *Big Data* Pertanian

Pengolahan *big data* pertanian yang bervolume besar dan beragam memerlukan dukungan infrastruktur komputasi yang memadai, baik melalui komputasi awan (*cloud computing*) yang menyediakan sumber daya komputasi elastis sesuai kebutuhan, maupun komputasi tepi (*edge computing*) yang memproses data langsung di dekat sumbernya guna mengurangi latensi dan beban jaringan. Basso dan Antle (2020) menjelaskan bahwa kombinasi arsitektur *cloud-edge* menjadi pendekatan yang semakin diminati dalam sistem pertanian digital karena mampu menyeimbangkan kebutuhan pemrosesan data secara cepat di lapangan dengan kebutuhan analisis mendalam yang memerlukan kapasitas komputasi lebih besar pada pusat data.

Penerapan komputasi tepi menjadi sangat relevan pada konteks pertanian di wilayah dengan konektivitas internet yang belum stabil, seperti banyak dijumpai di wilayah pedesaan Indonesia, karena memungkinkan pemrosesan data awal dilakukan secara lokal tanpa harus selalu terhubung dengan pusat data di awan. Pendekatan ini memastikan sistem tetap dapat berfungsi dan memberikan rekomendasi dasar kepada petani meskipun terjadi gangguan konektivitas sementara, sebelum data hasil olahan dikirimkan secara penuh ke pusat data ketika koneksi jaringan kembali tersedia secara stabil.

2. Visualisasi Data dan Antarmuka Pengguna DSS

Efektivitas *Decision Support System* sangat ditentukan oleh kualitas visualisasi data dan desain antarmuka pengguna yang mampu menyajikan informasi kompleks secara sederhana dan mudah dipahami oleh petani dengan latar belakang literasi digital yang beragam. Shepherd, Turner, Small, dan Wheeler (2020) menekankan bahwa penggunaan simbol visual, kode warna, dan bahasa lokal dalam antarmuka aplikasi DSS terbukti meningkatkan tingkat adopsi dan kepercayaan petani terhadap rekomendasi sistem, dibandingkan dengan antarmuka yang menyajikan data mentah dalam bentuk angka dan istilah teknis yang sulit dipahami oleh pengguna awam di lapangan.

Desain antarmuka yang ramah pengguna (*user-friendly*) juga perlu mempertimbangkan keterbatasan perangkat yang umum dimiliki petani, seperti telepon pintar dengan spesifikasi menengah ke bawah dan koneksi internet yang tidak selalu stabil. Oleh karena itu, pengembangan aplikasi DSS pertanian di Indonesia perlu mengadopsi prinsip desain yang ringan, responsif terhadap kondisi jaringan lambat, serta mendukung mode luring (*offline mode*) yang memungkinkan petani tetap mengakses informasi dasar meskipun sedang berada di lokasi tanpa sinyal internet yang memadai.

3. Studi Kasus Penerapan DSS pada Komoditas Strategis

Berbagai studi kasus penerapan DSS pada komoditas strategis menunjukkan manfaat nyata dalam meningkatkan efisiensi produksi. Pada komoditas kopi misalnya, sistem DSS yang mengintegrasikan data curah hujan, suhu, dan riwayat produksi mampu memberikan rekomendasi waktu pemangkasan dan pemupukan yang optimal, sehingga membantu petani meningkatkan kualitas dan konsistensi hasil panen dari musim ke musim. Sott, Furstenau, Kipper, dan kolega (2020) mencatat bahwa penerapan DSS pada sektor kopi berkontribusi terhadap peningkatan keberlanjutan produksi melalui pengambilan keputusan yang lebih terinformasi mengenai waktu dan dosis aplikasi input produksi.

Pada komoditas padi, sistem DSS dikembangkan untuk membantu petani menentukan waktu tanam optimal berdasarkan prediksi curah hujan musiman, sehingga dapat menghindari risiko gagal panen akibat kekeringan atau banjir yang tidak terduga. Integrasi DSS dengan data prakiraan cuaca jangka menengah dari lembaga meteorologi menjadi kunci keberhasilan sistem ini, mengingat akurasi prediksi cuaca yang tinggi sangat menentukan ketepatan rekomendasi yang diberikan kepada petani dalam merencanakan siklus tanam mereka secara keseluruhan.

4. Tata Kelola dan Kepemilikan Data Petani

Isu tata kelola data menjadi semakin penting seiring meningkatnya volume data pertanian yang dikumpulkan oleh berbagai platform digital, mengingat pertanyaan mengenai siapa yang berhak memiliki dan memanfaatkan data tersebut sering kali belum diatur secara

jelas dalam banyak kasus penerapan teknologi pertanian digital. Basso dan Antle (2020) menekankan pentingnya kerangka regulasi yang menjamin hak petani atas data yang dihasilkan dari aktivitas usaha taninya, termasuk hak untuk menolak berbagi data dengan pihak ketiga tanpa persetujuan eksplisit, guna mencegah eksploitasi data petani oleh pihak yang memiliki kekuatan pasar lebih besar.

Pengembangan kerangka tata kelola data pertanian yang baik perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kepentingan berbagi data untuk kepentingan riset dan kebijakan publik, dengan perlindungan hak privasi dan kepentingan ekonomi petani individual. Beberapa negara telah mengembangkan kode etik berbagi data pertanian (*agricultural data sharing code of conduct*) yang mengatur prinsip-prinsip dasar seperti transparansi, persetujuan, dan portabilitas data, yang dapat menjadi rujukan bagi Indonesia dalam merumuskan kebijakan tata kelola data pertanian nasional yang lebih komprehensif.

5. Peran Data Terbuka Pemerintah dalam Ekosistem *Big Data* Pertanian

Data terbuka pemerintah (*open government data*), seperti data curah hujan historis, data harga komoditas, dan data statistik produksi pertanian, menjadi sumber daya penting yang dapat dimanfaatkan oleh pengembang aplikasi dan peneliti untuk membangun sistem pendukung keputusan pertanian yang lebih komprehensif tanpa harus mengumpulkan data dari awal secara mandiri. Ketersediaan data terbuka yang berkualitas dan mudah diakses melalui portal data pemerintah berkontribusi terhadap tumbuhnya ekosistem inovasi teknologi pertanian yang lebih dinamis, karena mengurangi hambatan akses data yang selama ini menjadi kendala utama bagi perusahaan rintisan teknologi pertanian skala kecil.

Peningkatan kualitas dan kelengkapan data terbuka pertanian pemerintah Indonesia masih memerlukan perbaikan berkelanjutan, termasuk pembaruan data secara lebih real-time, peningkatan resolusi spasial data hingga tingkat kecamatan atau desa, serta penyediaan dokumentasi metadata yang jelas agar pengguna data dapat memahami metodologi pengumpulan dan keterbatasan data yang tersedia. Investasi dalam infrastruktur data terbuka pertanian nasional merupakan bentuk barang publik digital yang manfaatnya dapat dinikmati secara luas oleh

berbagai pemangku kepentingan ekosistem inovasi pertanian di Indonesia.

6. Pengembangan Talenta Analitik Data Pertanian

Pengembangan ekosistem big data pertanian yang matang memerlukan dukungan talenta sumber daya manusia yang memiliki keahlian analitik data sekaligus pemahaman mendalam mengenai domain agronomi, sebuah kombinasi keahlian yang masih relatif langka di Indonesia saat ini. Program pendidikan lintas disiplin yang menggabungkan ilmu data dan ilmu pertanian perlu terus dikembangkan oleh perguruan tinggi untuk mencetak talenta yang mampu menjembatani kesenjangan antara kemampuan teknis pengolahan data dengan pemahaman kontekstual mengenai permasalahan pertanian yang perlu dipecahkan melalui pendekatan analitik data.

Kemitraan antara perusahaan teknologi pertanian dengan perguruan tinggi dalam bentuk program magang dan riset bersama dapat mempercepat transfer pengetahuan praktis kepada mahasiswa, sekaligus membantu perusahaan memperoleh talenta yang telah memiliki pemahaman kontekstual mengenai tantangan riil sektor pertanian sebelum mereka memasuki dunia kerja secara penuh, sehingga mempercepat proses adaptasi talenta baru dalam menghasilkan solusi analitik data yang relevan dengan kebutuhan industri pertanian yang sesungguhnya.

E. *Blockchain* untuk Ketertelusuran Pangan

Blockchain adalah teknologi buku besar terdistribusi (*distributed ledger technology*) yang mencatat transaksi secara permanen, transparan, dan tidak dapat diubah (*immutable*) melalui mekanisme konsensus antarnode dalam jaringan tanpa memerlukan otoritas sentral. Kamble, Gunasekaran, dan Sharma (2020) menjelaskan bahwa karakteristik desentralisasi dan transparansi *blockchain* menjadikannya teknologi yang sangat relevan untuk membangun sistem ketertelusuran (*traceability*) rantai pasok pangan, karena setiap tahapan mulai dari produksi di tingkat petani hingga distribusi ke konsumen akhir dapat dicatat dan diverifikasi oleh seluruh pihak yang terlibat secara *real-time*.

Penerapan *blockchain* dalam rantai pasok pangan memungkinkan konsumen untuk menelusuri asal-usul produk pangan yang mereka konsumsi, termasuk informasi mengenai lokasi produksi, metode budi daya, penggunaan pestisida, serta jalur distribusi yang dilalui produk tersebut sebelum sampai ke tangan konsumen. Kamble dan kolega (2020) menemukan bahwa penerapan sistem ketertelusuran berbasis *blockchain* mampu meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap keamanan pangan sekaligus memberikan insentif harga premium bagi petani yang menerapkan praktik budi daya berkelanjutan dan bersertifikasi, karena transparansi informasi menjadi nilai tambah yang dapat dikomunikasikan secara kredibel kepada pasar.

Selain fungsi ketertelusuran, *blockchain* juga memungkinkan penerapan kontrak pintar (*smart contract*), yaitu program komputer yang secara otomatis mengeksekusi kesepakatan transaksi ketika kondisi tertentu terpenuhi tanpa memerlukan perantara pihak ketiga. Dalam konteks pertanian, kontrak pintar dapat digunakan untuk mengotomatisasi pembayaran petani segera setelah produk diterima dan diverifikasi kualitasnya oleh pembeli, sehingga memperpendek rantai birokrasi transaksi dan mengurangi risiko keterlambatan pembayaran yang selama ini kerap merugikan petani kecil dalam sistem perdagangan konvensional yang melibatkan banyak perantara.

Di Indonesia, potensi penerapan *blockchain* pada komoditas ekspor unggulan seperti kopi, kakao, dan lada sangat besar mengingat pasar internasional semakin menuntut jaminan keberlanjutan dan keaslian asal-usul produk. Sertifikasi berbasis *blockchain* dapat memperkuat posisi tawar eksportir Indonesia di pasar global yang semakin kompetitif, khususnya dalam memenuhi regulasi ketertelusuran yang diberlakukan oleh negara-negara importir utama, seperti persyaratan bebas deforestasi pada komoditas perkebunan yang semakin ketat diterapkan oleh Uni Eropa dan mitra dagang lainnya.

Meskipun menjanjikan, adopsi *blockchain* dalam pertanian Indonesia masih menghadapi tantangan signifikan, termasuk keterbatasan skalabilitas jaringan *blockchain* publik yang dapat memperlambat transaksi pada volume data besar, tingginya biaya infrastruktur teknologi, serta rendahnya literasi digital petani skala kecil dalam mengoperasikan sistem pencatatan berbasis *blockchain*. Duan dan kolega (2021) menyarankan agar penerapan *blockchain* di sektor

pertanian negara berkembang dilakukan secara bertahap melalui skema kemitraan antara petani, koperasi, dan penyedia teknologi guna memastikan keberlanjutan sistem dalam jangka panjang tanpa membebani petani secara finansial.

Tabel 5.4 Perbandingan Sistem Pencatatan Rantai Pasok Konvensional dan Berbasis *Blockchain*

Aspek	Sistem Konvensional	Sistem Berbasis *Blockchain*
Penyimpanan data	Tersentralisasi pada satu pihak/lembaga	Terdistribusi pada seluruh node jaringan
Transparansi	Terbatas, rentan manipulasi	Tinggi, seluruh pihak dapat memverifikasi
Kecepatan transaksi	Bergantung pada birokrasi manual	Otomatis melalui kontrak pintar
Keamanan data	Rawan perubahan tanpa jejak audit	Tidak dapat diubah (immutable)
Biaya operasional jangka panjang	Relatif rendah di awal, tinggi untuk verifikasi	Tinggi di awal, efisien dalam jangka panjang

1. Mekanisme Konsensus dan Jenis Jaringan *Blockchain*

Blockchain beroperasi melalui mekanisme konsensus yang memastikan seluruh node dalam jaringan menyepakati validitas suatu transaksi sebelum dicatat secara permanen dalam buku besar terdistribusi. Terdapat berbagai jenis jaringan *blockchain* yang dapat diterapkan dalam konteks pertanian, meliputi *blockchain* publik yang terbuka bagi siapa saja untuk berpartisipasi, *blockchain* privat yang aksesnya terbatas pada pihak tertentu, serta *blockchain* konsorsium yang dikelola bersama oleh sekelompok organisasi tepercaya, seperti koperasi petani, eksportir, dan lembaga sertifikasi, yang bekerja sama membangun sistem ketertelusuran bersama untuk komoditas tertentu.

Kamble, Gunasekaran, dan Sharma (2020) menyarankan bahwa jaringan *blockchain* konsorsium umumnya lebih sesuai untuk konteks rantai pasok pertanian dibandingkan *blockchain* publik, karena

menawarkan keseimbangan antara transparansi dan efisiensi transaksi, mengingat *blockchain* publik cenderung memiliki keterbatasan skalabilitas dan waktu pemrosesan transaksi yang lebih lambat akibat mekanisme konsensus yang melibatkan seluruh node dalam jaringan yang sangat besar dan terbuka bagi partisipasi publik secara luas.

2. Integrasi *Blockchain* dengan Teknologi IoT

Integrasi *blockchain* dengan teknologi IoT menciptakan sistem ketertelusuran yang lebih andal karena data yang dicatat dalam *blockchain* berasal langsung dari sensor yang terpasang di lapangan, sehingga mengurangi risiko manipulasi data oleh pihak yang tidak bertanggung jawab. Sebagai contoh, sensor suhu yang dipasang pada kontainer pengiriman hasil pertanian dapat secara otomatis mencatat data kondisi penyimpanan ke dalam *blockchain* sepanjang perjalanan distribusi, sehingga pembeli dapat memverifikasi bahwa produk telah disimpan pada kondisi yang sesuai standar keamanan pangan tanpa harus mengandalkan laporan manual yang rentan terhadap kesalahan atau manipulasi data.

Kombinasi IoT dan *blockchain* juga memungkinkan penerapan sertifikasi digital yang lebih efisien dibandingkan sertifikasi berbasis dokumen kertas konvensional, karena seluruh riwayat proses produksi tercatat secara otomatis dan dapat diverifikasi kapan saja tanpa memerlukan audit manual yang memakan waktu dan biaya. Pendekatan ini sangat relevan untuk mendukung sertifikasi produk organik atau ramah lingkungan yang semakin diminati oleh konsumen global yang peduli terhadap keberlanjutan dan keamanan produk pangan yang mereka konsumsi sehari-hari.

3. Peluang dan Kendala Penerapan *Blockchain* di Sektor Pertanian Indonesia

Peluang penerapan *blockchain* di Indonesia semakin terbuka lebar seiring meningkatnya permintaan pasar ekspor terhadap jaminan keberlanjutan dan keaslian produk, terutama pada komoditas perkebunan seperti kopi, kakao, dan kelapa sawit yang menghadapi tekanan regulasi ketertelusuran yang semakin ketat dari negara-negara importir. Penerapan *blockchain* pada rantai pasok komoditas tersebut berpotensi meningkatkan daya saing produk Indonesia di pasar internasional

sekaligus memberikan insentif ekonomi bagi petani yang menerapkan praktik budi daya berkelanjutan dan dapat dibuktikan secara transparan melalui sistem pencatatan digital yang tidak dapat dimanipulasi.

Meskipun demikian, kendala utama penerapan *blockchain* di Indonesia terletak pada keterbatasan infrastruktur digital di wilayah produksi komoditas yang sering kali berada di daerah terpencil dengan akses internet terbatas, rendahnya pemahaman petani mengenai konsep dan manfaat teknologi *blockchain*, serta kebutuhan investasi awal yang tidak sedikit untuk membangun infrastruktur pencatatan digital di tingkat petani hulu. Duan, Sun, Che, dan kolega (2021) menyarankan pendekatan bertahap yang dimulai dari digitalisasi pencatatan sederhana sebelum beralih sepenuhnya ke sistem *blockchain* yang lebih kompleks, guna memastikan kesiapan seluruh pihak dalam rantai pasok secara memadai.

4. Interoperabilitas *Blockchain* dengan Sistem Sertifikasi *Existing*

Integrasi sistem *blockchain* dengan skema sertifikasi pertanian yang telah mapan, seperti sertifikasi organik dan sertifikasi keberlanjutan komoditas perkebunan, memerlukan penyesuaian teknis agar data hasil audit lembaga sertifikasi dapat tercatat secara otomatis ke dalam *blockchain* tanpa duplikasi proses verifikasi yang membebani petani dengan birokrasi tambahan. Pendekatan integrasi yang baik memungkinkan lembaga sertifikasi tetap menjalankan fungsi verifikasi independen mereka, sementara *blockchain* berperan sebagai lapisan pencatatan tambahan yang meningkatkan transparansi dan aksesibilitas informasi sertifikasi bagi konsumen akhir di sepanjang rantai pasok.

Kamble, Gunasekaran, dan Sharma (2020) menekankan bahwa keberhasilan integrasi *blockchain* dengan sistem sertifikasi yang sudah ada memerlukan keterlibatan aktif lembaga sertifikasi sejak tahap perancangan sistem, guna memastikan bahwa data yang tercatat dalam *blockchain* benar-benar mencerminkan hasil verifikasi yang kredibel dan tidak sekadar klaim sepihak dari petani atau pelaku usaha tanpa proses validasi independen yang memadai.

5. Tokenisasi Aset Pertanian dan Pembiayaan Berbasis *Blockchain*

Selain fungsi ketertelusuran, *blockchain* juga membuka peluang inovasi pembiayaan pertanian melalui mekanisme tokenisasi aset, di mana hasil panen atau lahan pertanian dapat direpresentasikan dalam bentuk token digital yang dapat diperdagangkan atau dijadikan agunan pembiayaan secara lebih fleksibel dibandingkan mekanisme pembiayaan konvensional. Skema ini berpotensi membuka akses pembiayaan baru bagi petani yang selama ini kesulitan memenuhi persyaratan agunan formal pada lembaga keuangan konvensional, meskipun penerapannya masih memerlukan kerangka regulasi yang jelas mengenai status hukum token aset pertanian tersebut.

Perkembangan model pembiayaan pertanian berbasis *blockchain* masih berada pada tahap eksplorasi awal di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, sehingga diperlukan kehati-hatian dalam penerapannya guna menghindari risiko spekulasi berlebihan yang dapat merugikan petani sebagai pihak yang paling rentan dalam rantai nilai pertanian. Kolaborasi antara regulator keuangan, otoritas pertanian, dan penyedia teknologi menjadi penting untuk merumuskan kerangka kebijakan yang melindungi kepentingan petani sekaligus membuka peluang inovasi pembiayaan yang bermanfaat secara berkelanjutan.

6. Kesiapan Regulasi *Blockchain* untuk Sektor Pertanian

Kerangka regulasi yang jelas mengenai status hukum teknologi *blockchain* dan transaksi digital yang menyertainya menjadi prasyarat penting bagi adopsi teknologi ini secara luas dalam sektor pertanian Indonesia. Ketidakjelasan regulasi berpotensi menimbulkan keraguan bagi pelaku usaha dan investor untuk mengembangkan solusi *blockchain* pertanian secara serius, mengingat risiko hukum yang belum terpetakan dengan baik dapat menghambat skala investasi yang diperlukan untuk membangun infrastruktur *blockchain* yang andal dan berkelanjutan dalam jangka panjang.

Pemerintah perlu mempertimbangkan pengembangan kerangka regulasi yang bersifat adaptif dan mendukung inovasi (*regulatory sandbox*), yang memungkinkan uji coba penerapan teknologi *blockchain* pada skala terbatas sebelum diberlakukan secara luas, sehingga potensi risiko dapat diidentifikasi dan dimitigasi secara dini tanpa menghambat

laju inovasi teknologi yang bermanfaat bagi peningkatan transparansi dan efisiensi rantai pasok pertanian nasional secara keseluruhan.

7. Edukasi Petani mengenai Manfaat *Blockchain*

Tingkat pemahaman petani mengenai konsep dan manfaat teknologi *blockchain* masih tergolong rendah, mengingat sifat teknologi ini yang relatif abstrak dan kompleks dibandingkan teknologi digital lain yang lebih mudah dipahami manfaatnya secara langsung, seperti aplikasi informasi pasar. Program edukasi yang menyederhanakan konsep *blockchain* menggunakan analogi yang mudah dipahami, serta menekankan manfaat konkret seperti potensi peningkatan harga jual melalui sertifikasi ketertelusuran, menjadi pendekatan yang lebih efektif untuk membangun pemahaman dan minat petani terhadap adopsi teknologi ini dibandingkan penjelasan teknis yang terlalu mendalam mengenai mekanisme kerja *blockchain* itu sendiri.

Pelibatan tokoh petani panutan yang telah berhasil merasakan manfaat penerapan sistem ketertelusuran berbasis *blockchain* dalam program edukasi dan sosialisasi kepada petani lain terbukti lebih efektif dibandingkan pendekatan penyuluhan konvensional yang bersifat satu arah, karena petani cenderung lebih percaya pada pengalaman nyata sesama petani dibandingkan penjelasan teoretis dari pihak luar yang belum tentu memahami sepenuhnya konteks dan tantangan riil yang dihadapi petani di lapangan.

F. Robotika dan Otomasi Pertanian

Robotika pertanian (*agricultural robotics*) merupakan bidang yang mengintegrasikan sensor, aktuator, dan sistem kendali cerdas untuk menggantikan atau membantu tenaga kerja manusia dalam melaksanakan tugas-tugas budi daya secara presisi dan efisien. Balaska, Adamidou, Vryzas, dan Gasteratos (2023) menjelaskan bahwa robot pertanian modern umumnya dilengkapi dengan kemampuan persepsi berbasis AI yang memungkinkan mereka mengenali objek, seperti gulma, hama, atau buah yang siap panen, secara otomatis, sehingga dapat melakukan tindakan yang tepat sasaran tanpa memerlukan pengawasan manusia secara terus-menerus di lapangan.

Berbagai jenis robot telah dikembangkan untuk mendukung berbagai tahapan budi daya pertanian, termasuk robot penyiang (*weeding robot*) yang mampu mengidentifikasi dan mencabut gulma secara mekanis tanpa herbisida, robot panen (*harvesting robot*) yang dirancang khusus untuk memetik buah-buahan sensitif seperti stroberi dan tomat tanpa merusak jaringan tanaman, serta traktor otonom (*autonomous tractor*) yang mampu melakukan pengolahan tanah dan penanaman secara mandiri berdasarkan peta lahan yang telah diprogram sebelumnya menggunakan teknologi GPS presisi tinggi.

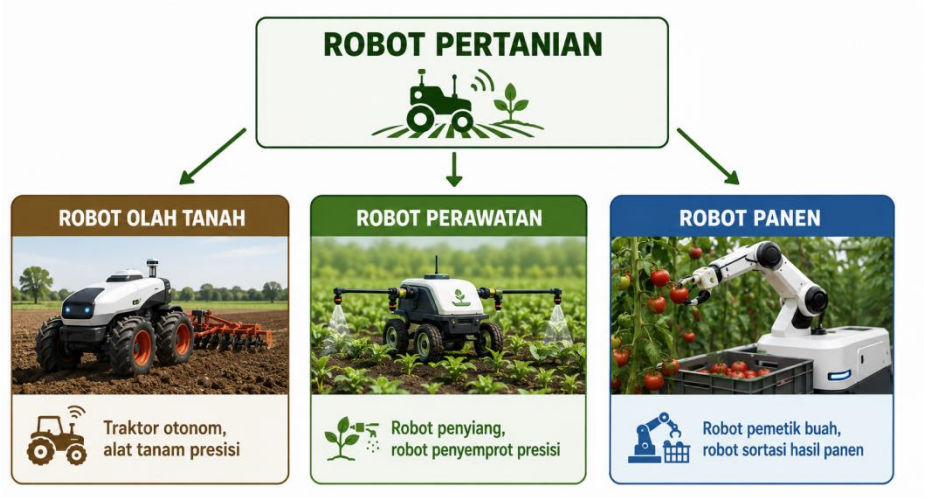
Otomasi juga banyak diterapkan pada sistem budi daya di dalam rumah kaca (*greenhouse automation*), yang mengintegrasikan sensor lingkungan dengan sistem kendali otomatis untuk mengatur suhu, kelembapan, pencahayaan, dan irigasi secara real-time tanpa intervensi manual. Sott dan kolega (2020) mencatat bahwa penerapan otomasi rumah kaca pada budi daya tanaman hortikultura mampu meningkatkan konsistensi kualitas hasil panen sekaligus menekan risiko kegagalan panen akibat fluktuasi kondisi lingkungan yang tidak terkendali, terutama pada komoditas yang memiliki sensitivitas tinggi terhadap perubahan suhu dan kelembapan udara.

Manfaat utama penerapan robotika dan otomasi dalam pertanian meliputi peningkatan efisiensi tenaga kerja di tengah kelangkaan tenaga kerja pertanian akibat urbanisasi dan penuaan populasi petani, peningkatan presisi dalam aplikasi input produksi yang berdampak pada penghematan biaya, serta pengurangan penggunaan bahan kimia sintetis melalui pendekatan pengendalian hama dan gulma yang lebih tepat sasaran. Balaska dan kolega (2023) menegaskan bahwa integrasi robotika dengan AI dalam manajemen perlindungan tanaman berkontribusi signifikan terhadap pencapaian target pertanian berkelanjutan yang menekankan minimalisasi jejak ekologis dari aktivitas produksi pangan.

Meski demikian, adopsi robotika pertanian di negara berkembang seperti Indonesia masih menghadapi kendala serius, terutama tingginya biaya investasi awal yang tidak terjangkau oleh mayoritas petani skala kecil, kompleksitas medan pertanian yang beragam dan sering kali tidak rata, serta keterbatasan infrastruktur pendukung seperti jaringan listrik dan konektivitas internet di wilayah pedesaan. Oleh karena itu, strategi adopsi robotika di Indonesia perlu

mempertimbangkan skema kepemilikan bersama atau penyewaan alat (*equipment sharing*) melalui koperasi tani guna menekan beban biaya individual petani secara signifikan.

Gambar 5.3 Klasifikasi Robot Pertanian Berdasarkan Fungsi Operasional



Klasifikasi robot pertanian berdasarkan fungsi operasional membantu perencana teknologi menentukan prioritas investasi sesuai dengan tahapan budi daya yang paling membutuhkan intervensi otomasi, misalnya tahapan panen yang bersifat padat karya dan sensitif terhadap waktu sering menjadi prioritas utama pengembangan robot pada komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi.

1. Teknologi Persepsi pada Robot Pertanian

Kemampuan persepsi merupakan komponen krusial yang memungkinkan robot pertanian mengenali dan membedakan objek di lingkungan kerjanya, seperti membedakan antara tanaman budi daya dan gulma, atau mengidentifikasi tingkat kematangan buah yang siap dipanen. Balaska, Adamidou, Vryzas, dan Gasteratos (2023) menjelaskan bahwa robot pertanian modern umumnya mengombinasikan berbagai sensor, seperti kamera RGB, kamera inframerah, dan sensor jarak (*LiDAR*), yang diolah menggunakan algoritma *computer vision* berbasis pembelajaran mendalam untuk menghasilkan persepsi lingkungan yang akurat dalam kondisi pencahayaan dan cuaca yang bervariasi di lapangan.

Tantangan utama dalam pengembangan sistem persepsi robot pertanian terletak pada variabilitas kondisi lingkungan alami yang jauh lebih kompleks dibandingkan lingkungan industri terkontrol, seperti perubahan intensitas cahaya matahari sepanjang hari, keberadaan bayangan daun, serta variasi bentuk dan warna tanaman akibat perbedaan varietas dan tahap pertumbuhan. Balaska dan kolega (2023) menekankan perlunya pengembangan algoritma yang lebih robust dan mampu beradaptasi terhadap kondisi lapangan yang dinamis agar robot dapat beroperasi secara andal sepanjang musim tanam tanpa memerlukan kalibrasi ulang yang terlalu sering.

2. Robot Kolaboratif dan Sistem Multi-Robot

Perkembangan terkini dalam robotika pertanian mengarah pada penerapan sistem multi-robot yang bekerja secara kolaboratif untuk menyelesaikan tugas budi daya berskala luas secara lebih efisien dibandingkan robot tunggal. Sistem ini memungkinkan pembagian tugas antarrobot, misalnya satu kelompok robot bertugas melakukan pemantauan dan pemetaan lahan, sementara kelompok robot lainnya melaksanakan tindakan aplikasi input berdasarkan peta yang telah dihasilkan, sehingga keseluruhan proses budi daya dapat berjalan secara paralel dan lebih cepat dibandingkan pendekatan sekuensial yang mengandalkan satu unit robot untuk menyelesaikan seluruh rangkaian tugas secara berurutan.

Konsep robot kolaboratif (*cobot*) yang bekerja berdampingan dengan manusia juga mulai diterapkan pada tahap panen komoditas yang memerlukan kehati-hatian tinggi, di mana robot membantu tugas-tugas fisik yang berat sementara keputusan akhir mengenai kualitas dan kelayakan panen tetap berada di tangan pekerja manusia yang berpengalaman. Pendekatan kolaboratif ini dinilai lebih realistis untuk diterapkan pada tahap transisi menuju otomasi penuh, mengingat keterbatasan teknologi robot dalam menangani variabilitas kondisi hasil panen yang sangat tinggi pada komoditas pertanian dibandingkan produk manufaktur yang lebih seragam.

3. Kelayakan Ekonomi Investasi Robotika Pertanian

Analisis kelayakan ekonomi menjadi pertimbangan penting sebelum petani atau kelompok tani memutuskan untuk berinvestasi pada

teknologi robotika pertanian, mengingat biaya investasi awal yang umumnya masih tinggi dibandingkan dengan kapasitas finansial mayoritas petani skala kecil di Indonesia. Perhitungan periode pengembalian investasi (*payback period*) perlu mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk penghematan biaya tenaga kerja, peningkatan hasil panen akibat presisi aplikasi input, serta potensi peningkatan harga jual produk akibat kualitas yang lebih konsisten dan seragam yang dihasilkan melalui proses budi daya yang lebih terkendali dengan bantuan teknologi robotika.

Skema kepemilikan bersama melalui koperasi tani atau model penyewaan alat (*equipment as a service*) menjadi alternatif strategis untuk menekan beban investasi individual petani, sehingga teknologi robotika yang canggih dapat diakses secara kolektif oleh sekelompok petani tanpa harus menanggung biaya kepemilikan penuh secara mandiri. Model bisnis semacam ini telah terbukti berhasil pada beberapa kasus penyewaan alat mesin pertanian konvensional di Indonesia dan berpotensi direplikasi untuk teknologi robotika yang lebih canggih di masa mendatang seiring dengan penurunan harga teknologi akibat skala ekonomi produksi yang semakin besar.

4. Standar Keselamatan Operasional Robot Pertanian

Operasional robot pertanian di lahan terbuka yang sering kali diakses oleh manusia dan hewan ternak menuntut penerapan standar keselamatan yang ketat, guna mencegah risiko kecelakaan yang dapat membahayakan pekerja lapangan maupun merusak peralatan itu sendiri. Sistem deteksi rintangan dan mekanisme penghentian darurat (*emergency stop*) menjadi fitur wajib yang harus tertanam dalam desain robot pertanian, terutama pada robot yang beroperasi secara otonom tanpa pengawasan langsung manusia sepanjang waktu operasionalnya di lapangan.

Pengembangan standar keselamatan operasional robot pertanian di Indonesia masih memerlukan perhatian lebih lanjut dari regulator, mengingat belum adanya kerangka regulasi khusus yang mengatur operasional robot pertanian otonom sebagaimana telah diterapkan pada regulasi *drone*. Kekosongan regulasi ini berpotensi menimbulkan ambiguitas tanggung jawab hukum apabila terjadi insiden kecelakaan yang melibatkan robot pertanian otonom, sehingga perlu segera

diantisipasi seiring dengan semakin meluasnya adopsi teknologi robotika di sektor pertanian nasional pada masa mendatang.

5. Dampak Sosial Ekonomi Otomasi terhadap Tenaga Kerja Pertanian

Penerapan otomasi dan robotika pertanian berpotensi menimbulkan dampak sosial ekonomi yang kompleks terhadap struktur tenaga kerja pertanian, terutama bagi buruh tani yang selama ini mengandalkan pekerjaan musiman pada tahapan budi daya yang padat karya, seperti penyiangan dan pemanenan. Meskipun otomasi dapat mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual di tengah kelangkaan tenaga kerja pertanian akibat urbanisasi, transisi ini perlu dikelola secara hati-hati agar tidak menimbulkan pengangguran struktural yang merugikan kelompok pekerja rentan di wilayah pedesaan.

Strategi mitigasi dampak sosial otomasi pertanian dapat dilakukan melalui program pelatihan ulang keterampilan (*reskilling*) bagi buruh tani agar dapat beralih ke peran baru yang muncul akibat penerapan teknologi, seperti operator dan teknisi pemeliharaan peralatan robotika, sehingga transisi teknologi tidak semata-mata menghilangkan lapangan kerja, melainkan menciptakan jenis pekerjaan baru yang memerlukan keterampilan berbeda dari pekerjaan pertanian konvensional yang selama ini digeluti oleh tenaga kerja pedesaan.

6. Perawatan dan Ketersediaan Suku Cadang Robot Pertanian

Ketersediaan layanan purnajual dan suku cadang menjadi pertimbangan praktis yang tidak kalah penting dibandingkan kecanggihan teknologi itu sendiri dalam keputusan investasi robotika pertanian, mengingat lokasi operasional robot yang sering berada di wilayah pedesaan yang jauh dari pusat layanan teknis produsen. Keterlambatan perbaikan akibat kesulitan mendapatkan suku cadang atau teknisi yang kompeten dapat menyebabkan kerugian signifikan bagi petani akibat terhentinya operasional pada periode kritis budi daya, seperti musim tanam atau musim panen yang memiliki jendela waktu terbatas.

Pengembangan jaringan layanan purnajual yang tersebar hingga ke tingkat kabupaten, serta pelatihan teknisi lokal yang mampu melakukan perbaikan dasar tanpa harus selalu bergantung pada teknisi

pusat, menjadi strategi penting yang perlu dipertimbangkan oleh produsen dan penyedia layanan robotika pertanian agar teknologi yang diinvestasikan petani dapat beroperasi secara andal dan berkelanjutan dalam jangka panjang tanpa risiko gangguan operasional yang berkepanjangan akibat kendala perawatan dan perbaikan.

G. Masa Depan Smart farming

Masa depan pertanian cerdas (*smart farming*) ditandai dengan konvergensi berbagai teknologi yang sebelumnya berkembang secara terpisah, meliputi IoT, kecerdasan buatan, big data, *blockchain*, dan robotika yang terintegrasi ke dalam satu ekosistem digital yang saling terhubung. Yang, Shu, Chen, Ferrag, Wu, Nurellari, dan Huang (2021) memproyeksikan bahwa konvergensi teknologi tersebut akan melahirkan sistem pertanian yang bersifat otonom penuh, di mana keputusan operasional mulai dari penanaman hingga panen dapat dilakukan secara mandiri oleh sistem cerdas dengan intervensi manusia yang minimal, sekaligus tetap mempertahankan kendali strategis di tangan petani sebagai pengambil keputusan utama.

Konsep *Agriculture 5.0* yang diperkenalkan oleh Fraser dan Campbell (2019) menegaskan bahwa arah pengembangan pertanian masa depan tidak hanya berorientasi pada peningkatan produktivitas semata, melainkan juga pada rekonsiliasi antara kebutuhan produksi pangan global dengan pemeliharaan kesehatan ekosistem planet secara menyeluruh. Paradigma ini menuntut teknologi pertanian untuk dirancang dengan prinsip regeneratif, yaitu mampu memulihkan kualitas tanah dan keanekaragaman hayati, bukan sekadar mengeksploitasi sumber daya alam secara intensif demi mengejar target produksi jangka pendek semata.

Peran kebijakan pemerintah dan ekosistem inovasi menjadi faktor penentu keberhasilan transisi menuju *smart farming* secara berkelanjutan. Diperlukan kebijakan yang mendukung riset dan pengembangan teknologi lokal, insentif fiskal bagi investasi teknologi pertanian, penguatan kapasitas sumber daya manusia melalui pendidikan vokasi pertanian digital, serta pembangunan infrastruktur digital yang merata hingga ke wilayah pedesaan terpencil. Sinergi antara pemerintah, perguruan tinggi, sektor swasta, dan komunitas petani dalam kerangka

kolaborasi kuadrupel heliks (*quadruple helix*) menjadi kunci utama dalam mempercepat difusi inovasi teknologi pertanian secara inklusif dan berkeadilan.

Kesiapan Indonesia dalam menyongsong era *smart farming* masih memerlukan penguatan pada berbagai lini, mengingat karakteristik pertanian nasional yang didominasi oleh petani gurem dengan luas lahan garapan yang sempit dan tersebar. Strategi transisi yang realistis perlu mempertimbangkan pendekatan bertahap yang dimulai dari teknologi sederhana dan terjangkau, seperti aplikasi informasi pasar berbasis telepon pintar, sebelum secara bertahap menuju penerapan teknologi yang lebih kompleks seperti robotika dan AI, sejalan dengan peningkatan kapasitas ekonomi dan literasi digital petani dari waktu ke waktu.

1. Konvergensi Teknologi Menuju Sistem Pertanian Otonom

Tren konvergensi teknologi mengarah pada terciptanya sistem pertanian otonom yang mengintegrasikan seluruh rangkaian proses budi daya, mulai dari perencanaan tanam berbasis data historis dan prediksi cuaca, pelaksanaan penanaman menggunakan traktor otonom, pemantauan pertumbuhan tanaman melalui jaringan sensor dan *drone*, hingga pelaksanaan panen menggunakan robot panen yang seluruhnya terkoordinasi melalui platform digital terpusat. Yang, Shu, Chen, dan kolega (2021) memproyeksikan bahwa sistem pertanian otonom penuh akan menjadi kenyataan pada dekade mendatang seiring dengan pematangan teknologi kecerdasan buatan dan penurunan biaya perangkat keras robotika secara signifikan.

Meskipun visi otomasi penuh menjanjikan efisiensi yang luar biasa, penting untuk memastikan bahwa peran manusia tetap menjadi bagian sentral dalam pengambilan keputusan strategis, terutama terkait aspek keberlanjutan lingkungan dan kesejahteraan sosial petani. Sistem otonom idealnya dirancang sebagai alat bantu yang memperkuat kapasitas petani dalam mengelola usaha taninya, bukan sepenuhnya menggantikan peran dan mata pencaharian petani, sehingga transisi teknologi perlu dikelola secara hati-hati agar tidak menimbulkan dislokasi sosial ekonomi yang merugikan masyarakat pedesaan dalam jangka panjang.

2. Prinsip Regeneratif dalam Pengembangan Teknologi Pertanian Masa Depan

Konsep *Agriculture 5.0* menekankan prinsip regeneratif yang tidak hanya berorientasi pada minimalisasi dampak negatif terhadap lingkungan, melainkan secara aktif memulihkan dan meningkatkan kualitas ekosistem pertanian, seperti kesuburan tanah, keanekaragaman hayati, dan siklus hidrologi alami. Fraser dan Campbell (2019) menegaskan bahwa teknologi pertanian masa depan perlu dirancang dengan mempertimbangkan interaksi kompleks antara sistem produksi pangan dan kesehatan planet secara menyeluruh, bukan sekadar berfokus pada optimalisasi produktivitas jangka pendek yang dapat mengorbankan keberlanjutan sumber daya alam dalam jangka panjang.

Penerapan prinsip regeneratif dalam teknologi pertanian dapat diwujudkan melalui berbagai inovasi, seperti sistem robotika yang mendukung praktik pertanian tanpa olah tanah (*no-till farming*) guna menjaga struktur dan mikrobiota tanah, teknologi presisi yang meminimalkan penggunaan bahan kimia sintetis demi menjaga keseimbangan ekosistem serangga penyerbuk, serta sistem pemantauan karbon berbasis satelit yang memungkinkan verifikasi kontribusi lahan pertanian terhadap penyerapan karbon sebagai bagian dari upaya mitigasi perubahan iklim global secara terukur dan dapat dipertanggungjawabkan.

3. Skenario Adopsi Teknologi Jangka Panjang bagi Petani Indonesia

Perencanaan skenario adopsi teknologi jangka panjang bagi petani Indonesia perlu mempertimbangkan berbagai jalur transisi yang realistis sesuai dengan karakteristik dan kapasitas masing-masing kelompok petani, mulai dari petani subsisten yang mungkin baru mampu mengadopsi teknologi informasi dasar, hingga petani komersial berskala menengah yang berpotensi mengadopsi teknologi presisi yang lebih canggih dalam jangka waktu yang lebih pendek. Pendekatan segmentasi ini penting agar kebijakan dan program dukungan teknologi dapat dirancang secara lebih tepat sasaran sesuai dengan kebutuhan dan kapasitas riil masing-masing segmen petani.

Skenario optimis memproyeksikan bahwa dengan dukungan kebijakan yang konsisten dan investasi infrastruktur yang memadai,

mayoritas petani Indonesia dapat mengadopsi setidaknya teknologi digital dasar dalam satu dekade mendatang, sementara adopsi teknologi presisi yang lebih kompleks kemungkinan masih akan terkonsentrasi pada petani komersial dan perusahaan perkebunan berskala besar dalam jangka menengah, sebelum secara bertahap menjangkau petani skala kecil seiring dengan penurunan biaya teknologi dan penguatan kelembagaan korporasi petani di berbagai wilayah.

4. Peran Pendidikan Vokasi Pertanian Digital

Penguatan pendidikan vokasi pertanian yang mengintegrasikan kurikulum teknologi digital menjadi fondasi penting bagi kesiapan sumber daya manusia dalam menyongsong era *smart farming* di Indonesia. Sekolah menengah kejuruan dan politeknik pertanian perlu memperbarui kurikulum mereka agar mencakup kompetensi dasar mengenai penggunaan sensor, analisis data, dan operasional *drone* pertanian, sehingga lulusan yang dihasilkan memiliki bekal keterampilan yang relevan dengan kebutuhan industri pertanian modern yang semakin mengandalkan teknologi digital dalam operasionalnya.

Kemitraan antara lembaga pendidikan vokasi dengan perusahaan teknologi pertanian dan perusahaan perkebunan dapat memperkaya proses pembelajaran melalui program magang dan pembelajaran berbasis proyek nyata di lapangan, memberikan pengalaman praktis yang tidak dapat sepenuhnya diperoleh melalui pembelajaran teori di ruang kelas semata. Model pendidikan vokasi yang berorientasi pada kebutuhan industri semacam ini penting untuk menghasilkan lulusan yang siap kerja dan mampu berkontribusi langsung terhadap percepatan transformasi digital pertanian nasional.

5. Sinergi Teknologi sebagai Fondasi Ketahanan Pangan

Berbagai inovasi teknologi, mulai dari transformasi digital, IoT, AI, big data, *blockchain*, hingga robotika, bukan merupakan solusi yang berdiri sendiri-sendiri, melainkan komponen yang saling melengkapi dalam satu ekosistem pertanian cerdas yang terintegrasi. Keberhasilan penerapan teknologi tersebut sangat bergantung pada kesiapan infrastruktur, sumber daya manusia, kelembagaan, dan kebijakan yang mendukung, sehingga pendekatan pengembangan teknologi pertanian ke

depan perlu senantiasa mempertimbangkan dimensi sosial dan ekonomi secara seimbang dengan dimensi teknis semata.

Sinergi antara berbagai teknologi tersebut, apabila dikelola dengan bijaksana dan inklusif, berpotensi menjadi fondasi kokoh bagi terwujudnya ketahanan pangan nasional yang berkelanjutan, mampu menjawab tantangan pertumbuhan populasi, perubahan iklim, dan keterbatasan sumber daya alam secara simultan. Pembahasan lebih rinci mengenai penerapan spesifik teknologi presisi dalam konteks pertanian Indonesia akan diuraikan secara mendalam pada Bab 6 berikutnya.



BAB VI
PERTANIAN PRESISI DAN *SMART FARMING*

Pertanian presisi merupakan pendekatan manajemen pertanian yang memanfaatkan teknologi informasi untuk mengoptimalkan penggunaan input produksi berdasarkan variabilitas kondisi lahan secara spasial dan temporal, sehingga setiap bagian lahan mendapatkan perlakuan yang sesuai dengan kebutuhan spesifiknya, bukan perlakuan seragam sebagaimana lazim diterapkan dalam pertanian konvensional. Sott, Furstenau, Kipper, dan kolega (2020) menegaskan bahwa pertanian presisi bukan sekadar penerapan teknologi canggih semata, melainkan sebuah filosofi manajemen yang berlandaskan pada prinsip efisiensi, akurasi, dan keberlanjutan lingkungan. Bab ini akan menguraikan secara mendalam berbagai komponen teknologi pendukung pertanian presisi, mulai dari sensor dan sistem monitoring lahan, Sistem Informasi Geografis, teknologi *drone*, penginderaan jauh satelit, teknologi aplikasi input berdasarkan variabilitas lahan (*Variable Rate Technology*), hingga tinjauan komprehensif mengenai implementasi *smart farming* dalam konteks pertanian Indonesia.

A. Konsep Pertanian Presisi

Pertanian presisi (*precision agriculture*) didefinisikan sebagai pendekatan manajemen pertanian yang mengintegrasikan teknologi informasi, sensor, dan analitik data untuk mengelola variabilitas spasial dan temporal lahan pertanian guna mengoptimalkan produktivitas tanaman sekaligus meminimalkan dampak lingkungan. Sharma, Jain, Gupta, dan Chowdary (2021) menjelaskan bahwa esensi pertanian presisi terletak pada kemampuan mengidentifikasi variasi kondisi lahan, seperti tingkat kesuburan tanah, ketersediaan air, dan kepadatan hama, kemudian menyesuaikan perlakuan budi daya secara spesifik pada setiap

zona lahan yang berbeda, bukan menerapkan perlakuan seragam pada keseluruhan area sebagaimana praktik konvensional.

Prinsip dasar pertanian presisi sering diringkas dalam konsep *4R Nutrient Stewardship*, yaitu pemberian input pada sumber yang tepat (*right source*), dengan dosis yang tepat (*right rate*), pada waktu yang tepat (*right time*), dan di lokasi yang tepat (*right place*). Penerapan prinsip ini memastikan bahwa setiap input produksi, baik berupa pupuk, air, maupun pestisida, diberikan secara optimal sesuai kebutuhan aktual tanaman pada titik lokasi tertentu, sehingga mampu meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya sekaligus menekan pemborosan yang selama ini kerap terjadi akibat pendekatan pemupukan atau irigasi yang bersifat pukul rata di seluruh lahan.

Siklus operasional pertanian presisi umumnya terdiri atas tiga tahapan utama yang berkesinambungan, yaitu observasi (*observation*) melalui pengumpulan data lahan menggunakan sensor dan citra penginderaan jauh, analisis (*analysis*) data untuk mengidentifikasi pola variabilitas dan menentukan rekomendasi tindakan, serta tindakan (*action*) berupa aplikasi input produksi secara variabel sesuai hasil analisis. Siklus ini bersifat iteratif dan berkelanjutan, di mana hasil dari setiap tindakan akan kembali diobservasi untuk perbaikan rekomendasi pada musim tanam berikutnya, sehingga sistem pertanian presisi terus mengalami penyempurnaan berdasarkan akumulasi data historis dari waktu ke waktu.

Manfaat penerapan pertanian presisi telah banyak dibuktikan melalui berbagai studi empiris, di antaranya peningkatan efisiensi penggunaan air irigasi, penurunan dosis pupuk tanpa mengurangi hasil panen, serta pengurangan emisi gas rumah kaca akibat penggunaan input kimia yang lebih terukur. Sott dan kolega (2020) mencatat bahwa penerapan pertanian presisi pada sektor perkebunan kopi berkontribusi terhadap peningkatan keberlanjutan produksi melalui optimalisasi penggunaan air dan pupuk yang disesuaikan dengan kondisi mikroklimat dan karakteristik tanah pada setiap petak lahan yang berbeda.

Perbedaan mendasar antara pertanian presisi dan pertanian konvensional terletak pada basis pengambilan keputusan, di mana pertanian konvensional umumnya mengandalkan pengalaman dan intuisi petani secara generalisasi terhadap keseluruhan lahan, sementara pertanian presisi mendasarkan keputusan pada data kuantitatif yang

spesifik terhadap variabilitas lahan. Pergeseran paradigma ini menuntut perubahan pola pikir petani dari pendekatan yang bersifat reaktif menjadi proaktif dan berbasis bukti, yang pada gilirannya memerlukan dukungan pendampingan teknis yang intensif dari penyuluh pertanian selama masa transisi.

Tabel 6.1 Perbandingan Karakteristik Pertanian Konvensional dan Pertanian Presisi

Aspek	Pertanian Konvensional	Pertanian Presisi
Basis pengambilan keputusan	Pengalaman dan intuisi petani	Data kuantitatif dan analitik
Perlakuan lahan	Seragam pada seluruh area	Bervariasi sesuai kondisi tiap zona
Penggunaan input produksi	Cenderung berlebihan/pukul rata	Sesuai kebutuhan aktual (efisien)
Pemantauan kondisi lahan	Periodik dan visual	Real-time berbasis sensor dan citra
Dampak lingkungan	Berpotensi tinggi (residu kimia)	Diminimalkan melalui aplikasi tepat sasaran

1. Landasan Ilmiah Variabilitas Spasial Lahan

Landasan ilmiah pertanian presisi berakar pada pemahaman bahwa kondisi lahan pertanian tidak pernah bersifat homogen, melainkan memiliki variabilitas spasial yang dipengaruhi oleh faktor topografi, tekstur tanah, kandungan bahan organik, serta riwayat pengelolaan lahan pada masa lampau. Sharma, Jain, Gupta, dan Chowdary (2021) menjelaskan bahwa variabilitas ini dapat diukur secara kuantitatif melalui metode geostatistik, seperti analisis semivariogram, yang memungkinkan pemetaan pola spasial karakteristik tanah dan produktivitas lahan secara lebih akurat dibandingkan asumsi keseragaman yang lazim digunakan dalam praktik pertanian konvensional selama ini.

Pemahaman terhadap variabilitas spasial memungkinkan petani dan agronom mengidentifikasi zona-zona lahan dengan potensi

produktivitas berbeda dalam satu hamparan lahan yang sama, sehingga strategi pengelolaan dapat disesuaikan secara spesifik untuk setiap zona guna mengoptimalkan hasil secara keseluruhan. Pendekatan berbasis zona ini terbukti lebih efisien dibandingkan pendekatan pukul rata, karena mampu mengalokasikan sumber daya input produksi secara proporsional sesuai dengan potensi respons masing-masing zona lahan terhadap penambahan input tersebut.

2. Komponen Teknologi Pendukung Pertanian Presisi

Implementasi pertanian presisi memerlukan integrasi berbagai komponen teknologi yang saling mendukung, meliputi sistem penentuan posisi global (*Global Positioning System*/GPS) untuk penentuan lokasi yang akurat, sensor untuk pengumpulan data lahan, perangkat lunak analitik untuk pengolahan data, serta peralatan aplikasi input yang dilengkapi kemampuan variabel rate. Kelima komponen tersebut bekerja secara terintegrasi dalam satu siklus operasional yang berkesinambungan, di mana data yang dikumpulkan pada satu musim tanam akan menjadi masukan bagi perbaikan rekomendasi pada musim tanam berikutnya, sehingga sistem terus mengalami penyempurnaan secara iteratif dari waktu ke waktu.

Ketersediaan sinyal GPS dengan tingkat akurasi tinggi menjadi prasyarat mendasar bagi keberhasilan penerapan pertanian presisi, mengingat seluruh proses pemetaan zona dan aplikasi input bergantung pada ketepatan penentuan lokasi di lapangan. Teknologi *Real-Time Kinematic* (RTK) GPS yang mampu memberikan akurasi hingga tingkat sentimeter semakin banyak diadopsi pada operasi pertanian presisi skala besar, meskipun biayanya masih relatif tinggi sehingga penerapannya di Indonesia masih terbatas pada perusahaan perkebunan besar dan belum menjangkau petani skala kecil secara luas.

3. Dimensi Ekonomi dan Lingkungan Pertanian Presisi

Dimensi ekonomi pertanian presisi tercermin dari kemampuannya meningkatkan efisiensi biaya produksi melalui optimalisasi penggunaan input, sekaligus berpotensi meningkatkan pendapatan petani melalui peningkatan hasil dan kualitas panen yang lebih konsisten. Namun demikian, manfaat ekonomi tersebut perlu dibandingkan secara cermat dengan biaya investasi teknologi yang

diperlukan, termasuk biaya perangkat sensor, perangkat lunak analitik, dan pelatihan sumber daya manusia, guna memastikan bahwa penerapan pertanian presisi benar-benar menghasilkan nilai tambah ekonomi yang positif bagi petani dalam jangka panjang, bukan sekadar investasi teknologi tanpa pengembalian yang jelas.

Dari sisi lingkungan, pertanian presisi berkontribusi terhadap pengurangan dampak negatif aktivitas pertanian melalui optimalisasi penggunaan input kimia yang lebih tepat sasaran, sehingga mengurangi risiko pencemaran air tanah dan badan air permukaan akibat limpasan pupuk dan pestisida berlebih. Sott dan kolega (2020) menegaskan bahwa manfaat lingkungan pertanian presisi sejalan dengan prinsip pertanian berkelanjutan yang menekankan keseimbangan antara pencapaian produktivitas ekonomi dan pelestarian fungsi ekologis lahan pertanian untuk generasi mendatang.

4. Model Ekonomi Penilaian Investasi Pertanian Presisi

Penilaian kelayakan investasi pertanian presisi memerlukan model ekonomi yang mempertimbangkan berbagai komponen biaya, mulai dari biaya perangkat keras seperti sensor dan peralatan aplikasi variabel rate, biaya perangkat lunak analitik, biaya pelatihan sumber daya manusia, hingga biaya pemeliharaan sistem secara berkelanjutan. Sharma, Jain, Gupta, dan Chowdary (2021) menyarankan penggunaan analisis biaya-manfaat (*cost-benefit analysis*) yang membandingkan total biaya kepemilikan teknologi dengan proyeksi manfaat ekonomi yang dihasilkan, termasuk penghematan input produksi dan peningkatan hasil panen, guna memberikan gambaran yang objektif mengenai kelayakan investasi bagi petani sebelum memutuskan untuk mengadopsi teknologi presisi tertentu.

Periode pengembalian investasi pertanian presisi bervariasi tergantung pada skala lahan, jenis komoditas, dan tingkat variabilitas spasial lahan yang dikelola, di mana lahan dengan variabilitas tinggi umumnya menghasilkan manfaat ekonomi yang lebih besar dari penerapan teknologi presisi dibandingkan lahan yang relatif homogen. Pertimbangan ini penting bagi petani dan penyuluh dalam menentukan prioritas lahan yang paling sesuai untuk penerapan awal teknologi presisi, guna memaksimalkan tingkat pengembalian investasi pada tahap

percontohan sebelum perluasan penerapan ke lahan lainnya secara bertahap.

5. Adaptasi Konsep Pertanian Presisi pada Lahan Sempit

Konsep pertanian presisi yang pada awalnya dikembangkan untuk konteks lahan pertanian berskala luas di negara maju memerlukan adaptasi signifikan agar relevan diterapkan pada konteks lahan sempit yang mendominasi struktur agraria Indonesia. Adaptasi tersebut dapat berupa penyederhanaan tingkat kompleksitas teknologi, seperti penggunaan sensor tunggal yang mewakili kondisi keseluruhan lahan sempit alih-alih jaringan sensor yang tersebar pada berbagai titik sebagaimana lazim diterapkan pada lahan luas, tanpa mengurangi esensi dasar pertanian presisi yaitu pengambilan keputusan berbasis data yang akurat dan terukur.

Pendekatan pertanian presisi kolektif pada tingkat kelompok tani atau desa, di mana data dan teknologi dikelola bersama untuk melayani banyak petak lahan sempit milik anggota kelompok, menjadi model adaptasi yang semakin dipertimbangkan sebagai solusi yang lebih realistis bagi konteks Indonesia. Model ini memungkinkan skala ekonomi yang lebih memadai untuk membenarkan investasi teknologi presisi, sekaligus memperkuat kohesi sosial antarpetani dalam mengelola sumber daya teknologi secara bersama-sama dan berkelanjutan.

6. Pertanian Presisi sebagai Bagian dari Bioekonomi Berkelanjutan

Pertanian presisi dapat dipandang sebagai bagian integral dari konsep bioekonomi berkelanjutan yang lebih luas, di mana optimalisasi penggunaan sumber daya biologis dan alam dilakukan secara efisien melalui dukungan teknologi dan ilmu pengetahuan mutakhir. Dalam kerangka ini, pertanian presisi tidak hanya berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas ekonomi jangka pendek, melainkan juga mendukung keberlanjutan jangka panjang siklus produksi pangan melalui pengelolaan sumber daya alam yang lebih bertanggung jawab dan terukur secara ilmiah.

Pengembangan kerangka kebijakan yang mengintegrasikan pertanian presisi ke dalam agenda bioekonomi nasional dapat

memperkuat posisi sektor pertanian sebagai kontributor penting terhadap perekonomian hijau Indonesia, sejalan dengan komitmen nasional dalam mendukung pencapaian target pengurangan emisi gas rumah kaca dan pelestarian keanekaragaman hayati sebagaimana tertuang dalam berbagai kesepakatan internasional yang telah diratifikasi oleh pemerintah Indonesia.

B. Sensor dan Monitoring Lahan

Sensor lahan merupakan komponen fundamental dalam sistem pertanian presisi karena berfungsi sebagai sumber data utama yang merekam kondisi fisik, kimia, dan biologis lahan secara berkelanjutan. Bacco dan kolega, sebagaimana dirujuk dalam kajian Yang dan kolega (2021), menjelaskan bahwa sensor kelembapan tanah, sensor konduktivitas listrik (*electrical conductivity*/EC), dan sensor pH tanah merupakan tiga jenis sensor yang paling umum digunakan untuk memantau kondisi kesuburan dan ketersediaan air tanah secara langsung di lapangan, memberikan data yang jauh lebih akurat dibandingkan metode pengambilan sampel tanah manual yang bersifat periodik dan terbatas cakupannya.

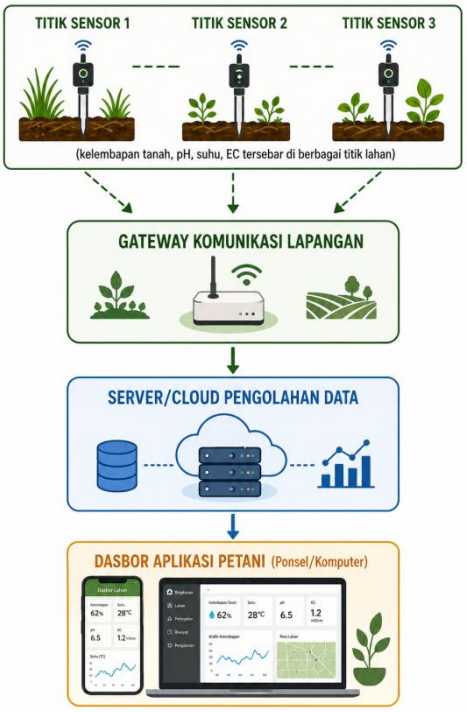
Selain sensor tanah, stasiun cuaca mikro (*micro-weather station*) juga memegang peranan penting dalam sistem monitoring lahan karena mampu merekam data suhu udara, kelembapan relatif, curah hujan, kecepatan angin, dan radiasi matahari secara lokal pada tingkat kebun atau petak lahan tertentu. Data mikroklimat ini sangat bermanfaat untuk memprediksi risiko serangan penyakit tanaman yang dipicu oleh kondisi kelembapan tinggi, menentukan waktu aplikasi pestisida yang optimal, serta mengantisipasi kebutuhan irigasi tambahan pada periode kemarau yang berkepanjangan.

Sistem monitoring lahan modern umumnya mengintegrasikan berbagai jenis sensor ke dalam satu jaringan sensor nirkabel (*wireless sensor network*/WSN) yang mengirimkan data secara berkala ke pusat pengolahan data melalui gateway komunikasi. Data yang terkumpul kemudian ditampilkan dalam bentuk dasbor visual yang dapat diakses petani melalui aplikasi seluler atau komputer, memungkinkan pemantauan kondisi lahan secara real-time bahkan ketika petani berada jauh dari lokasi kebun. Kemudahan akses informasi ini secara signifikan

mengurangi waktu dan tenaga yang sebelumnya diperlukan untuk melakukan pemantauan lahan secara manual dan langsung di lapangan.

Penerapan sistem monitoring lahan telah banyak diadopsi pada berbagai komoditas strategis, termasuk padi, hortikultura, dan perkebunan. Pada budi daya padi misalnya, sensor ketinggian air digunakan untuk mengoptimalkan pengelolaan irigasi berselang (*alternate wetting and drying*) yang terbukti mampu menghemat penggunaan air hingga signifikan sekaligus menekan emisi metana dari lahan sawah tergenang. Pada komoditas hortikultura bernilai ekonomi tinggi, sistem monitoring yang lebih intensif diterapkan mengingat sensitivitas tanaman terhadap fluktuasi kondisi lingkungan yang dapat berdampak langsung terhadap kualitas dan nilai jual produk.

Gambar 6.1 Skema Jaringan Sensor Nirkabel pada Lahan Pertanian



Skema di atas menunjukkan bagaimana data dari berbagai titik sensor yang tersebar di lahan dikumpulkan secara terpusat melalui gateway sebelum diproses dan disajikan kepada petani. Penempatan titik sensor yang representatif terhadap variabilitas lahan menjadi faktor penting agar data yang dihasilkan benar-benar mencerminkan kondisi

aktual seluruh area pertanaman, bukan hanya kondisi pada titik-titik tertentu yang tidak mewakili keseluruhan lahan.

1. Kalibrasi dan Pemeliharaan Sensor Lapangan

Akurasi data yang dihasilkan oleh sensor lahan sangat bergantung pada proses kalibrasi yang tepat dan pemeliharaan rutin, mengingat sensor yang beroperasi pada kondisi lapangan terbuka rentan mengalami penurunan akurasi akibat paparan cuaca ekstrem, kotoran, atau kerusakan fisik akibat aktivitas hewan maupun alat pertanian. Kalibrasi berkala terhadap sensor kelembapan tanah dan pH perlu dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor dengan metode pengukuran laboratorium konvensional secara periodik, guna memastikan data yang dihasilkan tetap dapat diandalkan sebagai dasar pengambilan keputusan agronomis sepanjang musim tanam.

Strategi pemeliharaan sensor yang efektif juga perlu mempertimbangkan aspek keamanan fisik perangkat di lapangan, termasuk perlindungan dari pencurian yang kerap menjadi kendala praktis di beberapa wilayah, serta perlindungan dari kerusakan akibat aktivitas operasional pertanian seperti pengolahan tanah menggunakan traktor. Desain penempatan sensor yang mempertimbangkan aksesibilitas untuk pemeliharaan rutin, namun tetap terlindungi dari potensi gangguan, menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan implementasi sistem monitoring lahan berbasis sensor di lapangan secara berkelanjutan.

2. Sistem Peringatan Dini Berbasis Data Sensor

Integrasi data sensor dengan algoritma analitik memungkinkan pengembangan sistem peringatan dini yang mampu mendeteksi kondisi anomali sebelum berdampak signifikan terhadap produksi tanaman. Sistem ini dapat diprogram untuk mengirimkan notifikasi otomatis kepada petani melalui pesan singkat atau aplikasi seluler ketika parameter tertentu, seperti kelembapan tanah yang turun di bawah ambang batas kritis atau suhu yang melebihi batas toleransi tanaman, terdeteksi oleh jaringan sensor di lapangan, sehingga petani dapat segera mengambil tindakan korektif sebelum kondisi tersebut menyebabkan kerugian yang lebih besar pada tanaman.

Pengembangan ambang batas peringatan yang akurat memerlukan basis data historis yang memadai mengenai respons tanaman terhadap berbagai kondisi lingkungan, yang idealnya dikembangkan melalui kolaborasi antara peneliti agronomi dan pengembang teknologi. Ambang batas yang terlalu sensitif berpotensi menghasilkan terlalu banyak notifikasi yang tidak relevan sehingga menurunkan kepercayaan petani terhadap sistem, sementara ambang batas yang terlalu longgar berisiko gagal mendeteksi kondisi kritis yang sesungguhnya memerlukan tindakan segera dari petani di lapangan.

3. Integrasi Monitoring Lahan dengan Sistem Irigasi Cerdas

Integrasi data monitoring lahan dengan sistem irigasi cerdas merupakan salah satu penerapan paling matang dalam ekosistem pertanian presisi, di mana data kelembapan tanah secara langsung mengendalikan aktivasi pompa atau katup irigasi tanpa memerlukan intervensi manual petani. Sistem ini dapat diprogram dengan berbagai skenario logika kendali, mulai dari ambang batas sederhana hingga model prediktif yang mempertimbangkan prakiraan cuaca dalam menentukan kebutuhan irigasi, sehingga mampu menghindari pemborosan air akibat irigasi yang dilakukan tepat sebelum turun hujan yang telah diprediksi sebelumnya oleh sistem.

Penerapan irigasi cerdas berbasis sensor pada berbagai komoditas hortikultura di Indonesia menunjukkan potensi penghematan penggunaan air yang signifikan dibandingkan metode irigasi konvensional yang mengandalkan jadwal tetap tanpa mempertimbangkan kondisi kelembapan tanah aktual. Penghematan air ini menjadi semakin penting mengingat tantangan ketersediaan air irigasi yang semakin terbatas akibat perubahan iklim dan persaingan pemanfaatan sumber daya air antara sektor pertanian dengan sektor domestik dan industri yang terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan urbanisasi.

4. Pengembangan Sensor Berbiaya Rendah untuk Petani Kecil

Pengembangan sensor pertanian berbiaya rendah menjadi arah riset penting untuk memperluas aksesibilitas teknologi monitoring lahan bagi petani skala kecil yang selama ini terkendala oleh harga perangkat

sensor komersial yang relatif mahal. Beberapa lembaga riset dan komunitas teknologi terbuka (*open-source hardware*) telah mengembangkan desain sensor sederhana berbasis komponen elektronik terjangkau yang dapat dirakit secara mandiri oleh petani atau kelompok tani dengan bimbingan teknis, meskipun tingkat akurasi dan keandalannya perlu terus divalidasi dibandingkan sensor komersial bersertifikasi standar industri.

Skema subsidi atau bantuan pemerintah untuk pengadaan sensor monitoring lahan bagi kelompok tani prioritas juga menjadi salah satu strategi yang dapat mempercepat pemerataan akses teknologi ini, khususnya pada wilayah sentra produksi pangan strategis yang membutuhkan peningkatan efisiensi penggunaan air dan pupuk secara mendesak. Kombinasi antara pengembangan teknologi berbiaya rendah dan dukungan kebijakan subsidi yang tepat sasaran diharapkan mampu mempercepat pemerataan manfaat teknologi monitoring lahan bagi petani kecil di seluruh Indonesia.

5. Masa Depan Sensor Nano untuk Pemantauan Fisiologi Tanaman

Perkembangan teknologi sensor nano (*nanosensor*) membuka peluang baru dalam pemantauan kondisi fisiologis tanaman secara lebih presisi, memungkinkan deteksi perubahan biokimia internal tanaman, seperti tingkat stres akibat kekurangan air atau serangan patogen, jauh sebelum gejala tersebut tampak secara visual pada bagian eksternal tanaman. Meskipun teknologi ini masih berada pada tahap penelitian awal dan belum diterapkan secara komersial secara luas, potensinya untuk merevolusi sistem monitoring pertanian presisi di masa depan sangat besar mengingat kemampuannya memberikan informasi diagnostik yang jauh lebih dini dibandingkan metode pemantauan konvensional yang ada saat ini.

Riset mengenai aplikasi sensor nano dalam pertanian di Indonesia masih sangat terbatas dan memerlukan investasi jangka panjang dari lembaga riset nasional untuk dapat mengejar ketertinggalan dengan negara-negara maju yang telah lebih dahulu mengembangkan teknologi ini. Kolaborasi riset internasional di bidang nanoteknologi pertanian dapat menjadi jalur strategis bagi Indonesia untuk

mempercepat penguasaan teknologi mutakhir ini tanpa harus memulai riset dari titik nol secara mandiri.

C. Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) atau *Geographic Information System* (GIS) merupakan sistem berbasis komputer yang dirancang untuk mengumpulkan, menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menampilkan data yang memiliki referensi spasial atau geografis. Dalam konteks pertanian presisi, SIG berperan sebagai platform integrasi yang menghubungkan berbagai sumber data spasial, seperti data topografi, jenis tanah, tutupan lahan, dan hasil pengukuran sensor lapangan, ke dalam satu sistem pemetaan yang komprehensif untuk mendukung perencanaan dan pengambilan keputusan berbasis lokasi secara lebih akurat dan sistematis.

Aplikasi SIG dalam pertanian mencakup berbagai fungsi strategis, di antaranya pemetaan kesesuaian lahan (*land suitability mapping*) untuk menentukan komoditas yang paling optimal dibudidayakan pada suatu wilayah berdasarkan karakteristik agroklimat dan jenis tanah, zonasi wilayah pengembangan pertanian, serta analisis risiko bencana pertanian seperti kekeringan dan banjir. Kemampuan SIG dalam melakukan analisis tumpang susun (*overlay analysis*) memungkinkan pengambil kebijakan mengombinasikan berbagai lapisan data spasial secara simultan untuk menghasilkan peta komposit yang memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi dan kendala suatu wilayah pertanian.

Salah satu keunggulan utama SIG dalam mendukung pertanian presisi adalah kemampuannya mengintegrasikan data dari berbagai sumber teknologi lain, seperti data sensor IoT, citra *drone*, dan citra satelit penginderaan jauh, ke dalam satu platform pemetaan yang terpadu. Integrasi ini memungkinkan terciptanya peta zona manajemen (*management zone map*) yang membagi lahan pertanian menjadi beberapa zona berdasarkan tingkat kesamaan karakteristik, seperti kesuburan tanah dan produktivitas historis, sehingga rekomendasi perlakuan budi daya dapat disesuaikan secara spesifik untuk setiap zona tersebut.

Di tingkat kebijakan, pemanfaatan SIG turut mendukung perencanaan tata guna lahan pertanian secara makro, termasuk penetapan Lahan Pertanian Pangan Berkelanjutan (LP2B) yang bertujuan melindungi lahan pertanian produktif dari ancaman alih fungsi lahan akibat ekspansi kawasan permukiman dan industri. Ketersediaan basis data spasial yang akurat dan mutakhir menjadi prasyarat penting agar kebijakan perlindungan lahan pertanian dapat diimplementasikan secara efektif dan dapat dipantau perkembangannya secara berkelanjutan oleh instansi pemerintah terkait di tingkat pusat maupun daerah.

1. Analisis Spasial dan Pemodelan Kesesuaian Lahan

Analisis kesesuaian lahan menggunakan SIG melibatkan proses pembobotan dan tumpang susun berbagai lapisan data spasial, seperti kemiringan lereng, jenis tanah, curah hujan, dan ketersediaan sumber air, untuk menghasilkan klasifikasi tingkat kesesuaian lahan bagi komoditas tertentu, mulai dari kategori sangat sesuai hingga tidak sesuai. Metode pembobotan dapat dilakukan melalui pendekatan kuantitatif seperti *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang melibatkan penilaian pakar untuk menentukan tingkat kepentingan relatif setiap parameter dalam menentukan kesesuaian lahan bagi jenis komoditas pertanian yang berbeda-beda karakteristik agroklimatnya.

Hasil analisis kesesuaian lahan menjadi dasar penting bagi perencanaan pengembangan kawasan pertanian, baik pada tingkat kebijakan makro pemerintah daerah maupun pada tingkat keputusan mikro petani dalam menentukan jenis komoditas yang akan dibudidayakan pada lahan miliknya. Pemanfaatan hasil analisis ini secara optimal dapat mencegah kesalahan alokasi lahan yang berpotensi menyebabkan kegagalan usaha tani akibat penanaman komoditas yang tidak sesuai dengan karakteristik agroklimat setempat, sehingga meminimalkan risiko kerugian ekonomi bagi petani maupun pemborosan sumber daya lahan yang seharusnya dapat dioptimalkan penggunaannya.

2. Pemanfaatan SIG Berbasis Web dan Partisipatif

Perkembangan teknologi SIG berbasis web (*web-GIS*) memungkinkan akses informasi spasial pertanian secara lebih luas dan interaktif melalui peramban internet, tanpa memerlukan perangkat lunak

SIG khusus yang umumnya berbiaya mahal dan memerlukan keahlian teknis tinggi untuk mengoperasikannya. Platform web-GIS pertanian memungkinkan berbagai pemangku kepentingan, mulai dari petani, penyuluh, hingga pengambil kebijakan, mengakses peta interaktif mengenai kondisi lahan, prakiraan cuaca, dan rekomendasi budi daya secara real-time melalui perangkat komputer maupun telepon pintar yang terhubung dengan jaringan internet.

Pendekatan SIG partisipatif (*participatory GIS*) turut berkembang sebagai metode yang melibatkan pengetahuan lokal petani dalam proses pemetaan, di mana petani diajak berkontribusi memberikan informasi mengenai kondisi lahan yang mereka ketahui secara mendalam berdasarkan pengalaman bertani bertahun-tahun, yang kemudian diintegrasikan dengan data spasial formal untuk menghasilkan peta yang lebih akurat dan relevan dengan konteks lokal. Pendekatan ini juga berkontribusi terhadap peningkatan rasa kepemilikan petani terhadap teknologi pemetaan yang dikembangkan, karena mereka dilibatkan secara aktif sejak tahap awal pengumpulan data.

3. Tantangan Ketersediaan dan Interoperabilitas Data Spasial

Tantangan utama pemanfaatan SIG dalam perencanaan pertanian di Indonesia terletak pada keterbatasan ketersediaan data spasial yang mutakhir dan akurat, terutama pada skala detail yang diperlukan untuk perencanaan di tingkat lahan individual petani. Banyak data spasial dasar, seperti peta jenis tanah dan peta topografi detail, masih menggunakan survei lama yang belum diperbarui secara berkala, sehingga tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi lahan terkini yang telah mengalami berbagai perubahan akibat aktivitas pertanian maupun alih fungsi lahan selama bertahun-tahun terakhir.

Permasalahan interoperabilitas data antarlembaga pemerintah turut menjadi kendala signifikan, mengingat berbagai instansi seringkali mengembangkan basis data spasial secara terpisah dengan format dan standar yang berbeda-beda, sehingga menyulitkan proses integrasi data untuk analisis yang komprehensif. Diperlukan kebijakan satu data spasial nasional yang mewajibkan standardisasi format dan interoperabilitas data antarlembaga, guna mendukung pemanfaatan SIG yang lebih optimal dalam perencanaan pembangunan pertanian di seluruh wilayah Indonesia secara terintegrasi dan efisien.

4. Pemanfaatan SIG untuk Manajemen Risiko Bencana Pertanian

Pemanfaatan SIG dalam manajemen risiko bencana pertanian memungkinkan pemetaan wilayah rawan bencana, seperti banjir, kekeringan, dan tanah longsor, yang menjadi dasar penting dalam perencanaan mitigasi dan adaptasi sektor pertanian terhadap risiko iklim. Peta risiko bencana yang dihasilkan melalui analisis tumpang susun berbagai parameter, seperti curah hujan historis, topografi, dan jenis tanah, dapat digunakan untuk menentukan prioritas wilayah yang memerlukan intervensi infrastruktur mitigasi, seperti pembangunan tanggul atau sistem drainase, guna melindungi lahan pertanian produktif dari ancaman bencana yang berpotensi merugikan produksi pangan secara signifikan.

Integrasi SIG dengan sistem peringatan dini bencana memungkinkan diseminasi informasi risiko kepada petani secara lebih tepat sasaran berdasarkan lokasi geografis spesifik mereka, dibandingkan penyebaran informasi peringatan secara umum yang tidak mempertimbangkan variasi tingkat risiko antarwilayah. Pendekatan berbasis lokasi ini meningkatkan efektivitas respons petani terhadap peringatan dini, karena informasi yang diterima lebih relevan dan spesifik dengan kondisi risiko yang dihadapi pada lahan mereka masing-masing.

5. Pengembangan Kapasitas SDM dalam Pemanfaatan SIG Pertanian

Pemanfaatan SIG secara optimal dalam perencanaan pertanian memerlukan dukungan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi teknis memadai dalam pengoperasian perangkat lunak SIG dan interpretasi data spasial, yang saat ini masih terbatas jumlahnya pada instansi pemerintah daerah di berbagai wilayah Indonesia. Pengembangan program pelatihan SIG pertanian yang menyasar staf dinas pertanian dan penyuluh di tingkat kabupaten menjadi kebutuhan mendesak untuk memastikan pemanfaatan teknologi SIG yang telah diinvestasikan pemerintah dapat dimanfaatkan secara optimal dalam mendukung perencanaan pembangunan pertanian daerah.

Kemitraan dengan perguruan tinggi yang memiliki program studi terkait penginderaan jauh dan SIG dapat menjadi sumber dukungan

teknis bagi pemerintah daerah dalam membangun kapasitas internal pemanfaatan SIG pertanian, baik melalui program pelatihan bersama maupun penempatan mahasiswa magang yang dapat membantu pengolahan dan analisis data spasial pertanian di tingkat daerah sekaligus memberikan pengalaman praktis yang berharga bagi mahasiswa dalam menerapkan ilmu yang dipelajari di bangku kuliah.

D. *Drone* untuk Pertanian

Pesawat nirawak atau *drone* (*Unmanned Aerial Vehicle*/UAV) telah menjadi salah satu instrumen penting dalam pertanian presisi karena kemampuannya melakukan pemantauan lahan secara cepat, efisien, dan mampu menjangkau area yang luas dalam waktu singkat dibandingkan metode survei lapangan konvensional. Radoglou-Grammatikis, Sarigiannidis, Lagkas, dan Moscholios (2020) mengklasifikasikan *drone* pertanian ke dalam dua kategori utama berdasarkan desainnya, yaitu *drone* multirotor yang unggul dalam manuverabilitas dan cocok untuk pemantauan area sempit dengan presisi tinggi, serta *drone* sayap tetap (*fixed-wing*) yang mampu menempuh jarak jelajah lebih jauh dan cocok digunakan untuk pemetaan lahan berskala luas seperti perkebunan besar.

Aplikasi *drone* dalam pertanian sangat beragam, meliputi pemetaan lahan untuk menghasilkan peta topografi dan peta zona manajemen dengan resolusi tinggi, penyemprotan presisi (*precision spraying*) yang mampu mengaplikasikan pestisida atau pupuk cair secara tepat sasaran hanya pada area yang membutuhkan, serta pemantauan kesehatan tanaman melalui analisis indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) yang dihasilkan dari kamera multispektral yang terpasang pada *drone*. Radoglou-Grammatikis dan kolega (2020) mencatat bahwa penggunaan *drone* untuk penyemprotan presisi mampu mengurangi konsumsi bahan kimia pertanian secara signifikan dibandingkan metode penyemprotan konvensional menggunakan alat manual atau traktor sprayer.

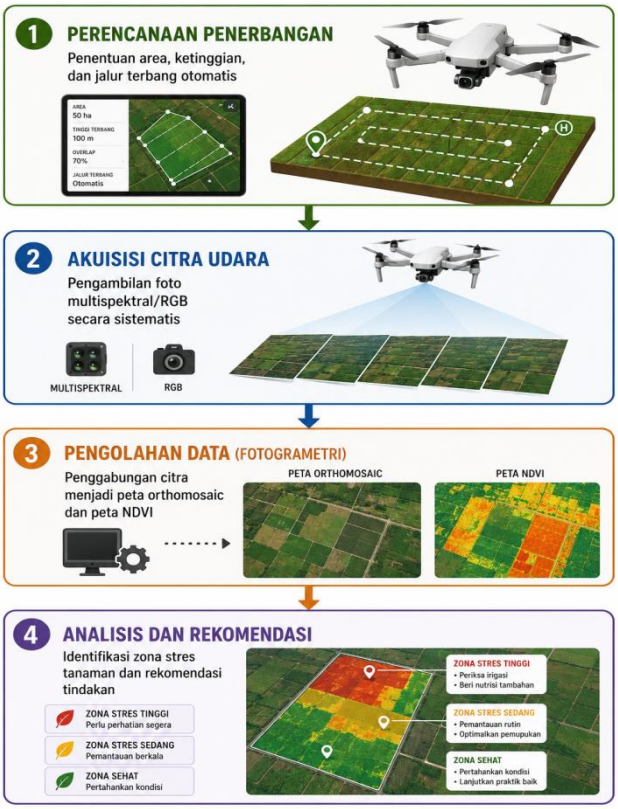
Gambar 6.2 *Drone* untuk Pertanian



Di Indonesia, regulasi penggunaan *drone* untuk keperluan pertanian diatur dalam kerangka peraturan penerbangan yang lebih luas mengenai pesawat udara tanpa awak, yang mewajibkan operator memenuhi persyaratan tertentu terkait ketinggian terbang, zona operasi, serta sertifikasi kompetensi pilot *drone* guna menjamin keselamatan penerbangan dan menghindari gangguan terhadap lalu lintas udara komersial. Kepatuhan terhadap regulasi ini menjadi aspek penting yang perlu diperhatikan oleh penyedia jasa dan petani yang hendak memanfaatkan teknologi *drone* secara legal dan bertanggung jawab dalam kegiatan operasional pertanian mereka.

Sekalipun manfaatnya signifikan, penerapan *drone* pertanian di lapangan masih menghadapi berbagai tantangan operasional, di antaranya ketergantungan pada kondisi cuaca yang stabil untuk penerbangan yang aman, keterbatasan daya baterai yang membatasi durasi dan cakupan area operasi dalam satu kali penerbangan, tingginya biaya investasi perangkat dan perangkat lunak pengolah citra, serta kebutuhan keterampilan teknis khusus bagi operator dalam mengoperasikan *drone* dan menginterpretasikan data citra yang dihasilkan secara akurat untuk keperluan pengambilan keputusan agronomis.

Gambar 6.3 Alur Kerja Pemetaan Lahan Menggunakan *Drone* Pertanian



Alur kerja tersebut menegaskan bahwa pemanfaatan *drone* tidak berhenti pada tahap pengambilan citra semata, melainkan memerlukan proses pengolahan dan analisis lanjutan agar data mentah dapat diterjemahkan menjadi informasi yang bermakna dan dapat ditindaklanjuti oleh petani maupun agronom di lapangan secara langsung.

1. Sensor Multispektral dan Hiperspektral pada *Drone* Pertanian

Kemampuan *drone* dalam mendukung pertanian presisi sangat bergantung pada jenis sensor yang terpasang, di mana kamera multispektral yang mampu menangkap pantulan cahaya pada beberapa panjang gelombang spesifik, termasuk inframerah dekat, menjadi standar umum untuk menghasilkan indeks vegetasi seperti NDVI. Perkembangan lebih lanjut menghadirkan sensor hiperspektral yang mampu menangkap ratusan pita panjang gelombang sekaligus, memberikan informasi yang jauh lebih detail mengenai kondisi biokimia

tanaman, seperti kandungan klorofil dan status nutrisi, meskipun biaya perangkat dan kompleksitas pengolahan datanya masih jauh lebih tinggi dibandingkan sensor multispektral konvensional.

Selain sensor optik, beberapa *drone* pertanian tingkat lanjut juga dilengkapi dengan sensor termal yang mampu mendeteksi variasi suhu permukaan tanaman, yang bermanfaat untuk mengidentifikasi tingkat stres air pada tanaman sebelum gejala kekurangan air tampak secara visual pada dedaunan. Radoglou-Grammatikis, Sarigiannidis, Lagkas, dan Moscholios (2020) mencatat bahwa kombinasi berbagai jenis sensor pada satu platform *drone* memungkinkan analisis kondisi tanaman yang lebih komprehensif, meskipun memerlukan kapasitas baterai yang lebih besar akibat peningkatan beban perangkat yang harus diangkut oleh *drone* selama misi penerbangan.

2. Perencanaan Misi dan Pengolahan Data Fotogrametri

Perencanaan misi penerbangan *drone* yang efektif memerlukan pertimbangan cermat terhadap parameter teknis, termasuk ketinggian terbang yang memengaruhi resolusi citra yang dihasilkan, tingkat tumpang tindih antarfoto (*overlap*) yang diperlukan untuk proses penggabungan citra secara akurat, serta kecepatan angin dan kondisi pencahayaan yang memengaruhi kualitas citra yang diperoleh. Perangkat lunak perencanaan misi otomatis umumnya memungkinkan operator menentukan area cakupan pada peta digital, yang kemudian secara otomatis menghasilkan jalur terbang optimal bagi *drone* untuk mencakup seluruh area target secara efisien dalam satu kali penerbangan.

Tahap pengolahan data pascapenerbangan menggunakan teknik fotogrametri untuk menggabungkan ratusan hingga ribuan foto individual menjadi satu peta orthomosaic yang terkoreksi secara geometris dan dapat digunakan untuk pengukuran jarak dan luas area secara akurat. Proses ini memerlukan perangkat lunak khusus dan kapasitas komputasi yang memadai, mengingat volume data citra yang dihasilkan dari satu misi penerbangan *drone* dapat mencapai puluhan gigabyte, sehingga infrastruktur komputasi yang andal menjadi prasyarat penting bagi operasional layanan pemetaan *drone* pertanian secara profesional dan efisien.

3. Model Bisnis Layanan *Drone* Pertanian di Indonesia

Mengingat tingginya biaya investasi perangkat *drone* beserta perangkat lunak pengolah data, model bisnis layanan *drone* berbasis penyewaan atau jasa (*drone-as-a-service*) berkembang sebagai alternatif yang lebih terjangkau bagi petani dan kelompok tani di Indonesia dibandingkan kepemilikan langsung. Penyedia jasa *drone* pertanian umumnya menawarkan paket layanan mulai dari pemetaan lahan, penyemprotan presisi, hingga analisis kesehatan tanaman, yang dapat diakses oleh petani sesuai kebutuhan tanpa harus menanggung biaya investasi dan pemeliharaan perangkat secara mandiri.

Pertumbuhan model bisnis jasa *drone* pertanian di Indonesia turut didorong oleh peningkatan kesadaran petani skala menengah dan perusahaan perkebunan mengenai manfaat ekonomi dari penerapan penyemprotan presisi berbasis *drone*, yang terbukti mampu mengurangi konsumsi bahan kimia pertanian sekaligus mempercepat proses penyemprotan dibandingkan metode manual atau menggunakan traktor sprayer konvensional yang memerlukan waktu lebih lama untuk mencakup area lahan yang luas, terutama pada kondisi lahan dengan aksesibilitas terbatas bagi kendaraan darat.

4. Integrasi *Drone* dengan Sistem Robotika Darat

Perkembangan terkini menunjukkan tren integrasi antara *drone* udara dengan robot darat (*ground robot*) dalam satu sistem operasi terkoordinasi, di mana *drone* berperan melakukan pemantauan awal untuk mengidentifikasi area yang memerlukan tindakan, seperti zona dengan indikasi serangan hama, sementara robot darat kemudian dikerahkan untuk melaksanakan tindakan intervensi secara lebih presisi pada titik lokasi yang telah teridentifikasi oleh *drone*. Kombinasi kedua platform ini memungkinkan efisiensi operasional yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan satu jenis platform saja, karena masing-masing platform memiliki keunggulan komplementer dalam hal cakupan area dan presisi tindakan yang dapat dilakukan.

Pengembangan sistem koordinasi otomatis antara *drone* dan robot darat memerlukan infrastruktur komunikasi dan pemrosesan data yang andal, mengingat kedua platform tersebut perlu bertukar informasi secara real-time agar tindakan robot darat dapat disesuaikan secara tepat dengan hasil pemantauan *drone* yang terbaru. Riset mengenai integrasi

multi-platform semacam ini masih terus berkembang dan diproyeksikan menjadi arah utama pengembangan teknologi otomasi pertanian pada dekade mendatang seiring dengan semakin matangnya teknologi komunikasi antarperangkat otonom.

E. Remote Sensing dan Satelit

Penginderaan jauh (*remote sensing*) merupakan teknik pengumpulan informasi mengenai suatu objek atau area tanpa kontak fisik langsung, umumnya melalui sensor yang terpasang pada satelit atau wahana udara lainnya. Dalam konteks pertanian, penginderaan jauh satelit memberikan keunggulan berupa cakupan area yang sangat luas hingga tingkat regional atau nasional serta kemampuan pemantauan berkala (*multi-temporal monitoring*) yang memungkinkan analisis perubahan kondisi lahan pertanian dari waktu ke waktu secara konsisten dan sistematis tanpa keterbatasan aksesibilitas fisik ke lokasi lapangan yang sering dijumpai pada metode survei konvensional.

Berbagai satelit penginderaan jauh telah dimanfaatkan secara luas untuk aplikasi pertanian, di antaranya satelit *Landsat* seri terbaru yang dikembangkan oleh Badan Antariksa Amerika Serikat (NASA) serta satelit *Sentinel-2* yang dikembangkan oleh Badan Antariksa Eropa (ESA). Kedua satelit tersebut menyediakan citra multispektral dengan resolusi spasial dan temporal yang memadai untuk mendukung berbagai analisis pertanian, termasuk pemantauan indeks vegetasi, estimasi luas areal tanam, dan deteksi anomali pertumbuhan tanaman pada skala yang luas dengan biaya akses data yang relatif terjangkau karena bersifat gratis dan terbuka bagi publik.

Indeks vegetasi seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Enhanced Vegetation Index* (EVI) merupakan indikator turunan dari citra satelit yang secara luas digunakan untuk memantau kesehatan dan kerapatan kanopi tanaman. Nilai NDVI yang tinggi umumnya mengindikasikan kondisi vegetasi yang sehat dan rimbun, sementara nilai yang rendah dapat mengindikasikan tekanan lingkungan seperti kekeringan, serangan hama, atau kekurangan hara. Pemantauan indeks vegetasi secara berkala memungkinkan deteksi dini terhadap anomali pertumbuhan tanaman sebelum gejala tersebut tampak secara visual oleh mata manusia di lapangan.

Aplikasi lain dari penginderaan jauh satelit dalam pertanian meliputi estimasi luas panen dan prediksi produksi pada skala regional maupun nasional, yang sangat bermanfaat bagi pemerintah dalam menyusun kebijakan ketahanan pangan dan pengelolaan stok pangan strategis. Selain itu, citra satelit juga dimanfaatkan untuk pemantauan kekeringan melalui analisis indeks kekeringan berbasis suhu permukaan tanah dan kelembapan vegetasi, sehingga memungkinkan sistem peringatan dini bencana pertanian yang dapat membantu pemerintah dan petani mengantisipasi dampak buruk kekeringan terhadap produksi pangan secara lebih responsif.

1. Prinsip Kerja dan Interpretasi Indeks Vegetasi

Indeks vegetasi seperti NDVI dihitung berdasarkan perbandingan pantulan cahaya inframerah dekat dan cahaya merah yang diserap oleh klorofil tanaman, di mana tanaman yang sehat dengan kandungan klorofil tinggi akan memantulkan cahaya inframerah dekat secara kuat namun menyerap cahaya merah secara intensif, menghasilkan nilai NDVI yang tinggi mendekati angka satu. Sebaliknya, area dengan vegetasi jarang atau tanaman yang mengalami tekanan akibat kekeringan, penyakit, atau kekurangan nutrisi akan menunjukkan pola pantulan yang berbeda, menghasilkan nilai NDVI yang lebih rendah dan menjadi indikator awal bagi petani untuk melakukan investigasi lebih lanjut di lapangan.

Interpretasi nilai indeks vegetasi perlu dilakukan secara kontekstual dengan mempertimbangkan jenis tanaman, tahap pertumbuhan, dan kondisi agroklimat setempat, mengingat nilai ambang batas normal dapat bervariasi antarkomoditas dan antarwilayah. Pengembangan basis data referensi nilai NDVI spesifik untuk komoditas dan wilayah tertentu di Indonesia menjadi kebutuhan penting agar interpretasi data penginderaan jauh dapat memberikan rekomendasi yang benar-benar akurat dan relevan dengan kondisi pertanian lokal, bukan sekadar mengadopsi standar interpretasi yang dikembangkan untuk kondisi pertanian di negara lain dengan karakteristik agroklimat yang berbeda.

2. Pemanfaatan Data Satelit untuk Estimasi Produksi Nasional

Pemerintah Indonesia telah memanfaatkan data penginderaan jauh satelit untuk mendukung sistem estimasi luas panen dan produksi padi nasional secara lebih akurat dan tepat waktu dibandingkan metode survei lapangan konvensional yang memerlukan waktu lebih lama dan cakupan yang terbatas. Pendekatan berbasis citra satelit memungkinkan pemantauan kondisi pertanaman padi secara berkala di seluruh wilayah Indonesia, sehingga informasi mengenai potensi produksi dapat diperoleh lebih awal untuk mendukung perencanaan kebijakan stok pangan dan stabilisasi harga oleh pemerintah secara lebih responsif terhadap dinamika kondisi pertanaman aktual di lapangan.

Integrasi data satelit dengan data statistik pertanian konvensional dari survei lapangan menghasilkan estimasi yang lebih akurat melalui pendekatan kalibrasi silang, di mana data satelit memberikan cakupan spasial yang luas sementara data survei lapangan memberikan validasi *ground-truth* pada titik-titik sampel tertentu. Kombinasi kedua sumber data ini menjadi praktik yang semakin umum diterapkan oleh lembaga statistik pertanian di berbagai negara, termasuk Indonesia, guna menghasilkan angka estimasi produksi yang lebih dapat diandalkan sebagai dasar perumusan kebijakan ketahanan pangan nasional.

3. Pemantauan Bencana dan Risiko Iklim Berbasis Satelit

Data penginderaan jauh satelit memainkan peran penting dalam sistem pemantauan bencana pertanian, termasuk deteksi area terdampak kekeringan melalui analisis indeks kekeringan berbasis suhu permukaan tanah dan kelembapan vegetasi, serta deteksi area terdampak banjir melalui analisis citra radar yang mampu menembus tutupan awan, sehingga tetap dapat memberikan informasi kondisi lahan sekalipun pada kondisi cuaca mendung yang sering menghambat pengambilan citra optik konvensional pada periode musim hujan di Indonesia.

Sistem peringatan dini berbasis data satelit memungkinkan pemerintah dan petani mengambil langkah antisipatif terhadap potensi gagal panen akibat bencana iklim, seperti penyesuaian jadwal tanam, penyediaan bantuan benih tahan kekeringan, atau persiapan pompa air tambahan pada wilayah yang teridentifikasi berisiko tinggi mengalami kekurangan air pada musim tanam mendatang berdasarkan analisis tren data satelit multiwaktu. Kombinasi data satelit dengan model prediksi

iklim jangka menengah semakin meningkatkan akurasi sistem peringatan dini ini dalam mendukung ketahanan pangan nasional secara berkelanjutan.

4. Pemanfaatan Data Satelit untuk Verifikasi Klaim Keberlanjutan

Data penginderaan jauh satelit semakin banyak dimanfaatkan untuk memverifikasi klaim keberlanjutan produk pertanian, khususnya terkait persyaratan bebas deforestasi yang semakin diberlakukan secara ketat oleh negara-negara importir utama komoditas perkebunan Indonesia. Analisis citra satelit multiwaktu memungkinkan verifikasi independen mengenai riwayat tutupan lahan suatu area produksi, sehingga dapat memastikan bahwa komoditas yang diekspor benar-benar berasal dari lahan yang tidak mengalami deforestasi setelah tanggal batas waktu yang ditetapkan dalam regulasi negara pengimpor.

Pengembangan sistem verifikasi berbasis satelit yang terintegrasi dengan basis data legalitas lahan nasional menjadi kebutuhan mendesak bagi Indonesia untuk mempertahankan akses pasar ekspor komoditas perkebunan strategis di tengah semakin ketatnya regulasi keberlanjutan internasional. Investasi dalam kapasitas nasional untuk pengolahan dan analisis data satelit skala besar ini penting agar Indonesia tidak sepenuhnya bergantung pada lembaga verifikasi asing dalam memenuhi persyaratan ketertelusuran yang dituntut oleh pasar global.

F. Variable Rate Technology

Variable Rate Technology (VRT) merupakan teknologi yang memungkinkan aplikasi input produksi pertanian, seperti benih, pupuk, dan pestisida, dilakukan dengan dosis yang bervariasi secara otomatis sesuai dengan kebutuhan spesifik pada setiap titik lokasi di dalam suatu lahan, berbeda dengan pendekatan konvensional yang menerapkan dosis seragam pada keseluruhan area. Sistem *variable rate technology* umumnya terintegrasi dengan peta zona manajemen yang dihasilkan dari analisis data sensor, citra satelit, atau *drone*, sehingga aplikator dapat menyesuaikan laju aplikasi input secara otomatis ketika peralatan bergerak melintasi zona-zona lahan dengan karakteristik yang berbeda.

Terdapat beberapa jenis penerapan *variable rate technology* yang umum digunakan dalam praktik pertanian presisi, meliputi *variable rate technology* pemupukan yang menyesuaikan dosis pupuk berdasarkan peta kesuburan tanah, *variable rate technology* penanaman benih yang mengatur kerapatan tanam sesuai dengan potensi produktivitas setiap zona lahan, serta *variable rate technology* aplikasi pestisida yang mengoptimalkan dosis bahan kimia perlindungan tanaman berdasarkan tingkat risiko serangan hama pada masing-masing zona. Ketiga jenis penerapan tersebut umumnya memanfaatkan sistem kendali berbasis GPS presisi tinggi yang terintegrasi dengan peralatan aplikator, seperti penabur pupuk atau penyemprot pestisida yang dilengkapi katup pengatur laju aliran otomatis.

Integrasi *variable rate technology* dengan peta zona manajemen (*management zone map*) menjadi fondasi utama keberhasilan implementasi teknologi ini. Peta zona manajemen dihasilkan melalui proses klasifikasi lahan berdasarkan kesamaan karakteristik, seperti tekstur tanah, tingkat kesuburan, dan produktivitas historis, yang kemudian diterjemahkan menjadi peta resep (*prescription map*) yang berisi instruksi dosis aplikasi spesifik untuk setiap zona. Peta resep tersebut selanjutnya dimuat ke dalam sistem kendali peralatan pertanian yang secara otomatis menyesuaikan laju aplikasi input ketika peralatan bergerak melintasi berbagai zona lahan yang telah dipetakan sebelumnya.

Manfaat ekonomi dan lingkungan dari penerapan *variable rate technology* telah banyak dibuktikan melalui berbagai kajian empiris, termasuk penghematan biaya input produksi melalui pengurangan pemborosan pupuk dan pestisida pada zona lahan yang sesungguhnya tidak memerlukan dosis tinggi, peningkatan hasil panen melalui optimalisasi input pada zona yang responsif terhadap penambahan input, serta pengurangan dampak lingkungan negatif akibat aplikasi input kimia yang berlebihan, seperti pencemaran air tanah dan emisi gas rumah kaca dari proses produksi dan aplikasi pupuk nitrogen sintetis yang tidak terserap optimal oleh tanaman.

1. Teknologi Pengendali *Variable Rate Technology* pada Alat Aplikasi Pupuk

Peralatan aplikasi pupuk yang dilengkapi teknologi *variable rate technology* umumnya menggunakan sistem kendali elektronik yang terhubung dengan penerima GPS dan unit pemroses yang membaca peta resep aplikasi secara real-time saat peralatan bergerak melintasi lahan. Sistem ini secara otomatis menyesuaikan bukaan katup atau kecepatan putaran piringan penabur pupuk untuk mengubah dosis aplikasi sesuai dengan zona yang sedang dilintasi, tanpa memerlukan operator menghentikan atau memperlambat laju peralatan, sehingga proses pemupukan tetap dapat berjalan efisien meskipun dosis aplikasi bervariasi secara dinamis sepanjang lintasan yang dilalui.

Kalibrasi sistem *variable rate technology* sebelum penggunaan menjadi tahapan krusial untuk memastikan akurasi dosis yang diaplikasikan sesuai dengan rekomendasi peta resep, mengingat perbedaan karakteristik fisik pupuk seperti densitas dan ukuran butiran dapat memengaruhi laju aliran material yang keluar dari peralatan aplikator. Kesalahan kalibrasi berpotensi menyebabkan aplikasi dosis yang tidak sesuai dengan rekomendasi, yang pada akhirnya dapat mengurangi manfaat ekonomi dan lingkungan yang seharusnya diperoleh dari penerapan teknologi *variable rate technology* dalam sistem pertanian presisi secara keseluruhan.

2. Penerapan *Variable Rate Technology* pada Sistem Irigasi Presisi

Selain aplikasi pada pemupukan dan penanaman benih, prinsip *variable rate technology* juga diterapkan pada sistem irigasi presisi yang mengatur volume air secara bervariasi berdasarkan kebutuhan spesifik setiap zona lahan, mempertimbangkan perbedaan kapasitas menahan air tanah dan tingkat evapotranspirasi tanaman pada masing-masing zona. Sistem irigasi *variable rate technology* umumnya diintegrasikan dengan jaringan sensor kelembapan tanah dan model neraca air tanaman, sehingga mampu memberikan volume irigasi yang optimal bagi setiap zona tanpa menyebabkan pemborosan air pada zona yang memiliki kapasitas retensi air alami yang lebih baik.

Penerapan irigasi *variable rate technology* pada lahan dengan topografi yang bervariasi memberikan manfaat khusus, mengingat area dengan kemiringan lebih curam umumnya mengalami limpasan air yang

lebih cepat dan memerlukan volume irigasi yang berbeda dibandingkan area datar dengan drainase lebih lambat. Kemampuan menyesuaikan volume irigasi secara spasial ini menjadikan *variable rate technology* sebagai instrumen penting dalam strategi konservasi air pertanian, khususnya pada wilayah yang menghadapi tantangan keterbatasan sumber daya air akibat perubahan pola curah hujan yang semakin tidak menentu akibat perubahan iklim global.

3. Tantangan Adopsi *Variable Rate Technology* pada Lahan Pertanian Berskala Kecil

Adopsi *variable rate technology* pada konteks pertanian berskala kecil di Indonesia menghadapi tantangan tersendiri, mengingat teknologi ini pada dasarnya dirancang untuk lahan berskala luas yang memungkinkan variasi zona manajemen yang signifikan secara ekonomis. Pada lahan sempit dengan luas kurang dari satu hektare, variabilitas spasial mungkin tidak cukup signifikan untuk membenarkan investasi teknologi *variable rate technology* secara individual, sehingga pendekatan alternatif seperti penerapan *variable rate technology* secara kolektif pada skala hamparan lahan gabungan beberapa petani dalam satu wilayah menjadi opsi yang lebih realistis untuk dikembangkan di Indonesia.

Pengembangan model *variable rate technology* yang disesuaikan dengan konteks lahan sempit dan terfragmentasi menjadi arah penelitian yang penting bagi lembaga riset pertanian Indonesia, termasuk kemungkinan pengembangan peralatan aplikasi berskala kecil yang lebih terjangkau namun tetap mempertahankan prinsip dasar variabilitas dosis sesuai kebutuhan zona lahan. Inovasi teknologi tepat guna semacam ini diperlukan agar manfaat pertanian presisi tidak hanya dapat dinikmati oleh perusahaan perkebunan besar, melainkan juga dapat menjangkau mayoritas petani kecil yang menjadi tulang punggung produksi pangan nasional Indonesia.

4. Manfaat *Variable Rate Technology* dalam Mendukung Pertanian Rendah Emisi

Penerapan *variable rate technology* berkontribusi signifikan terhadap agenda mitigasi perubahan iklim melalui pengurangan emisi gas rumah kaca yang dihasilkan dari proses produksi dan aplikasi pupuk

nitrogen sintetis yang tidak terserap optimal oleh tanaman, mengingat kelebihan aplikasi nitrogen yang tidak diserap tanaman berpotensi teremisi ke atmosfer dalam bentuk gas dinitrogen oksida yang memiliki potensi pemanasan global jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida. Optimalisasi dosis pupuk melalui *variable rate technology* secara langsung berkontribusi terhadap penurunan jejak karbon sektor pertanian, yang menjadi salah satu sektor penyumbang emisi gas rumah kaca signifikan di banyak negara.

Potensi kontribusi *variable rate technology* terhadap agenda rendah emisi ini membuka peluang bagi petani untuk berpartisipasi dalam skema perdagangan karbon atau insentif hijau lainnya, di mana pengurangan emisi yang terverifikasi dari praktik pertanian presisi dapat dikonversi menjadi nilai ekonomi tambahan bagi petani. Pengembangan metodologi verifikasi pengurangan emisi berbasis data VRT yang kredibel menjadi kebutuhan penting untuk mewujudkan potensi manfaat ekonomi tambahan ini bagi petani yang telah menerapkan praktik pertanian presisi secara konsisten.

G. Implementasi *Smart farming* di Indonesia

Implementasi *smart farming* di Indonesia perlu mempertimbangkan karakteristik struktural pertanian nasional yang unik, yaitu didominasi oleh rumah tangga petani gurem dengan rata-rata luas lahan garapan yang sempit dan tersebar secara terfragmentasi. Badan Pusat Statistik (2024) mencatat bahwa mayoritas petani di Indonesia mengelola lahan dengan luas kurang dari setengah hektare, sebuah kondisi yang menghadirkan tantangan tersendiri dalam penerapan teknologi presisi berskala besar yang umumnya dirancang dan terbukti efektif pada konteks pertanian dengan skala lahan yang jauh lebih luas, sebagaimana lazim dijumpai di negara-negara dengan sistem pertanian korporat.

Pemerintah Indonesia melalui Kementerian Pertanian telah meluncurkan berbagai program strategis untuk mendorong digitalisasi dan modernisasi pertanian, di antaranya program Komando Strategi Pembangunan Pertanian (Kostratani) yang bertujuan memperkuat peran Balai Penyuluhan Pertanian sebagai pusat data, konsultasi, dan pembelajaran pertanian digital di tingkat kecamatan (Kementerian

Pertanian RI, 2022). Selain itu, skema pembiayaan Kredit Usaha Rakyat (KUR) khusus alat dan mesin pertanian (alsintan) turut disediakan untuk membantu petani dan kelompok tani mengakses teknologi modern tanpa harus menanggung beban investasi awal secara penuh secara mandiri.

Sejumlah studi kasus penerapan *smart farming* di berbagai daerah Indonesia menunjukkan hasil yang menjanjikan meskipun masih bersifat parsial dan belum tersebar merata secara nasional. Penerapan teknologi sensor kelembapan tanah dan sistem irigasi otomatis pada budi daya hortikultura di beberapa sentra produksi telah terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air, sementara pemanfaatan *drone* untuk pemantauan lahan perkebunan kelapa sawit dan tebu berskala besar telah menjadi praktik yang semakin umum di kalangan perusahaan perkebunan yang memiliki kapasitas modal memadai untuk berinvestasi pada teknologi tersebut.

Meskipun demikian, sejumlah tantangan struktural masih menghambat percepatan adopsi *smart farming* secara meluas di Indonesia, meliputi keterbatasan infrastruktur telekomunikasi di wilayah pedesaan terpencil, rendahnya literasi digital sebagian besar petani terutama pada kelompok usia lanjut yang mendominasi struktur demografi petani nasional, keterbatasan akses pembiayaan bagi petani skala kecil, serta lemahnya kelembagaan petani dalam bentuk koperasi atau kelompok tani yang idealnya dapat menjadi wadah kolektif untuk mengakses teknologi secara bersama-sama guna menekan beban biaya investasi individual yang masih menjadi kendala utama.

Berdasarkan berbagai tantangan tersebut, strategi percepatan adopsi *smart farming* di Indonesia perlu dirumuskan secara komprehensif dan bertahap, meliputi penguatan infrastruktur digital pedesaan melalui perluasan jaringan telekomunikasi, penguatan kapasitas sumber daya manusia petani melalui pelatihan dan pendampingan intensif oleh penyuluh pertanian, pengembangan skema pembiayaan inovatif yang terjangkau bagi petani kecil, penguatan kelembagaan petani sebagai basis adopsi teknologi kolektif, serta pengembangan teknologi tepat guna yang disesuaikan dengan skala dan karakteristik lahan pertanian Indonesia yang umumnya berukuran kecil dan tersebar, bukan sekadar mengadopsi teknologi impor secara langsung tanpa modifikasi kontekstual.

Tabel 6.2 Matriks Tantangan dan Strategi Implementasi *Smart farming* di Indonesia

Dimensi Tantangan	Permasalahan Utama	Strategi yang Direkomendasikan
Infrastruktur	Keterbatasan jaringan internet dan listrik di pedesaan	Perluasan infrastruktur telekomunikasi dan energi terbarukan
Sumber daya manusia	Rendahnya literasi digital dan usia petani lanjut	Pelatihan intensif dan regenerasi petani muda digital
Pembiayaan	Keterbatasan modal investasi teknologi bagi petani kecil	Skema KUR alsintan dan model sewa-pakai (*equipment sharing*)
Kelembagaan	Lemahnya koperasi/kelompok tani sebagai wadah kolektif	Penguatan kelembagaan tani berbasis korporasi petani
Kesesuaian teknologi	Teknologi impor tidak sesuai skala lahan sempit	Pengembangan teknologi tepat guna berbasis riset lokal

1. Peran Korporasi Petani dalam Adopsi Teknologi Presisi

Pengembangan model korporasi petani, yang mengonsolidasikan lahan-lahan sempit milik banyak petani ke dalam satu unit manajemen kolektif tanpa menghilangkan hak kepemilikan individual, menjadi strategi yang semakin didorong pemerintah untuk mengatasi keterbatasan skala ekonomi dalam adopsi teknologi presisi di Indonesia. Melalui model korporasi petani, investasi teknologi seperti sensor, *drone*, dan peralatan VRT dapat dilakukan secara kolektif dan digunakan bergantian oleh anggota, sehingga biaya investasi per hektare dapat ditekan secara signifikan dibandingkan jika setiap petani harus berinvestasi secara mandiri pada lahan sempit miliknya masing-masing.

Keberhasilan model korporasi petani sangat bergantung pada kepercayaan dan komitmen anggota dalam menjalankan kesepakatan bersama, termasuk pembagian hasil dan biaya operasional secara adil dan transparan. Pendampingan intensif dari penyuluh pertanian dan

lembaga pemerintah daerah diperlukan pada tahap awal pembentukan korporasi petani, guna membangun kapasitas kelembagaan yang kuat sebelum korporasi tersebut mampu mengelola investasi teknologi presisi secara mandiri dan berkelanjutan dalam jangka panjang tanpa lagi bergantung pada subsidi atau bantuan pemerintah secara terus-menerus.

2. Studi Kasus Implementasi pada Komoditas Unggulan Daerah

Beberapa daerah sentra produksi hortikultura di Indonesia telah mulai menerapkan kombinasi teknologi sensor kelembapan tanah, irigasi otomatis, dan aplikasi informasi cuaca untuk mendukung budi daya cabai dan bawang merah, dua komoditas strategis yang memiliki fluktuasi harga cukup tinggi akibat sensitivitasnya terhadap kondisi cuaca. Penerapan teknologi presisi pada komoditas tersebut membantu petani mengurangi risiko gagal panen akibat serangan penyakit yang dipicu oleh kelembapan berlebih, sekaligus mengoptimalkan waktu tanam untuk menghindari periode kelebihan pasokan yang menyebabkan jatuhnya harga jual di tingkat petani.

Pada sektor perkebunan, beberapa perusahaan pengelola perkebunan kelapa sawit dan tebu berskala besar di Indonesia telah mengadopsi kombinasi *drone* pemetaan, citra satelit, dan sistem informasi geografis untuk mendukung manajemen perkebunan yang lebih presisi, termasuk pemantauan produktivitas per blok kebun dan perencanaan rotasi pemupukan yang lebih efisien. Skala ekonomi yang dimiliki perusahaan perkebunan besar memungkinkan investasi teknologi presisi yang lebih komprehensif dibandingkan yang dapat dilakukan oleh petani rakyat berskala kecil pada umumnya.

3. Peran Perbankan dan Lembaga Keuangan dalam Pembiayaan *Smart Farming*

Lembaga perbankan dan keuangan memiliki peran strategis dalam mendukung percepatan adopsi *smart farming* melalui pengembangan skema pembiayaan yang disesuaikan dengan karakteristik risiko dan arus kas usaha tani, yang berbeda signifikan dibandingkan sektor usaha lainnya mengingat sifatnya yang musiman dan sangat dipengaruhi oleh faktor cuaca. Pengembangan produk pembiayaan yang mempertimbangkan data produksi historis petani, termasuk data yang dihasilkan dari sensor dan aplikasi digital, berpotensi

meningkatkan akurasi penilaian risiko kredit dibandingkan metode penilaian konvensional yang lebih mengandalkan agunan fisik.

Kemitraan antara lembaga keuangan dengan penyedia teknologi pertanian digital membuka peluang pengembangan produk pembiayaan inovatif yang terintegrasi dengan platform digital pertanian, di mana data produksi dan penjualan petani yang tercatat dalam aplikasi dapat menjadi dasar penilaian kelayakan kredit secara lebih objektif dan efisien, sekaligus mempercepat proses pencairan pembiayaan yang selama ini sering menjadi kendala utama bagi petani dalam mengakses modal untuk investasi teknologi pertanian presisi.

4. Menuju Ekosistem Pertanian Presisi yang Inklusif

Keberhasilan implementasi pertanian presisi dan *smart farming* di Indonesia tidak semata-mata ditentukan oleh ketersediaan teknologi canggih, melainkan oleh kemampuan seluruh pemangku kepentingan dalam membangun ekosistem yang inklusif dan berkeadilan, yang memungkinkan manfaat teknologi dapat dirasakan oleh seluruh lapisan petani, tidak terbatas pada petani skala besar dan perusahaan perkebunan yang memiliki kapasitas modal memadai semata.

Perjalanan menuju ekosistem pertanian presisi yang matang di Indonesia memerlukan komitmen jangka panjang, kesabaran dalam mengelola proses transisi yang bertahap, serta kemauan seluruh pihak untuk terus belajar dan beradaptasi terhadap perkembangan teknologi yang berlangsung sangat dinamis. Dengan pendekatan yang tepat, teknologi presisi dan *smart farming* berpotensi menjadi instrumen transformatif yang mengantarkan sistem pertanian Indonesia menuju masa depan yang lebih produktif, efisien, dan berkelanjutan bagi generasi kini dan mendatang.

Inovasi teknologi digital dan pertanian presisi menawarkan peluang besar bagi transformasi sistem pertanian Indonesia menuju arah yang lebih produktif, efisien, dan berkelanjutan. Berbagai teknologi yang telah diuraikan, mulai dari IoT, AI, big data, *blockchain*, robotika, hingga sensor, SIG, *drone*, penginderaan jauh, dan VRT, pada dasarnya merupakan komponen-komponen yang saling melengkapi dalam satu ekosistem pertanian cerdas yang terintegrasi secara menyeluruh.

Keberhasilan penerapan teknologi tersebut di Indonesia sangat ditentukan oleh kemampuan seluruh pemangku kepentingan dalam

mengadaptasikan teknologi global dengan konteks lokal yang khas, terutama karakteristik pertanian berskala kecil dan terfragmentasi yang mendominasi struktur agraria nasional. Pendekatan yang bijaksana, bertahap, inklusif, dan berorientasi pada kesejahteraan petani perlu senantiasa menjadi landasan utama dalam setiap kebijakan dan program pengembangan teknologi pertanian ke depan, agar transformasi digital pertanian benar-benar mampu berkontribusi nyata terhadap pencapaian ketahanan pangan nasional yang berkelanjutan bagi generasi kini dan mendatang.



BAB VII
INOVASI BIOTEKNOLOGI DAN PRODUKSI BERKELANJUTAN

Bioteknologi pertanian merupakan salah satu pilar penting dalam upaya mewujudkan sistem produksi pangan yang berkelanjutan, karena menawarkan solusi ilmiah untuk meningkatkan produktivitas tanaman sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap input kimia sintetis yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Varshney, Bohra, Yu, dan kolega (2021) menegaskan bahwa pendekatan pemuliaan tanaman berbasis genomik telah membuka babak baru dalam upaya merancang varietas unggul (*designing future crops*) yang mampu beradaptasi terhadap tekanan perubahan iklim sekaligus mempertahankan produktivitas tinggi. Perkembangan ini menjadi sangat relevan bagi Indonesia sebagai negara agraris tropis yang menghadapi tantangan ganda, yaitu kebutuhan peningkatan produksi pangan untuk populasi yang terus bertambah, serta tuntutan pelestarian lingkungan dan keanekaragaman hayati yang menjadi modal dasar keberlanjutan sistem pertanian jangka panjang.

A. Dasar-Dasar Bioteknologi Pertanian

Bioteknologi pertanian didefinisikan sebagai penerapan prinsip-prinsip ilmu biologi, khususnya pada tingkat molekuler dan seluler, untuk menghasilkan produk atau proses yang bermanfaat dalam sistem produksi pertanian, mencakup rekayasa genetika, kultur jaringan, fermentasi mikrobial, serta pemanfaatan penanda molekuler dalam seleksi tanaman. Gao (2021) menjelaskan bahwa perkembangan bioteknologi pertanian modern telah mengalami akselerasi signifikan seiring kemajuan teknologi pengeditan genom, yang memungkinkan modifikasi sifat tanaman secara lebih presisi dan efisien dibandingkan

metode pemuliaan konvensional yang memerlukan waktu bertahun-tahun untuk menghasilkan varietas baru dengan sifat yang diinginkan.

Ruang lingkup bioteknologi pertanian dapat dibagi ke dalam beberapa kategori utama, meliputi bioteknologi hijau (*green biotechnology*) yang berfokus pada aplikasi pertanian dan pangan, bioteknologi merah (*red biotechnology*) yang berkaitan dengan aplikasi medis dan farmasi, serta bioteknologi putih (*white biotechnology*) yang berfokus pada proses industri berbasis biologis. Dalam konteks pertanian berkelanjutan, bioteknologi hijau menjadi fokus utama pembahasan karena berkaitan langsung dengan upaya peningkatan produktivitas dan ketahanan tanaman terhadap berbagai tekanan biotik dan abiotik yang dihadapi dalam sistem produksi pangan.

Perkembangan teknologi pengeditan genom, khususnya sistem *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats* (CRISPR-Cas9), telah merevolusi kemampuan ilmuwan dalam memodifikasi genom tanaman secara presisi tinggi dengan biaya yang jauh lebih terjangkau dibandingkan teknologi rekayasa genetika generasi sebelumnya. Gao (2021) mencatat bahwa teknologi CRISPR memungkinkan modifikasi gen target secara spesifik tanpa memasukkan materi genetik asing dari spesies lain, sehingga produk yang dihasilkan pada beberapa kasus tidak dikategorikan sebagai organisme hasil rekayasa genetika konvensional dalam kerangka regulasi sejumlah negara, meskipun status regulasi ini masih menjadi perdebatan di berbagai yurisdiksi.

Penerapan bioteknologi pertanian di Indonesia memiliki sejarah panjang, dimulai dari pemanfaatan kultur jaringan untuk perbanyakan bibit unggul komoditas hortikultura dan perkebunan, hingga pengembangan varietas padi dan jagung menggunakan teknik pemuliaan berbantuan penanda molekuler (*marker-assisted breeding*). Lembaga penelitian pertanian nasional, seperti Badan Riset dan Inovasi Nasional, terus mengembangkan kapasitas riset bioteknologi pertanian guna menghasilkan varietas unggul yang sesuai dengan kondisi agroklimat tropis dan kebutuhan spesifik petani Indonesia, meskipun investasi riset di bidang ini masih memerlukan peningkatan signifikan dibandingkan negara-negara maju yang telah lebih dahulu mengembangkan kapasitas bioteknologi pertanian mereka.

Manfaat bioteknologi pertanian bagi keberlanjutan sistem produksi pangan sangat beragam, meliputi peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya melalui pengembangan varietas dengan kebutuhan input lebih rendah, peningkatan ketahanan tanaman terhadap hama dan penyakit yang mengurangi kebutuhan aplikasi pestisida kimia, serta pengembangan varietas yang lebih toleran terhadap cekaman lingkungan seperti kekeringan dan salinitas akibat perubahan iklim. Kontribusi bioteknologi terhadap pencapaian ketahanan pangan berkelanjutan menjadikannya salah satu bidang riset prioritas yang terus mendapat dukungan investasi dari pemerintah dan sektor swasta di berbagai negara di dunia.

Tabel 7.1 Kategori Bioteknologi Pertanian dan Contoh Aplikasinya

Kategori	Fokus Aplikasi	Contoh Penerapan
Bioteknologi Hijau	Pertanian dan pangan	Pemuliaan tanaman, kultur jaringan, biopestisida
Bioteknologi Merah	Medis dan farmasi	Produksi vaksin dan senyawa bioaktif berbasis tanaman
Bioteknologi Putih	Proses industri biologis	Fermentasi enzim dan bahan bakar nabati
Bioteknologi Biru	Sumber daya perairan	Budi daya mikroalga dan bioremediasi perairan

Klasifikasi bioteknologi berdasarkan warna tersebut membantu memetakan ruang lingkup penerapan teknologi biologis secara lebih sistematis. Dalam konteks pertanian berkelanjutan, bioteknologi hijau menjadi fokus utama, namun keterkaitannya dengan kategori lain, seperti bioteknologi putih untuk pengolahan limbah pertanian menjadi bioenergi, menunjukkan sifat interdisipliner bidang ilmu ini yang saling melengkapi dalam mendukung keberlanjutan sistem pangan secara menyeluruh.

1. Perbandingan Teknik Rekayasa Genetika Generasi Lama dan Baru

Teknologi rekayasa genetika generasi pertama, yang dikenal dengan istilah transgenik, melibatkan penyisipan gen dari spesies lain yang tidak berkerabat ke dalam genom tanaman target menggunakan vektor bakteri *Agrobacterium tumefaciens* atau metode penembakan partikel (*particle bombardment*). Pendekatan ini telah menghasilkan berbagai varietas tanaman tahan hama dan toleran herbisida yang ditanam secara luas di berbagai negara, namun juga menuai kontroversi dan penolakan di sejumlah wilayah akibat kekhawatiran mengenai dampak jangka panjang terhadap kesehatan dan lingkungan yang belum sepenuhnya terjawab oleh bukti ilmiah yang tersedia hingga saat ini.

Berbeda dengan pendekatan transgenik, teknologi pengeditan genom generasi baru seperti CRISPR-Cas9 memungkinkan modifikasi gen target secara presisi tanpa harus menyisipkan materi genetik asing dari spesies lain, melainkan memanfaatkan mekanisme perbaikan DNA alami sel tanaman itu sendiri untuk menghasilkan perubahan genetik yang diinginkan. Pendekatan ini menghasilkan produk akhir yang secara genetik sulit dibedakan dari hasil mutasi alami atau pemuliaan konvensional, sehingga memunculkan perdebatan mengenai perlunya kerangka regulasi yang berbeda dibandingkan produk transgenik konvensional yang telah lebih dahulu diatur secara ketat di berbagai negara.

2. Kultur Jaringan sebagai Fondasi Perbanyakan Bibit Unggul

Teknik kultur jaringan tanaman merupakan salah satu aplikasi bioteknologi yang paling mapan dan telah diadopsi secara luas dalam industri perbenihan komersial, memungkinkan perbanyakan tanaman secara massal dari sel atau jaringan tanaman induk unggul dalam kondisi steril di laboratorium, menghasilkan bibit dengan keseragaman genetik yang tinggi dan bebas dari patogen yang umumnya menyerang bibit hasil perbanyakan konvensional. Teknik ini sangat bermanfaat untuk perbanyakan komoditas hortikultura dan perkebunan bernilai ekonomi tinggi, seperti pisang, anggrek, dan kelapa sawit, yang memerlukan bibit unggul dalam jumlah besar untuk mendukung ekspansi area tanam secara komersial.

Pengembangan fasilitas kultur jaringan skala menengah yang dikelola oleh kelompok tani atau koperasi menjadi strategi yang semakin dikembangkan untuk mendekatkan akses teknologi bioteknologi perbanyakan bibit unggul kepada petani, mengurangi ketergantungan terhadap pasokan bibit dari luar daerah yang sering kali memerlukan biaya transportasi dan risiko kerusakan bibit selama proses pengiriman jarak jauh. Model bisnis penyediaan bibit kultur jaringan berbasis komunitas ini berkontribusi terhadap penguatan kemandirian sistem perbenihan lokal, sekaligus menciptakan lapangan kerja baru bagi masyarakat pedesaan yang terlibat dalam pengelolaan fasilitas kultur jaringan tersebut.

3. Peran Bioinformatika dalam Riset Bioteknologi Pertanian

Perkembangan pesat teknologi sekuensing genom generasi baru (*next-generation sequencing*) menghasilkan volume data genomik yang sangat besar, sehingga memerlukan dukungan bioinformatika untuk mengolah, menganalisis, dan menginterpretasikan data tersebut menjadi informasi yang bermanfaat bagi program pemuliaan tanaman. Bioinformatika memungkinkan identifikasi gen atau penanda genetik yang berasosiasi dengan sifat-sifat penting seperti ketahanan penyakit dan toleransi cekaman lingkungan, mempercepat proses seleksi kandidat tanaman unggul dibandingkan metode identifikasi konvensional yang mengandalkan pengamatan fenotipik semata di lapangan.

Keterbatasan kapasitas bioinformatika menjadi salah satu kendala utama yang dihadapi lembaga riset bioteknologi pertanian di Indonesia, mengingat bidang ini memerlukan kombinasi keahlian biologi molekuler dan ilmu komputer yang masih relatif langka di pasar tenaga kerja nasional. Investasi dalam pengembangan program pendidikan bioinformatika pertanian serta penyediaan infrastruktur komputasi berkapasitas tinggi menjadi kebutuhan strategis untuk mempercepat kemajuan riset bioteknologi pertanian Indonesia dalam menghasilkan varietas unggul yang sesuai dengan kebutuhan spesifik lokal secara lebih efisien dan berbasis data genomik yang akurat.

4. Peran Bioteknologi dalam Adaptasi Perubahan Iklim

Bioteknologi pertanian memainkan peran strategis dalam upaya adaptasi sistem pangan terhadap perubahan iklim, melalui

pengembangan varietas yang lebih tangguh terhadap cekaman lingkungan ekstrem serta teknologi yang mendukung efisiensi penggunaan sumber daya dalam kondisi iklim yang semakin tidak menentu. Gao (2021) menekankan bahwa kecepatan perubahan iklim yang terjadi saat ini menuntut percepatan pengembangan varietas adaptif melalui pemanfaatan teknologi bioteknologi modern, mengingat metode pemuliaan konvensional yang memerlukan waktu bertahun-tahun tidak lagi memadai untuk mengejar laju perubahan kondisi lingkungan yang semakin cepat dan sulit diprediksi.

Kontribusi bioteknologi terhadap mitigasi perubahan iklim juga tercermin melalui pengembangan tanaman dengan efisiensi fotosintesis yang lebih tinggi serta kapasitas sekuestrasi karbon yang lebih besar pada sistem perakaran, berpotensi menjadikan sistem pertanian tidak hanya sebagai sektor yang terdampak perubahan iklim, tetapi juga berkontribusi aktif dalam upaya mitigasi melalui peningkatan kapasitas penyerapan karbon dari atmosfer ke dalam biomassa tanaman dan tanah pertanian secara berkelanjutan dalam jangka panjang.

5. Konvergensi Bioteknologi dengan Teknologi Digital Pertanian

Konvergensi antara bioteknologi dan teknologi digital pertanian yang telah dibahas pada bab sebelumnya menciptakan peluang baru yang saling memperkuat, di mana data fenotipik yang dikumpulkan melalui sensor dan citra digital dapat mempercepat proses seleksi pemuliaan berbasis bioteknologi, sementara pemahaman genetik yang dihasilkan riset bioteknologi dapat memperkaya model prediktif kecerdasan buatan dalam memprediksi performa tanaman pada berbagai kondisi lingkungan yang berbeda-beda secara lebih akurat dibandingkan model yang hanya mengandalkan data fenotipik atau lingkungan semata tanpa mempertimbangkan informasi genetik yang mendasarinya.

Pengembangan pertanian presisi berbasis genom (*genomic precision agriculture*) yang mengintegrasikan informasi genetik varietas dengan data spesifik lokasi lahan menjadi arah riset mutakhir yang menjanjikan, memungkinkan rekomendasi pengelolaan yang benar-benar disesuaikan tidak hanya dengan kondisi lahan, tetapi juga dengan karakteristik genetik spesifik varietas yang ditanam petani, sehingga menghasilkan optimalisasi hasil yang lebih presisi dibandingkan pendekatan konvensional yang mengabaikan variasi genetik

antarvarietas dalam menentukan rekomendasi pengelolaan lahan dan tanaman.

6. Investasi dan Pendanaan Riset Bioteknologi Pertanian

Pembiayaan riset bioteknologi pertanian memerlukan komitmen investasi jangka panjang mengingat sifat riset di bidang ini yang memerlukan waktu pengembangan cukup lama sebelum menghasilkan produk yang siap diaplikasikan secara komersial di lapangan. Perbandingan alokasi anggaran riset bioteknologi pertanian Indonesia dengan negara-negara maju menunjukkan kesenjangan yang signifikan, sehingga peningkatan investasi pemerintah maupun swasta dalam riset bioteknologi pertanian menjadi kebutuhan strategis untuk mengejar ketertinggalan dan memastikan Indonesia dapat memanfaatkan potensi bioteknologi secara optimal bagi peningkatan produktivitas dan keberlanjutan sistem pangan nasional dalam jangka panjang.

Skema pendanaan riset kolaboratif yang melibatkan konsorsium lembaga riset pemerintah, perguruan tinggi, dan sektor swasta menjadi model yang semakin didorong untuk mengatasi keterbatasan anggaran riset individual lembaga, sekaligus mempercepat proses hilirisasi hasil riset menjadi produk komersial yang dapat dimanfaatkan petani. Pengembangan mekanisme insentif pajak bagi perusahaan yang berinvestasi dalam riset dan pengembangan bioteknologi pertanian turut menjadi instrumen kebijakan yang dapat mendorong partisipasi sektor swasta secara lebih aktif dalam mendukung kemajuan riset bioteknologi pertanian nasional ke depannya.

B. Pemuliaan Tanaman Modern

Pemuliaan tanaman modern telah mengalami transformasi signifikan dari pendekatan konvensional yang mengandalkan seleksi fenotipik semata menuju pendekatan yang terintegrasi dengan informasi genomik untuk mempercepat proses pengembangan varietas unggul. Hickey, Hafeez, Robinson, dan kolega (2019) memperkenalkan konsep percepatan pemuliaan (*speed breeding*) yang memanfaatkan pengaturan kondisi lingkungan tumbuh secara intensif untuk mempersingkat siklus generasi tanaman, sehingga proses pengembangan varietas baru yang sebelumnya memerlukan waktu satu dekade dapat dipersingkat secara

signifikan guna merespons kebutuhan mendesak peningkatan produksi pangan global akibat pertumbuhan populasi dan perubahan iklim.

Seleksi genomik (*genomic selection*) merupakan pendekatan pemuliaan yang memanfaatkan informasi penanda genetik di seluruh genom untuk memprediksi nilai pemuliaan suatu individu tanaman tanpa harus menunggu ekspresi fenotipik secara penuh di lapangan. Voss-Fels, Cooper, dan Hayes (2019) menjelaskan bahwa pendekatan ini secara signifikan meningkatkan efisiensi seleksi, terutama untuk sifat-sifat kompleks yang dikendalikan oleh banyak gen (*polygenic traits*), seperti toleransi kekeringan dan efisiensi penggunaan nitrogen, yang sulit diseleksi secara akurat menggunakan metode pemuliaan konvensional berbasis pengamatan fenotipik semata.

Teknologi pengeditan genom CRISPR-Cas9 membuka peluang baru dalam pemuliaan presisi (*precision breeding*) yang memungkinkan modifikasi sifat spesifik tanaman tanpa mengubah keseluruhan latar belakang genetik varietas unggul yang telah ada. Varshney, Bohra, Yu, dan kolega (2021) mencatat bahwa pendekatan ini sangat bermanfaat untuk perbaikan sifat tunggal pada varietas unggul lokal yang telah beradaptasi baik dengan kondisi agroklimat setempat, seperti peningkatan ketahanan terhadap penyakit tertentu tanpa mengorbankan sifat-sifat unggul lain yang telah dimiliki varietas tersebut selama bertahun-tahun proses seleksi alami dan buatan oleh petani setempat.

Pemuliaan partisipatif (*participatory plant breeding*) yang melibatkan petani secara aktif dalam proses seleksi varietas menjadi pendekatan yang semakin diapresiasi karena mampu menghasilkan varietas yang lebih sesuai dengan preferensi dan kondisi spesifik petani lokal dibandingkan pendekatan pemuliaan konvensional yang sepenuhnya dilakukan oleh pemulia di stasiun penelitian formal. Pendekatan ini juga berkontribusi terhadap pelestarian keanekaragaman genetik tanaman lokal, mengingat petani sering kali memiliki preferensi terhadap varietas lokal yang memiliki karakteristik unik namun kurang diperhatikan dalam program pemuliaan formal yang lebih berorientasi pada varietas dengan daya jual komersial tinggi.

Meskipun menjanjikan, penerapan pemuliaan tanaman modern di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan, termasuk keterbatasan infrastruktur riset genomik yang canggih, kurangnya tenaga ahli pemuliaan yang menguasai teknik-teknik mutakhir, serta ketergantungan

pada data referensi genom yang sebagian besar dikembangkan untuk kondisi agroklimat negara lain. Investasi berkelanjutan dalam pengembangan kapasitas riset pemuliaan modern menjadi kebutuhan strategis bagi Indonesia untuk menghasilkan varietas unggul yang benar-benar sesuai dengan kondisi tropis dan kebutuhan spesifik petani nasional dalam jangka panjang.

1. Pemuliaan untuk Ketahanan terhadap Cekaman Abiotik

Perubahan iklim yang menyebabkan peningkatan frekuensi kejadian cuaca ekstrem, seperti kekeringan berkepanjangan dan intrusi air laut yang meningkatkan salinitas lahan pesisir, mendorong prioritas program pemuliaan tanaman untuk menghasilkan varietas yang lebih toleran terhadap berbagai cekaman abiotik tersebut. Varshney, Bohra, Yu, dan kolega (2021) menjelaskan bahwa pendekatan pemuliaan modern memanfaatkan identifikasi gen-gen toleransi cekaman dari plasma nutfah liar dan varietas lokal yang telah beradaptasi secara alami terhadap kondisi lingkungan ekstrem, kemudian mentransfer sifat tersebut ke varietas unggul komersial melalui kombinasi teknik persilangan konvensional dan seleksi berbantuan penanda molekuler.

Pengembangan varietas padi toleran salinitas dan kekeringan menjadi prioritas riset penting bagi Indonesia mengingat luasnya wilayah pesisir yang berpotensi mengalami intrusi air laut akibat kenaikan permukaan air laut, serta wilayah lahan kering yang menghadapi tantangan ketersediaan air irigasi yang semakin terbatas. Keberhasilan pengembangan varietas toleran cekaman abiotik ini berpotensi memperluas area tanam produktif ke lahan-lahan marjinal yang sebelumnya kurang optimal untuk budi daya tanaman pangan, berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan pangan nasional dalam menghadapi tantangan perubahan iklim yang semakin nyata dirasakan dampaknya.

2. Integrasi Fenotipe Presisi dalam Program Pemuliaan

Fenotipe presisi (*precision phenotyping*) merupakan pendekatan pengukuran karakteristik fenotipik tanaman secara akurat dan efisien menggunakan teknologi pencitraan dan sensor, yang menjadi pelengkap penting bagi data genomik dalam program pemuliaan modern. Teknologi ini memungkinkan pengukuran sifat-sifat kompleks seperti luas daun,

kandungan klorofil, dan arsitektur akar secara non-destruktif dan berulang sepanjang siklus pertumbuhan tanaman, menghasilkan data fenotipik dengan resolusi tinggi yang sebelumnya sulit diperoleh melalui metode pengukuran manual konvensional yang memakan waktu dan tenaga kerja yang besar.

Fasilitas fenotipe presisi berskala besar, seperti rumah kaca otomatis yang dilengkapi sistem pencitraan bergerak, telah dikembangkan di berbagai pusat riset pemuliaan tanaman terkemuka di dunia, memungkinkan karakterisasi ribuan genotipe tanaman secara simultan dengan tingkat presisi yang tinggi. Pengembangan fasilitas serupa dengan skala yang disesuaikan bagi kapasitas riset Indonesia dapat mempercepat program pemuliaan tanaman tropis lokal, meskipun investasi awal yang diperlukan untuk membangun fasilitas fenotipe presisi tersebut masih tergolong tinggi bagi banyak lembaga riset pertanian di negara berkembang.

3. Pelestarian Plasma Nutfah sebagai Sumber Daya Pemuliaan

Plasma nutfah, yaitu materi genetik yang terkandung dalam berbagai varietas tanaman, termasuk varietas lokal, kerabat liar, dan galur hasil pemuliaan terdahulu, merupakan sumber daya genetik yang sangat berharga bagi keberlanjutan program pemuliaan tanaman di masa depan. Kehilangan keanekaragaman plasma nutfah akibat penyeragaman varietas yang ditanam petani secara luas berpotensi mengurangi basis genetik yang tersedia bagi pemulia untuk mengembangkan varietas baru yang mampu mengatasi tantangan hama, penyakit, atau perubahan iklim yang belum diketahui di masa mendatang, sehingga pelestarian plasma nutfah menjadi investasi strategis jangka panjang bagi ketahanan pangan.

Bank gen nasional Indonesia menyimpan ribuan aksesi plasma nutfah berbagai komoditas pertanian strategis, namun pengelolaan dan pemanfaatan koleksi tersebut masih memerlukan penguatan, termasuk karakterisasi genetik yang lebih komprehensif dan digitalisasi basis data aksesi agar informasi mengenai potensi sifat unggul setiap aksesi dapat lebih mudah diakses dan dimanfaatkan oleh pemulia tanaman dalam merancang program persilangan yang lebih terarah dan efisien untuk menghasilkan varietas unggul baru yang dibutuhkan.

4. Pemuliaan Tanaman Biofortifikasi untuk Ketahanan Gizi

Pemuliaan tanaman biofortifikasi bertujuan meningkatkan kandungan gizi mikro tertentu, seperti zat besi, zink, dan vitamin A, secara alami dalam bagian tanaman yang dikonsumsi, menawarkan solusi berkelanjutan untuk mengatasi masalah kekurangan gizi mikro yang masih menjadi tantangan kesehatan masyarakat signifikan di berbagai wilayah Indonesia. Pendekatan biofortifikasi menawarkan keunggulan dibandingkan program suplementasi gizi konvensional, karena manfaatnya dapat dinikmati secara berkelanjutan tanpa memerlukan intervensi berulang, mengingat sifat unggul kandungan gizi tersebut telah tertanam secara genetik dalam varietas tanaman yang dibudidayakan petani secara rutin.

Pengembangan varietas padi dan ubi jalar biofortifikasi di Indonesia telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam meningkatkan asupan gizi mikro masyarakat, khususnya pada wilayah dengan prevalensi kekurangan gizi mikro yang tinggi, meskipun tantangan penerimaan konsumen terhadap perubahan warna atau rasa produk biofortifikasi tertentu, seperti ubi jalar oranye kaya vitamin A, masih memerlukan strategi edukasi dan promosi yang efektif untuk meningkatkan tingkat adopsi konsumsi produk biofortifikasi tersebut secara lebih luas di kalangan masyarakat.

5. Pemuliaan Tanaman untuk Ketahanan Multipel terhadap Hama dan Penyakit

Pengembangan varietas dengan ketahanan multipel terhadap beberapa jenis hama dan penyakit sekaligus (*multiple resistance*) menjadi target penting dalam program pemuliaan modern, mengingat tanaman di lapangan umumnya menghadapi tekanan dari berbagai organisme pengganggu secara simultan, bukan hanya satu jenis hama atau penyakit tunggal. Pendekatan pemuliaan yang menggabungkan beberapa gen ketahanan (*gene pyramiding*) melalui seleksi berbantuan penanda molekuler memungkinkan pengembangan varietas dengan spektrum ketahanan yang lebih luas dan lebih tahan lama, mengingat ketahanan yang dikendalikan oleh banyak gen cenderung lebih sulit dipatahkan oleh evolusi patogen dibandingkan ketahanan yang dikendalikan oleh gen tunggal.

Strategi ini particularly relevan bagi Indonesia yang menghadapi tekanan hama dan penyakit tanaman yang beragam akibat kondisi iklim tropis yang mendukung perkembangan berbagai organisme pengganggu tanaman sepanjang tahun. Pengembangan varietas dengan ketahanan multipel yang sesuai dengan kompleksitas tekanan biotik di Indonesia memerlukan basis data komprehensif mengenai pola distribusi dan intensitas serangan berbagai hama dan penyakit pada setiap wilayah, guna mengarahkan prioritas program pemuliaan ketahanan multipel yang paling relevan dengan kebutuhan spesifik petani di berbagai sentra produksi pertanian nasional.

Masa depan pemuliaan tanaman Indonesia sangat bergantung pada kemampuan mengintegrasikan berbagai pendekatan modern, mulai dari seleksi genomik, pengeditan genom, hingga pemuliaan partisipatif, dalam satu kerangka program pemuliaan yang komprehensif dan disesuaikan dengan kebutuhan spesifik komoditas dan agroekologi tropis Indonesia. Keberhasilan jangka panjang akan ditentukan oleh konsistensi investasi riset, penguatan kapasitas sumber daya manusia, serta kolaborasi erat antara lembaga riset, industri benih, dan petani dalam menghasilkan varietas unggul yang benar-benar menjawab kebutuhan ketahanan pangan nasional di tengah tantangan perubahan iklim yang semakin nyata.

C. Biofertilizer dan Biopestisida

Biofertilizer atau pupuk hayati merupakan formulasi yang mengandung mikroorganisme hidup yang mampu meningkatkan ketersediaan atau penyerapan hara bagi tanaman melalui berbagai mekanisme biologis, seperti fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, dan produksi hormon pertumbuhan tanaman. Mahanty, Bhattacharjee, dan kolega (2020) menjelaskan bahwa penggunaan biofertilizer menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan pupuk kimia sintetis, karena mampu mengurangi ketergantungan terhadap input eksternal sekaligus memperbaiki kesehatan biologis tanah dalam jangka panjang melalui peningkatan populasi mikroorganisme menguntungkan di zona perakaran tanaman.

Bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (*Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*/PGPR) merupakan kelompok mikroorganisme yang paling banyak dimanfaatkan dalam formulasi biofertilizer, dengan mekanisme kerja yang beragam meliputi produksi siderofor untuk meningkatkan ketersediaan zat besi, sintesis asam indol asetat yang merangsang pertumbuhan akar, serta kemampuan menginduksi resistensi sistemik tanaman terhadap patogen. Etesami dan Adl (2020) mengulas berbagai genus PGPR yang telah terbukti efektif, termasuk *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Pseudomonas*, dan *Bacillus*, yang masing-masing memiliki keunggulan spesifik tergantung pada jenis tanaman dan kondisi tanah tempat aplikasi dilakukan.

Biopestisida merupakan agen pengendalian hama dan penyakit tanaman yang berasal dari bahan alami, termasuk mikroorganisme, tumbuhan, atau senyawa biokimia, yang menawarkan alternatif lebih aman dibandingkan pestisida kimia sintetis dalam hal dampak terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Fenibo, Ijoma, dan Matambo (2021) mengategorikan biopestisida ke dalam tiga kelompok utama, yaitu biopestisida mikrobial yang memanfaatkan mikroorganisme seperti *Bacillus thuringiensis*, biopestisida biokimia yang memanfaatkan senyawa alami seperti ekstrak neem, serta biopestisida berbasis tanaman transgenik yang mengekspresikan protein pengendali hama secara intrinsik dalam jaringan tanaman itu sendiri.

Keunggulan utama biopestisida dibandingkan pestisida kimia sintetis terletak pada spesifisitas target yang tinggi terhadap organisme pengganggu tertentu, sehingga meminimalkan dampak negatif terhadap organisme non-target seperti serangga penyerbuk dan musuh alami hama, serta tingkat degradasi yang lebih cepat di lingkungan sehingga mengurangi risiko akumulasi residu berbahaya pada produk pertanian dan lingkungan sekitar. Fenibo dan kolega (2021) mencatat bahwa meskipun biopestisida umumnya memiliki masa kerja yang lebih singkat dan efektivitas yang lebih variatif dibandingkan pestisida kimia, kombinasi penggunaan keduanya dalam kerangka pengendalian hama terpadu (*integrated pest management*) menghasilkan strategi pengendalian yang lebih berkelanjutan dan efektif dalam jangka panjang.

Tantangan utama dalam pengembangan dan penerapan biofertilizer dan biopestisida meliputi konsistensi kualitas produk yang dipengaruhi oleh kondisi penyimpanan dan viabilitas mikroorganisme,

keterbatasan masa simpan produk dibandingkan produk kimia sintetis, serta variabilitas efektivitas yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan spesifik lokasi aplikasi. Pengembangan formulasi yang lebih stabil, termasuk teknologi enkapsulasi mikroorganisme, menjadi arah riset penting untuk mengatasi tantangan tersebut dan meningkatkan daya saing produk biologis dibandingkan alternatif kimia sintetis yang telah lebih mapan di pasar sarana produksi pertanian.

Tabel 7.2 Jenis Mikroorganisme PGPR dan Manfaat Utamanya bagi Tanaman

Genus Mikroorganisme	Mekanisme Utama	Manfaat bagi Tanaman
Azospirillum	Fiksasi nitrogen non-simbiotik	Peningkatan ketersediaan nitrogen tanah
Azotobacter	Fiksasi nitrogen bebas	Perbaikan pertumbuhan vegetatif tanaman
Pseudomonas fluorescens	Produksi siderofor dan antibiotik	Perlindungan dari patogen tular tanah
Bacillus subtilis	Pelarutan fosfat dan induksi resistensi	Peningkatan serapan hara dan ketahanan penyakit
Mikoriza (Glomus spp.)	Simbiosis perluasan sistem perakaran	Peningkatan serapan air dan fosfor

1. Proses Produksi dan Formulasi Biofertilizer Komersial

Produksi biofertilizer komersial melibatkan serangkaian tahapan mulai dari isolasi dan seleksi strain mikroorganisme unggul, produksi massal melalui fermentasi dalam bioreaktor, hingga formulasi akhir dalam bentuk cair, tepung, atau granul yang memudahkan aplikasi oleh petani di lapangan. Mahanty, Bhattacharjee, dan kolega (2020) menekankan bahwa pemilihan bahan pembawa (*carrier material*) yang tepat dalam formulasi biofertilizer sangat menentukan viabilitas dan masa simpan mikroorganisme, dengan bahan pembawa berbasis gambut, kompos, atau bahan sintetis tertentu masing-masing memiliki kelebihan dan keterbatasan tersendiri dalam mempertahankan kelangsungan hidup

mikroorganisme selama proses penyimpanan dan distribusi produk hingga sampai ke tangan petani.

Kontrol kualitas menjadi aspek krusial dalam industri biofertilizer, mengingat efektivitas produk sangat bergantung pada jumlah populasi mikroorganisme hidup yang terkandung dan viabilitasnya hingga saat aplikasi di lapangan. Standar kualitas biofertilizer yang ditetapkan pemerintah perlu memastikan bahwa produk yang beredar di pasaran memenuhi ambang batas populasi mikroorganisme minimum yang efektif, guna melindungi petani dari produk biofertilizer berkualitas rendah yang tidak memberikan manfaat sesuai klaim yang dipromosikan oleh produsen kepada konsumen di tingkat lapangan.

2. Sinergi Biopestisida dengan Pengendalian Hama Terpadu

Integrasi biopestisida ke dalam kerangka pengendalian hama terpadu (*integrated pest management*/IPM) menawarkan pendekatan pengendalian hama yang lebih berkelanjutan dibandingkan ketergantungan penuh pada pestisida kimia sintetis, dengan mengombinasikan berbagai metode pengendalian, termasuk pengendalian hayati menggunakan musuh alami, penggunaan varietas tahan hama, praktik budi daya yang mengurangi risiko serangan hama, dan aplikasi biopestisida sebagai komponen pelengkap ketika ambang ekonomi serangan hama telah terlampaui.

Fenibo, Ijoma, dan Matambo (2021) menekankan pentingnya pemahaman petani mengenai waktu dan cara aplikasi biopestisida yang tepat, mengingat karakteristik biopestisida yang umumnya memerlukan waktu kerja lebih lama dan sensitif terhadap kondisi lingkungan seperti sinar ultraviolet dan suhu tinggi, dibandingkan pestisida kimia sintetis yang bekerja lebih cepat namun dengan risiko dampak lingkungan yang lebih besar. Pelatihan petani mengenai karakteristik spesifik setiap jenis biopestisida menjadi kunci penting untuk memaksimalkan efektivitas pengendalian hama sekaligus meminimalkan risiko kegagalan aplikasi akibat kesalahan waktu atau metode penggunaan produk biopestisida di lapangan.

3. Prospek Pasar dan Industri Biofertilizer Nasional

Pertumbuhan pasar biofertilizer dan biopestisida di Indonesia menunjukkan tren positif seiring meningkatnya kesadaran petani mengenai dampak negatif penggunaan input kimia berlebihan terhadap kesehatan tanah jangka panjang, serta dukungan kebijakan pemerintah yang mendorong pengurangan subsidi pupuk kimia dan promosi penggunaan pupuk organik dan hayati. Perkembangan industri biofertilizer nasional masih didominasi oleh produsen skala kecil dan menengah, sehingga diperlukan dukungan investasi dan transfer teknologi untuk meningkatkan kapasitas produksi dan kualitas produk agar mampu bersaing dengan produk impor yang umumnya memiliki standar kualitas dan konsistensi yang lebih terjamin.

Pengembangan kemitraan antara lembaga riset penghasil strain mikroorganisme unggul dengan industri untuk komersialisasi produk biofertilizer dan biopestisida menjadi model kolaborasi yang penting untuk mempercepat hilirisasi hasil riset bioteknologi pertanian Indonesia. Skema insentif pemerintah bagi industri yang mengembangkan dan memproduksi biofertilizer dan biopestisida berbahan baku mikroorganisme lokal dapat mendorong kemandirian industri sarana produksi pertanian hayati nasional, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap produk impor yang harganya relatif lebih mahal bagi petani skala kecil di Indonesia.

4. Sinergi Biofertilizer dengan Praktik Konservasi Tanah

Kombinasi aplikasi biofertilizer dengan praktik konservasi tanah, seperti pertanian tanpa olah tanah (*no-till farming*) dan penanaman tanaman penutup tanah, menghasilkan efek sinergis yang lebih besar terhadap perbaikan kesuburan tanah dibandingkan penerapan salah satu praktik secara terpisah. Pengurangan intensitas pengolahan tanah membantu mempertahankan struktur habitat mikroorganisme tanah yang telah terbentuk, sehingga populasi mikroorganisme yang diintroduksi melalui aplikasi biofertilizer dapat bertahan dan berkembang biak secara lebih optimal dibandingkan pada tanah yang mengalami gangguan fisik berulang akibat pengolahan tanah intensif.

Integrasi biofertilizer dengan sistem pertanian konservasi menjadi arah pengembangan yang semakin dipromosikan oleh lembaga riset pertanian, mengingat pendekatan gabungan ini menawarkan

manfaat yang lebih komprehensif terhadap kesehatan tanah jangka panjang, meliputi peningkatan kandungan bahan organik, perbaikan struktur tanah, dan peningkatan kapasitas retensi air, yang secara kolektif berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan sistem produksi pertanian terhadap variabilitas iklim yang semakin tidak menentu di masa mendatang.

5. Peluang Ekspor Produk Biofertilizer dan Biopestisida Indonesia

Kekayaan keanekaragaman hayati mikroorganisme tropis Indonesia menyimpan potensi besar untuk pengembangan produk biofertilizer dan biopestisida unggulan yang dapat menjadi komoditas ekspor bernilai tambah tinggi, khususnya bagi pasar negara-negara tropis lain yang menghadapi tantangan agroekologi serupa dengan Indonesia. Pengembangan standar kualitas ekspor dan sertifikasi internasional bagi produk biofertilizer dan biopestisida Indonesia menjadi langkah strategis yang perlu didukung pemerintah untuk membuka akses pasar global bagi produk inovasi bioteknologi pertanian nasional yang memiliki keunggulan komparatif berbasis kekayaan hayati domestik yang unik dan sulit ditiru oleh negara lain dengan kondisi agroekologi berbeda.

6. Regulasi Mutu dan Pendaftaran Produk Biofertilizer di Indonesia

Proses pendaftaran dan sertifikasi mutu produk biofertilizer dan biopestisida di Indonesia melibatkan serangkaian uji efektivitas dan keamanan yang harus dipenuhi produsen sebelum produk dapat dipasarkan secara resmi kepada petani, mencakup uji viabilitas mikroorganisme, uji efektivitas lapangan pada berbagai kondisi agroekologi, serta uji keamanan terhadap organisme non-target. Proses regulasi yang komprehensif ini penting untuk melindungi petani dari produk yang tidak efektif atau berpotensi membahayakan, namun kompleksitas dan durasi proses pendaftaran yang panjang terkadang menjadi hambatan bagi produsen skala kecil dan menengah yang ingin memasarkan inovasi produk biofertilizer mereka secara resmi dan legal.

Penyederhanaan proses regulasi bagi produk biofertilizer dan biopestisida berbasis mikroorganisme lokal yang telah terbukti aman melalui riset ilmiah dapat menjadi langkah kebijakan yang mendukung percepatan komersialisasi inovasi bioteknologi pertanian dalam negeri,

tanpa mengorbankan aspek keamanan dan efektivitas produk yang beredar di pasaran. Keseimbangan antara kehati-hatian regulasi dan dukungan terhadap inovasi domestik menjadi pertimbangan penting dalam penyempurnaan kerangka regulasi produk biofertilizer dan biopestisida nasional ke depannya.

Pengembangan industri biofertilizer dan biopestisida nasional yang mandiri dan berdaya saing memerlukan sinergi antara riset unggulan berbasis kekayaan hayati lokal, dukungan regulasi yang mendorong inovasi, serta penguatan kapasitas produksi dan pemasaran yang menjangkau petani di seluruh wilayah Indonesia. Pencapaian kemandirian dalam penyediaan input hayati ini menjadi salah satu pilar penting bagi keberlanjutan sistem pertanian nasional, mengurangi ketergantungan terhadap produk kimia sintetis impor sekaligus memperkuat ketahanan sistem pangan dari gangguan rantai pasok global yang dapat memengaruhi ketersediaan input pertanian kimia sintetis.

D. Mikroorganisme dalam Pertanian

Peran mikroorganisme dalam sistem pertanian jauh melampaui fungsi sebagai agen biofertilizer dan biopestisida semata, mencakup pula fungsi dekomposer bahan organik, agen bioremediasi lahan tercemar, serta komponen kunci dalam siklus biogeokimia yang menopang kesuburan tanah secara alami. Etesami dan Adl (2020) menegaskan bahwa keanekaragaman mikrobioma tanah yang sehat berkorelasi positif dengan produktivitas tanaman jangka panjang, karena mikroorganisme tanah berkontribusi terhadap dekomposisi bahan organik, pembentukan agregat tanah yang stabil, serta penekanan populasi patogen tular tanah melalui mekanisme kompetisi dan antagonisme alami antarmikroorganisme di rizosfer.

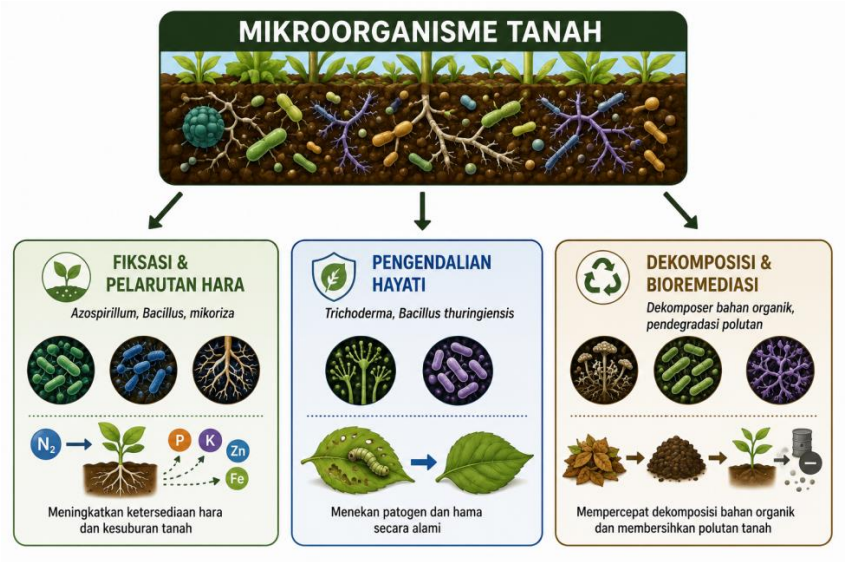
Mikoriza, yaitu simbiosis mutualistik antara fungi tertentu dengan akar tanaman, memainkan peran penting dalam meningkatkan efisiensi penyerapan air dan hara, khususnya fosfor, melalui perluasan jangkauan sistem perakaran tanaman menggunakan jaringan hifa fungi yang jauh lebih halus dan luas dibandingkan rambut akar tanaman itu sendiri. Pemanfaatan inokulan mikoriza dalam sistem produksi tanaman, terutama pada lahan dengan tingkat kesuburan fosfor rendah, terbukti mampu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman secara signifikan

tanpa memerlukan aplikasi pupuk fosfat sintetis dalam dosis tinggi yang berpotensi menyebabkan pencemaran badan air melalui proses eutrofikasi.

Bioremediasi mikrobial menjadi solusi yang semakin diminati untuk memulihkan lahan pertanian yang tercemar oleh residu pestisida atau logam berat akibat praktik pertanian intensif di masa lampau. Mikroorganisme tertentu memiliki kemampuan mendegradasi senyawa polutan organik menjadi bentuk yang tidak berbahaya, atau mengakumulasi logam berat dalam sel mereka melalui mekanisme bioakumulasi, sehingga secara bertahap mengurangi konsentrasi kontaminan dalam tanah tanpa memerlukan intervensi fisik yang mahal dan berpotensi merusak struktur tanah, seperti penggalian dan penggantian lapisan tanah tercemar secara konvensional.

Konsorsium mikroba, yaitu kombinasi beberapa spesies mikroorganisme yang bekerja secara sinergis, menunjukkan efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan penggunaan strain tunggal dalam berbagai aplikasi pertanian, karena kombinasi mikroorganisme mampu memanfaatkan mekanisme kerja yang saling melengkapi dan lebih tahan terhadap variasi kondisi lingkungan yang dinamis di lapangan. Pengembangan formulasi konsorsium mikroba yang optimal memerlukan pemahaman mendalam mengenai interaksi antarspesies mikroorganisme, guna menghindari kompetisi yang justru dapat menurunkan efektivitas keseluruhan konsorsium yang diformulasikan untuk aplikasi pertanian tertentu.

Gambar 7.1 Peran Multifungsi Mikroorganisme dalam Ekosistem Tanah Pertanian



Gambar tersebut menunjukkan bahwa mikroorganisme tanah menjalankan berbagai fungsi ekologis yang saling terkait dalam mendukung kesuburan dan kesehatan lahan pertanian secara menyeluruh. Pengelolaan tanah yang memperhatikan kesehatan mikrobioma menjadi kunci penting dalam strategi pertanian berkelanjutan jangka panjang, karena gangguan pada keseimbangan komunitas mikroba dapat berdampak luas terhadap berbagai fungsi ekosistem tanah secara simultan.

1. Mikrobioma Tanah dan Kesehatan Tanaman Jangka Panjang

Konsep mikrobioma tanah merujuk pada keseluruhan komunitas mikroorganisme yang hidup di dalam dan sekitar sistem perakaran tanaman, yang berperan sebagai faktor penentu penting kesehatan dan produktivitas tanaman dalam jangka panjang. Etesami dan Adl (2020) menjelaskan bahwa komposisi mikrobioma tanah yang beragam dan seimbang berkorelasi dengan ketahanan tanaman yang lebih baik terhadap serangan patogen, karena keanekaragaman mikroorganisme yang tinggi menciptakan kompetisi alami yang menekan perkembangan populasi patogen tunggal yang dapat mendominasi dan menyebabkan kerusakan signifikan pada sistem perakaran tanaman.

Praktik pengelolaan lahan yang intensif, termasuk penggunaan pestisida dan pupuk kimia sintetis dalam dosis tinggi secara berulang, terbukti dapat menurunkan keanekaragaman mikrobioma tanah secara

signifikan dibandingkan praktik pertanian yang lebih konservatif seperti rotasi tanaman dan penggunaan pupuk organik. Pemulihan kesehatan mikrobioma tanah yang telah terdegradasi memerlukan waktu dan upaya konsisten, termasuk pengurangan intensitas pengolahan tanah, penambahan bahan organik secara rutin, serta diversifikasi jenis tanaman yang dibudidayakan untuk mendukung pemulihan keanekaragaman komunitas mikroorganisme tanah secara bertahap dalam jangka menengah hingga panjang.

2. Aplikasi *Trichoderma* sebagai Agen Pengendali Hayati

Fungi *Trichoderma* merupakan salah satu agen pengendali hayati yang paling banyak dimanfaatkan dalam pertanian karena kemampuannya yang multifungsi, meliputi kemampuan sebagai agen antagonis terhadap berbagai patogen tular tanah, kemampuan mendekomposisi bahan organik yang mempercepat proses pengomposan, serta kemampuan merangsang pertumbuhan akar tanaman melalui produksi hormon dan enzim tertentu. Aplikasi *Trichoderma* pada media pembibitan dan lahan pertanaman terbukti efektif menekan berbagai penyakit tanaman yang disebabkan oleh patogen tular tanah seperti *Fusarium* dan *Rhizoctonia*, yang selama ini sulit dikendalikan secara efektif menggunakan fungisida kimia konvensional.

Pengembangan formulasi *Trichoderma* dalam bentuk yang mudah diaplikasikan petani, seperti pupuk kompos yang telah diperkaya (*bio-enriched compost*), menjadi strategi yang efektif untuk mendekatkan teknologi pengendalian hayati ini kepada petani skala kecil yang mungkin tidak familiar dengan aplikasi produk biologis dalam bentuk formulasi teknis. Produksi *Trichoderma* secara mandiri oleh kelompok tani menggunakan teknik sederhana yang dapat dipelajari melalui pelatihan singkat juga menjadi strategi yang semakin dipromosikan untuk meningkatkan aksesibilitas dan keterjangkauan teknologi pengendalian hayati berbasis mikroorganisme ini bagi petani di berbagai wilayah Indonesia.

3. Potensi Mikroorganisme Endofit dalam Pertanian

Mikroorganisme endofit, yaitu mikroorganisme yang hidup di dalam jaringan tanaman tanpa menimbulkan gejala penyakit,

menawarkan potensi manfaat yang unik dibandingkan mikroorganisme rizosfer konvensional, karena kedekatan hubungan simbiosis yang lebih intim dengan jaringan tanaman inang memungkinkan produksi senyawa bioaktif yang lebih terlokalisasi dan efektif dalam melindungi tanaman dari serangan patogen maupun meningkatkan toleransi terhadap cekaman lingkungan. Eksplorasi mikroorganisme endofit dari tanaman lokal Indonesia yang telah beradaptasi baik dengan kondisi tropis menawarkan peluang penemuan strain unggul baru yang berpotensi dikembangkan menjadi produk biofertilizer atau biopestisida generasi berikutnya.

Riset mengenai mikroorganisme endofit di Indonesia masih relatif terbatas dibandingkan potensi keanekaragaman hayati yang dimiliki, mengingat kekayaan flora tropis Indonesia menyimpan potensi besar keberadaan strain mikroorganisme endofit unik yang belum tereksplorasi secara ilmiah. Investasi dalam riset eksplorasi dan karakterisasi mikroorganisme endofit lokal menjadi peluang strategis bagi Indonesia untuk mengembangkan produk bioteknologi pertanian yang benar-benar berbasis kekayaan hayati domestik, mengurangi ketergantungan terhadap strain mikroorganisme impor yang mungkin kurang sesuai dengan kondisi agroklimat tropis Indonesia.

4. Interaksi Mikroorganisme dengan Praktik Pertanian Regeneratif

Praktik pertanian regeneratif yang menekankan pemulihan kesehatan ekosistem tanah secara aktif memiliki keterkaitan erat dengan pengelolaan mikroorganisme tanah, mengingat keberhasilan praktik regeneratif seperti penanaman tanaman penutup tanah multispesies dan pengurangan gangguan fisik tanah sangat bergantung pada pemulihan dan penguatan komunitas mikrobioma tanah yang sehat dan beragam. Sinergi antara pendekatan pertanian regeneratif dan pemanfaatan mikroorganisme secara sengaja melalui inokulasi biofertilizer menciptakan strategi komprehensif yang saling memperkuat dalam upaya membangun kesehatan tanah jangka panjang yang menjadi fondasi keberlanjutan sistem produksi pertanian secara menyeluruh.

5. Pemanfaatan Mikroorganisme dalam Pengomposan Skala Industri

Pengomposan skala industri yang memanfaatkan konsorsium mikroorganisme unggul secara sengaja mempercepat proses dekomposisi bahan organik dibandingkan pengomposan alami tanpa inokulasi, memungkinkan produksi kompos berkualitas tinggi dalam waktu yang lebih singkat untuk memenuhi kebutuhan pasar pupuk organik yang terus meningkat. Fasilitas pengomposan skala industri yang dilengkapi sistem pengendalian suhu, kelembapan, dan aerasi otomatis menghasilkan produk kompos dengan konsistensi kualitas yang lebih terjamin dibandingkan metode pengomposan tradisional yang lebih bergantung pada kondisi lingkungan alami yang bervariasi.

Pengembangan fasilitas pengomposan skala industri di Indonesia masih memerlukan dukungan investasi dan transfer teknologi lebih lanjut, mengingat sebagian besar produksi kompos nasional masih dilakukan melalui metode tradisional skala kecil yang memiliki keterbatasan kapasitas produksi dan konsistensi kualitas. Kemitraan antara pemerintah daerah, sektor swasta, dan kelompok tani dalam mengembangkan fasilitas pengomposan skala menengah menjadi strategi yang dapat menjembatani kesenjangan antara kebutuhan pasar pupuk organik yang besar dengan kapasitas produksi domestik yang masih terbatas saat ini.

Pemanfaatan mikroorganisme secara optimal dalam sistem pertanian menegaskan pergeseran paradigma dari pandangan tanah sebagai media tanam pasif menuju pemahaman tanah sebagai ekosistem hidup yang kompleks dan dinamis, di mana kesehatan mikrobioma menjadi fondasi utama produktivitas dan keberlanjutan jangka panjang. Investasi berkelanjutan dalam riset dan aplikasi mikroorganisme menguntungkan akan terus menjadi prioritas penting bagi terwujudnya sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan dan tangguh terhadap berbagai tantangan produksi di masa mendatang.

E. Pertanian Organik dan Hayati

Pertanian organik merupakan sistem produksi pertanian yang menghindari penggunaan input kimia sintetis, termasuk pupuk kimia, pestisida sintetis, dan organisme hasil rekayasa genetika, dengan mengandalkan proses biologis alami, daur ulang bahan organik, dan keseimbangan ekosistem untuk menjaga produktivitas lahan secara

berkelanjutan. Meemken dan Qaim (2018) mengulas berbagai bukti empiris mengenai dampak pertanian organik terhadap ketahanan pangan dan lingkungan, menemukan bahwa meskipun hasil panen pertanian organik umumnya lebih rendah dibandingkan pertanian konvensional, sistem ini menawarkan manfaat lingkungan yang signifikan, termasuk peningkatan keanekaragaman hayati dan pengurangan pencemaran akibat residu bahan kimia sintetis.

Prinsip dasar pertanian organik mencakup pengelolaan kesuburan tanah melalui rotasi tanaman, penggunaan pupuk organik seperti kompos dan pupuk kandang, pengendalian hama secara hayati dan mekanis, serta pemeliharaan keanekaragaman hayati melalui sistem polikultur yang meniru keseimbangan ekosistem alami. Pendekatan holistik ini membedakan pertanian organik dari sekadar substitusi input kimia dengan input organik semata, melainkan mencakup filosofi pengelolaan sistem pertanian secara menyeluruh yang memandang lahan pertanian sebagai ekosistem yang hidup dan saling terkait antara berbagai komponen biotik dan abiotik di dalamnya.

Sertifikasi organik menjadi instrumen penting untuk menjamin kredibilitas klaim produk organik di pasar, yang umumnya melibatkan proses audit dan verifikasi oleh lembaga sertifikasi independen terhadap kepatuhan praktik budi daya terhadap standar organik yang ditetapkan. Di Indonesia, sistem sertifikasi organik diatur melalui Standar Nasional Indonesia yang merujuk pada prinsip-prinsip organik internasional, meskipun proses sertifikasi yang relatif kompleks dan berbiaya tinggi masih menjadi hambatan bagi petani skala kecil untuk mengakses pasar produk organik bersertifikat secara formal, sehingga banyak yang menerapkan praktik organik namun tanpa sertifikasi resmi.

Pertanian hayati (*biological farming*) merupakan konsep yang lebih luas dibandingkan pertanian organik, yang menekankan optimalisasi proses biologis dalam sistem produksi pertanian tanpa harus sepenuhnya menghindari seluruh input kimia sintetis, melainkan berfokus pada integrasi praktik biologis seperti penggunaan biofertilizer dan biopestisida ke dalam sistem pertanian yang lebih konvensional guna mengurangi dampak lingkungan negatif secara bertahap. Pendekatan ini menawarkan jalur transisi yang lebih realistis bagi petani yang belum siap sepenuhnya beralih ke sistem organik murni, namun tetap ingin

mengurangi jejak lingkungan dari praktik budi daya yang mereka jalankan.

Perkembangan pasar produk organik global menunjukkan tren pertumbuhan yang konsisten seiring meningkatnya kesadaran konsumen terhadap keamanan pangan dan keberlanjutan lingkungan, meskipun pangsa pasar produk organik masih relatif kecil dibandingkan produk pertanian konvensional secara keseluruhan. Peluang pengembangan pertanian organik di Indonesia cukup besar mengingat kekayaan keanekaragaman hayati dan tradisi pertanian lokal yang telah lama menerapkan praktik-praktik yang sejalan dengan prinsip organik, meskipun diperlukan dukungan kebijakan dan infrastruktur pemasaran yang lebih memadai untuk mengoptimalkan potensi tersebut secara komersial.

Tabel 7.3 Perbandingan Karakteristik Pertanian Konvensional, Hayati, dan Organik

Aspek	Konvensional	Hayati	Organik
Penggunaan pupuk kimia	Intensif	Dikurangi bertahap	Tidak digunakan
Penggunaan pestisida sintetis	Intensif	Dikombinasikan biopestisida	Tidak digunakan
Sertifikasi	Tidak diperlukan	Umumnya tidak formal	Wajib untuk klaim pasar
Hasil panen	Tinggi	Sedang hingga tinggi	Umumnya lebih rendah
Dampak lingkungan	Berpotensi tinggi	Sedang	Relatif rendah

Tabel di atas menunjukkan bahwa pertanian hayati dapat dipandang sebagai titik tengah transisi antara sistem konvensional dan organik penuh, menawarkan keseimbangan antara produktivitas dan keberlanjutan lingkungan. Pemilihan sistem yang tepat perlu mempertimbangkan konteks spesifik petani, termasuk akses pasar,

kondisi lahan, dan kapasitas pengetahuan dalam menerapkan praktik biologis secara konsisten dan efektif di lapangan.

1. Manajemen Kesuburan Tanah dalam Sistem Organik

Pengelolaan kesuburan tanah dalam sistem pertanian organik mengandalkan strategi jangka panjang yang berbeda secara fundamental dibandingkan sistem konvensional, dengan fokus pada pembangunan kesehatan tanah secara menyeluruh melalui rotasi tanaman yang mencakup tanaman legum penambat nitrogen, aplikasi kompos dan pupuk kandang matang, serta penanaman tanaman penutup tanah (*cover crop*) pada periode tanpa tanaman utama untuk mencegah erosi dan menambah bahan organik tanah secara berkelanjutan dari waktu ke waktu.

Meemken dan Qaim (2018) mencatat bahwa meskipun transisi menuju sistem organik pada tahap awal sering kali disertai penurunan hasil panen sementara akibat proses adaptasi tanah, penerapan yang konsisten dalam jangka panjang dapat menghasilkan tanah dengan struktur dan kesuburan yang lebih baik, ditandai dengan peningkatan kandungan bahan organik, kapasitas menahan air, dan keanekaragaman biologi tanah yang pada akhirnya dapat mendukung stabilitas produktivitas yang lebih baik dalam menghadapi variabilitas kondisi cuaca dibandingkan sistem konvensional yang lebih bergantung pada input kimia sintetis.

2. Tantangan Pemasaran Produk Pertanian Organik di Indonesia

Pengembangan pasar produk organik di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan struktural, termasuk keterbatasan kesadaran konsumen mengenai manfaat produk organik yang sebanding dengan harga premium yang harus dibayarkan, keterbatasan saluran distribusi yang menjangkau konsumen secara luas, serta persaingan dengan produk yang mengklaim organik tanpa sertifikasi resmi yang dapat mengikis kepercayaan konsumen terhadap keaslian klaim organik pada produk yang beredar di pasaran secara umum.

Pengembangan model pemasaran langsung dari petani ke konsumen (*direct marketing*), seperti melalui pasar tani organik dan platform digital yang menghubungkan petani organik dengan komunitas konsumen yang peduli kesehatan, menjadi strategi yang semakin

dikembangkan untuk mengatasi keterbatasan saluran distribusi konvensional. Pendekatan ini juga memungkinkan petani memperoleh harga jual yang lebih baik dibandingkan menjual melalui rantai distribusi konvensional yang panjang, sekaligus membangun hubungan kepercayaan langsung antara produsen dan konsumen yang penting bagi keberlanjutan bisnis pertanian organik dalam jangka panjang.

3. Kontribusi Pertanian Organik terhadap Keanekaragaman Hayati

Sistem pertanian organik secara konsisten menunjukkan kontribusi positif terhadap pelestarian keanekaragaman hayati dibandingkan sistem pertanian konvensional intensif, mencakup keanekaragaman flora liar di sekitar lahan pertanaman, populasi serangga penyerbuk, serta keanekaragaman mikroorganisme tanah yang lebih tinggi akibat tidak adanya tekanan dari aplikasi pestisida kimia sintetis secara rutin. Meemken dan Qaim (2018) mencatat bahwa manfaat keanekaragaman hayati ini memberikan nilai ekologis tambahan yang penting bagi keberlanjutan jangka panjang sistem pangan, meskipun manfaat tersebut sering kali tidak sepenuhnya tercermin dalam harga pasar produk organik yang lebih ditentukan oleh preferensi konsumen terhadap aspek keamanan pangan dibandingkan nilai jasa ekosistem yang dihasilkan.

Peningkatan populasi serangga penyerbuk pada lahan pertanian organik memberikan manfaat tidak langsung yang signifikan bagi produktivitas tanaman yang bergantung pada penyerbukan, seperti berbagai komoditas hortikultura dan buah-buahan, sehingga kontribusi pertanian organik terhadap pelestarian keanekaragaman hayati sesungguhnya juga memberikan manfaat ekonomi tidak langsung melalui peningkatan layanan ekosistem penyerbukan yang mendukung produktivitas pertanian secara keseluruhan pada skala lanskap yang lebih luas di sekitar area pertanian organik.

4. Sinergi Pertanian Organik dengan Pariwisata Agro

Lahan pertanian organik yang dikelola dengan baik sering kali menawarkan daya tarik visual dan edukatif yang lebih tinggi dibandingkan lahan pertanian konvensional, menciptakan peluang pengembangan pariwisata agro (*agrotourism*) yang dapat menjadi

sumber pendapatan tambahan bagi petani organik, sekaligus sarana edukasi publik mengenai manfaat dan praktik pertanian berkelanjutan. Integrasi pertanian organik dengan aktivitas wisata edukatif, seperti kunjungan lapangan dan lokakarya budi daya organik bagi masyarakat umum, menawarkan model bisnis diversifikasi yang menarik bagi petani organik dalam meningkatkan nilai ekonomi lahan mereka melampaui penjualan hasil panen semata.

5. Peran Petani Perempuan dalam Gerakan Pertanian Organik

Perempuan petani sering kali menjadi motor penggerak penting dalam gerakan pertanian organik di berbagai komunitas, khususnya terkait dengan pengelolaan pekarangan rumah tangga yang menerapkan prinsip organik untuk memenuhi kebutuhan pangan keluarga sekaligus menghasilkan produk yang dapat dijual di pasar lokal sebagai sumber pendapatan tambahan. Keterlibatan aktif perempuan dalam kelompok tani organik turut berkontribusi terhadap penguatan kapasitas kolektif komunitas dalam menerapkan dan mempertahankan praktik pertanian organik secara konsisten dari generasi ke generasi berikutnya.

Program pemberdayaan perempuan petani organik yang menyediakan akses pelatihan teknis, permodalan, dan pemasaran secara khusus dapat memperkuat peran strategis perempuan dalam gerakan pertanian organik nasional, mengingat perempuan sering kali menghadapi hambatan struktural yang lebih besar dibandingkan laki-laki dalam mengakses sumber daya produktif seperti lahan dan modal usaha tani. Pengintegrasian perspektif gender dalam kebijakan pengembangan pertanian organik menjadi penting untuk memastikan manfaat gerakan ini dapat dirasakan secara inklusif oleh seluruh pelaku usaha tani, baik laki-laki maupun perempuan, secara setara.

Perkembangan pertanian organik dan hayati di Indonesia menunjukkan lintasan positif meskipun masih memerlukan penguatan dukungan kebijakan, infrastruktur pemasaran, dan edukasi konsumen agar dapat berkembang secara lebih signifikan. Pendekatan bertahap yang memberikan ruang bagi petani untuk bertransisi dari sistem konvensional menuju sistem yang lebih hayati dan organik, tanpa memaksakan perubahan drastis yang berisiko terhadap mata pencaharian mereka, menjadi strategi yang lebih realistis untuk memperluas cakupan penerapan prinsip-prinsip pertanian berkelanjutan ini secara nasional.

F. Teknologi Benih Berkelanjutan

Ketersediaan benih unggul bermutu menjadi fondasi mendasar bagi keberhasilan sistem produksi pertanian berkelanjutan, mengingat kualitas benih yang digunakan petani secara langsung memengaruhi produktivitas, ketahanan terhadap hama dan penyakit, serta efisiensi penggunaan input produksi lainnya. Louwaars (2018) menjelaskan bahwa sistem perbenihan yang berkelanjutan perlu menyeimbangkan antara sistem benih formal yang menghasilkan varietas unggul bersertifikat, dengan sistem benih informal yang dikelola petani secara mandiri melalui penyimpanan dan pertukaran benih lokal yang telah beradaptasi dengan kondisi agroklimat setempat selama bertahun-tahun.

Teknologi pelapisan benih (*seed coating*) dan pelet benih (*seed pelleting*) menjadi inovasi yang berkontribusi terhadap peningkatan viabilitas dan efisiensi penggunaan benih, melalui penambahan lapisan pelindung yang mengandung nutrisi awal, fungisida biologis, atau inokulan mikroorganisme menguntungkan yang mendukung pertumbuhan awal bibit setelah perkecambahan. Teknologi ini sangat bermanfaat untuk benih berukuran kecil yang sulit ditangani secara manual, seperti benih sayuran tertentu, karena pelapisan benih dapat membuat ukuran dan bentuk benih menjadi lebih seragam sehingga memudahkan proses penanaman menggunakan alat tanam mekanis dengan presisi yang lebih tinggi.

Bank benih komunitas (*community seed bank*) berperan penting dalam pelestarian keanekaragaman genetik varietas lokal yang telah beradaptasi dengan kondisi spesifik suatu wilayah, sekaligus menyediakan sumber benih alternatif bagi petani ketika terjadi gangguan pada sistem perbenihan formal, seperti akibat bencana alam atau krisis ekonomi yang membatasi akses petani terhadap benih komersial. Sperling dan kolega (2020) menekankan bahwa penguatan sistem benih komunitas menjadi strategi penting dalam membangun ketahanan sistem pangan lokal, khususnya pada komunitas petani yang menghadapi keterbatasan akses terhadap sistem perbenihan formal akibat kendala geografis atau ekonomi.

Teknologi penyimpanan benih modern, termasuk pengendalian suhu dan kelembapan ruang penyimpanan, memainkan peran krusial dalam mempertahankan viabilitas benih dalam jangka panjang,

khususnya untuk keperluan konservasi plasma nutfah dan cadangan benih strategis nasional. Bank gen nasional yang menyimpan koleksi plasma nutfah tanaman pertanian menjadi aset strategis bagi ketahanan pangan jangka panjang, karena menyediakan sumber material genetik yang dapat dimanfaatkan untuk program pemuliaan di masa depan, terutama dalam menghadapi tantangan baru seperti kemunculan hama dan penyakit baru atau perubahan pola iklim yang belum pernah dihadapi sebelumnya oleh varietas yang ada saat ini.

Kedaulatan benih (*seed sovereignty*) menjadi isu yang semakin mendapat perhatian dalam wacana pertanian berkelanjutan, yang menyoroti pentingnya hak petani untuk mengakses, menyimpan, menggunakan, dan mempertukarkan benih secara bebas tanpa hambatan hukum kekayaan intelektual yang berlebihan, khususnya terkait dengan benih varietas hasil pemuliaan formal yang dilindungi hak paten atau perlindungan varietas tanaman. Perdebatan mengenai keseimbangan antara perlindungan kekayaan intelektual pemulia tanaman dengan hak tradisional petani dalam mengelola benih secara mandiri terus menjadi isu penting dalam perumusan kebijakan perbenihan di berbagai negara, termasuk Indonesia.

Tabel 7.4 Perbandingan Sistem Benih Formal dan Informal

Aspek	Sistem Benih Formal	Sistem Benih Informal
Sumber benih	Perusahaan/lembaga pemuliaan bersertifikat	Petani, kelompok tani, bank benih komunitas
Jaminan mutu	Sertifikasi resmi dan standar baku	Berdasarkan pengalaman dan kepercayaan lokal
Keanekaragaman genetik	Cenderung seragam (varietas unggul)	Tinggi (varietas lokal beragam)
Aksesibilitas bagi petani kecil	Terbatas oleh biaya dan distribusi	Tinggi dan fleksibel
Adaptasi terhadap kondisi lokal	Umum, memerlukan uji multilokasi	Sangat spesifik dan teruji turun-temurun

1. Inovasi Priming Benih untuk Peningkatan Vigor Perkecambahan

Teknik *priming* benih merupakan perlakuan pratanam yang bertujuan mempercepat dan menyeragamkan proses perkecambahan benih melalui pengaturan kondisi hidrasi terkontrol sebelum benih mengalami dehidrasi kembali dan disimpan hingga saat tanam, sehingga benih yang telah diberi perlakuan *priming* mampu berkecambah lebih cepat dan seragam dibandingkan benih tanpa perlakuan ketika ditanam pada kondisi lapangan yang sesungguhnya. Teknik ini terbukti sangat bermanfaat untuk meningkatkan keberhasilan penanaman pada kondisi lingkungan yang kurang optimal, seperti tanah dengan kelembapan rendah atau suhu yang tidak ideal bagi perkecambahan normal.

Pengembangan teknik *priming* benih yang memanfaatkan larutan mikroorganisme menguntungkan atau ekstrak bahan alami tertentu, yang dikenal sebagai *bio-priming*, menggabungkan manfaat peningkatan vigor perkecambahan dengan manfaat perlindungan biologis terhadap patogen yang dapat menyerang benih pada fase awal pertumbuhan. Pendekatan bio-priming ini menjadi arah inovasi yang menjanjikan dalam teknologi benih berkelanjutan, karena mengurangi kebutuhan aplikasi fungisida kimia sintetis pada benih sekaligus meningkatkan peluang keberhasilan tanaman melewati fase kritis awal pertumbuhan yang paling rentan terhadap serangan patogen dan kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan.

2. Digitalisasi Sistem Informasi Perbenihan Nasional

Pengembangan sistem informasi perbenihan digital yang terintegrasi memungkinkan petani mengakses informasi mengenai ketersediaan, sumber, dan kualitas benih unggul bersertifikat secara lebih mudah dan transparan, mengurangi risiko petani mendapatkan benih palsu atau berkualitas rendah yang beredar di pasaran tanpa jaminan mutu yang memadai. Sistem digital ini juga bermanfaat bagi produsen benih dan pemerintah dalam memantau distribusi dan ketersediaan benih unggul di berbagai wilayah, mendukung perencanaan produksi benih yang lebih responsif terhadap kebutuhan aktual petani di lapangan pada setiap musim tanam.

Integrasi sistem informasi perbenihan dengan platform pemasaran digital pertanian yang lebih luas membuka peluang bagi

petani untuk memperoleh informasi lengkap mengenai karakteristik varietas, termasuk keunggulan dan kesesuaian dengan kondisi agroklimat tertentu, sebelum memutuskan pembelian benih, sehingga meningkatkan kualitas pengambilan keputusan petani dalam memilih varietas yang paling sesuai dengan kondisi lahan dan tujuan produksi mereka secara spesifik, dibandingkan mengandalkan informasi terbatas dari penjual benih semata.

3. Adaptasi Teknologi Benih terhadap Perubahan Pola Iklim

Perubahan pola curah hujan dan suhu akibat perubahan iklim menuntut adaptasi teknologi benih yang lebih responsif, termasuk pengembangan benih dengan karakteristik dormansi yang dapat disesuaikan untuk mengantisipasi pergeseran awal musim tanam yang semakin sulit diprediksi menggunakan kalender tanam tradisional. Penelitian mengenai respons perkecambahan berbagai varietas terhadap variasi suhu dan kelembapan menjadi masukan penting bagi pengembangan rekomendasi waktu tanam yang lebih adaptif, membantu petani mengoptimalkan peluang keberhasilan produksi di tengah ketidakpastian pola iklim yang semakin nyata dirasakan dampaknya pada sistem pertanian kontemporer.

Keberlanjutan sistem pangan nasional pada akhirnya sangat bergantung pada fondasi sistem perbenihan yang kuat, yang mampu menyeimbangkan antara penyediaan varietas unggul modern dan pelestarian keanekaragaman genetik lokal melalui pemberdayaan sistem benih formal dan informal secara bersinergi. Penguatan kedaulatan benih petani, tanpa mengabaikan manfaat inovasi teknologi perbenihan modern, menjadi kunci penting bagi terwujudnya kedaulatan pangan Indonesia yang berkelanjutan dan berkeadilan bagi seluruh pelaku dalam rantai nilai pertanian nasional.

G. Tantangan Etika dan Regulasi

Penerapan bioteknologi pertanian, khususnya rekayasa genetika dan pengeditan genom, menimbulkan berbagai pertanyaan etis yang memerlukan pertimbangan cermat, termasuk potensi dampak jangka panjang terhadap keanekaragaman hayati, risiko aliran gen (*gene flow*)

ke kerabat liar tanaman budi daya, serta implikasi sosial ekonomi terhadap struktur kepemilikan dan akses petani terhadap teknologi benih. Eriksson, Custers, Bohanec, dan kolega (2020) mengulas berbagai perdebatan mengenai kerangka regulasi organisme hasil rekayasa genetika di berbagai yurisdiksi, menemukan bahwa pendekatan regulasi yang terlalu ketat berpotensi menghambat inovasi yang bermanfaat, sementara pendekatan yang terlalu longgar berisiko mengabaikan kekhawatiran legitimasi masyarakat mengenai keamanan dan dampak jangka panjang teknologi tersebut.

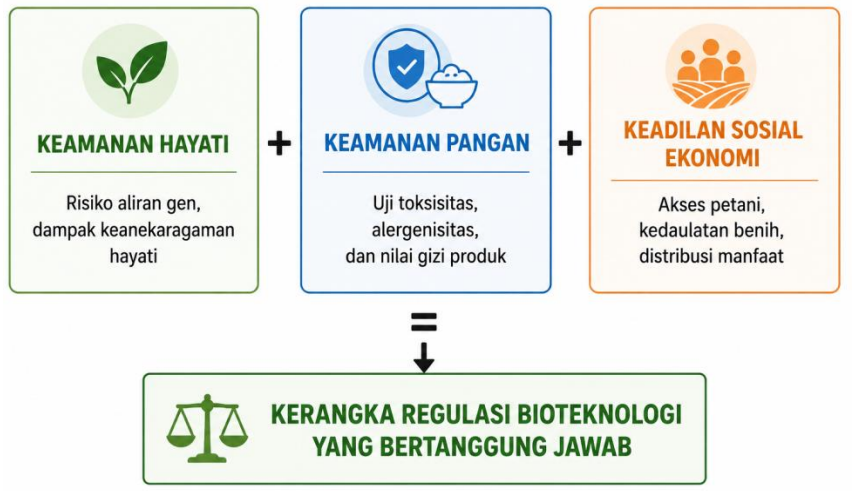
Perdebatan mengenai status regulasi produk hasil pengeditan genom, khususnya yang tidak mengandung materi genetik asing dari spesies lain, menjadi isu regulasi kontemporer yang penting, mengingat sejumlah negara telah mengecualikan produk tersebut dari kerangka regulasi organisme hasil rekayasa genetika konvensional, sementara negara lain tetap mengategorikannya dalam kerangka regulasi yang sama ketatnya. Friedrichs, Takasu, Kearns, dan kolega (2019) mencatat bahwa perbedaan pendekatan regulasi antarnegara ini berpotensi menciptakan hambatan perdagangan internasional produk pertanian hasil bioteknologi, sehingga diperlukan upaya harmonisasi regulasi di tingkat global guna memfasilitasi perdagangan yang adil sekaligus menjamin keamanan pangan dan lingkungan secara memadai.

Aspek keadilan sosial dalam penerapan bioteknologi pertanian juga menjadi perhatian penting, khususnya terkait dengan potensi konsentrasi kepemilikan teknologi benih pada segelintir perusahaan multinasional besar yang dapat memperlemah posisi tawar petani kecil dalam rantai nilai pertanian global. Kekhawatiran mengenai ketergantungan petani terhadap benih hibrida atau hasil rekayasa genetika yang tidak dapat disimpan dan ditanam kembali pada musim berikutnya menjadi isu yang terus diperdebatkan, mengingat praktik ini berpotensi mengikis kemandirian dan kedaulatan benih petani yang selama ini menjadi bagian integral dari sistem pertanian tradisional di banyak wilayah, termasuk Indonesia.

Kerangka regulasi bioteknologi pertanian di Indonesia diatur melalui berbagai peraturan perundang-undangan yang melibatkan koordinasi antara Kementerian Pertanian, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, serta Badan Pengawas Obat dan Makanan, guna memastikan keamanan hayati, keamanan pangan, dan keamanan

lingkungan dari produk bioteknologi yang akan dilepas ke masyarakat. Kompleksitas koordinasi lintas lembaga ini terkadang menimbulkan proses perizinan yang panjang dan memerlukan waktu lama, sehingga perlu terus disempurnakan agar dapat menyeimbangkan antara kehati-hatian dalam menjamin keamanan dengan kebutuhan mempercepat akses petani terhadap inovasi bioteknologi yang bermanfaat bagi peningkatan produktivitas dan keberlanjutan pertanian nasional.

Gambar 7.2 Kerangka Pertimbangan Etika dalam Pengembangan Bioteknologi Pertanian



Kerangka pertimbangan etika bioteknologi pertanian perlu mengintegrasikan tiga dimensi utama secara seimbang, yaitu keamanan hayati, keamanan pangan, dan keadilan sosial ekonomi. Pengabaian salah satu dimensi berpotensi menghasilkan kebijakan yang tidak komprehensif dan dapat menimbulkan konsekuensi negatif yang tidak terantisipasi di kemudian hari bagi keberlanjutan sistem pertanian secara menyeluruh.

1. Etika dalam Pemanfaatan Teknologi Pertanian Modern

Perkembangan teknologi, seperti kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*/AI), *Internet of Things* (IoT), *drone*, bioteknologi, dan rekayasa genetika, telah meningkatkan efisiensi dan produktivitas sektor pertanian. Namun, pemanfaatan teknologi tersebut juga memunculkan berbagai persoalan etika, terutama terkait keamanan pangan, kesejahteraan petani, serta dampaknya terhadap lingkungan.

Penggunaan teknologi harus mempertimbangkan prinsip kehati-hatian agar tidak menimbulkan risiko terhadap kesehatan manusia maupun keseimbangan ekosistem. Selain itu, penerapan inovasi pertanian perlu dilakukan secara transparan sehingga masyarakat memahami manfaat, risiko, dan batasan dari teknologi yang digunakan.

Aspek etika juga berkaitan dengan pemerataan akses terhadap inovasi. Tidak semua petani memiliki kemampuan finansial maupun pengetahuan untuk mengadopsi teknologi modern. Apabila kesenjangan ini tidak diatasi, transformasi pertanian justru berpotensi memperlebar ketimpangan antara petani skala besar dan petani kecil. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pertanian harus memperhatikan prinsip keadilan, inklusivitas, dan kebermanfaatan bagi seluruh pelaku sektor pertanian.

2. Perlindungan Lingkungan dan Pengelolaan Sumber Daya Alam

Tantangan etika dalam pertanian berkelanjutan juga berkaitan dengan tanggung jawab dalam menjaga kelestarian lingkungan. Praktik pertanian yang mengejar keuntungan jangka pendek sering kali menyebabkan eksploitasi lahan, pencemaran air akibat penggunaan pupuk dan pestisida berlebihan, serta hilangnya keanekaragaman hayati. Kondisi tersebut bertentangan dengan prinsip pertanian berkelanjutan yang menempatkan konservasi sumber daya alam sebagai prioritas utama. Dari sisi regulasi, pemerintah perlu menetapkan kebijakan yang mendorong penerapan praktik budidaya ramah lingkungan, pengendalian pencemaran, konservasi tanah dan air, serta perlindungan kawasan pertanian produktif. Regulasi yang jelas dan disertai mekanisme pengawasan yang efektif akan mendorong pelaku usaha pertanian untuk mematuhi standar lingkungan. Dengan demikian, keseimbangan antara produktivitas pertanian dan kelestarian ekosistem dapat terus dipertahankan.

3. Regulasi Keamanan Pangan dan Perlindungan Konsumen

Keamanan pangan merupakan aspek penting dalam sistem pertanian berkelanjutan. Produk pertanian harus memenuhi standar mutu, bebas dari cemaran biologis, kimia, maupun fisik, serta aman untuk dikonsumsi masyarakat. Oleh karena itu, diperlukan regulasi yang mengatur proses produksi, pengolahan, distribusi, hingga pelabelan

produk pangan agar seluruh rantai pasok memenuhi standar keamanan yang berlaku.

Selain menjamin keamanan pangan, regulasi juga berfungsi melindungi hak konsumen melalui penyediaan informasi yang akurat mengenai asal-usul produk, kandungan bahan, dan metode produksi. Sistem sertifikasi, ketertelusuran (*traceability*), serta pengawasan terhadap produk pangan menjadi instrumen penting dalam membangun kepercayaan masyarakat. Regulasi yang efektif akan meningkatkan kualitas produk pertanian sekaligus memperkuat daya saing sektor pertanian di pasar nasional maupun internasional.

4. Tata Kelola dan Kebijakan Pendukung Pertanian Berkelanjutan

Keberhasilan implementasi pertanian berkelanjutan sangat dipengaruhi oleh kualitas tata kelola dan kebijakan yang diterapkan. Pemerintah memiliki peran strategis dalam menyusun regulasi yang mampu menciptakan keseimbangan antara kepentingan ekonomi, sosial, dan lingkungan. Kebijakan tersebut meliputi perlindungan lahan pertanian, pengembangan inovasi teknologi, insentif bagi praktik pertanian ramah lingkungan, peningkatan kapasitas petani, serta penguatan kelembagaan pertanian.

Di samping itu, implementasi regulasi memerlukan koordinasi yang baik antara pemerintah, sektor swasta, perguruan tinggi, lembaga penelitian, organisasi masyarakat, dan petani. Kolaborasi tersebut memungkinkan penyusunan kebijakan yang lebih adaptif terhadap perkembangan teknologi, perubahan iklim, serta dinamika kebutuhan pangan. Dengan tata kelola yang baik dan regulasi yang konsisten, pertanian berkelanjutan dapat berkembang secara efektif sehingga mampu mendukung ketahanan pangan, meningkatkan kesejahteraan petani, dan menjaga kelestarian sumber daya alam dalam jangka panjang.

Masa depan bioteknologi pertanian Indonesia akan sangat ditentukan oleh kemampuan bangsa ini dalam membangun tata kelola yang berimbang antara mendorong inovasi dan menjaga kehati-hatian, antara memanfaatkan peluang ekonomi dan melindungi kepentingan sosial petani kecil, serta antara mengejar kemajuan teknologi dan menjaga kelestarian lingkungan dan keanekaragaman hayati.



BAB VIII
SISTEM PRODUKSI PERTANIAN TERINTEGRASI

Sistem produksi pertanian terintegrasi merupakan pendekatan pengelolaan usaha tani yang menggabungkan dua atau lebih komponen produksi, seperti tanaman, ternak, dan perikanan, ke dalam satu unit pengelolaan yang saling mendukung guna mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya dan meminimalkan limbah yang terbuang percuma. Bab ini mengulas berbagai model sistem terintegrasi, mulai dari pertanian terpadu tanaman-ternak, sistem mina padi, *integrated farming system* secara umum, pertanian sirkular (*circular agriculture*), pertanian tanpa limbah (*zero waste agriculture*), pemanfaatan limbah pertanian, hingga berbagai studi implementasi sistem terintegrasi yang telah diterapkan di berbagai wilayah Indonesia.

Sekaran, Lai, Ussiri, Kumar, dan Clay (2021) menegaskan bahwa sistem pertanian terintegrasi menawarkan solusi strategis untuk mengatasi berbagai tantangan keberlanjutan pertanian modern, termasuk peningkatan efisiensi penggunaan sumber daya, diversifikasi sumber pendapatan petani, serta pengurangan dampak lingkungan negatif melalui pemanfaatan siklus hara dan energi yang lebih tertutup dibandingkan sistem produksi tunggal (*monoculture*) yang selama ini mendominasi praktik pertanian modern konvensional di berbagai belahan dunia, termasuk Indonesia.

A. Pertanian Terpadu Tanaman-Ternak

Sistem pertanian terpadu tanaman-ternak (*integrated crop-livestock system*) merupakan pendekatan pengelolaan usaha tani yang menggabungkan produksi tanaman pangan atau hortikultura dengan pemeliharaan ternak dalam satu unit lahan yang sama, memungkinkan terjadinya aliran sumber daya timbal balik antara kedua komponen produksi tersebut. Franzluebbers dan kolega (2021) menjelaskan bahwa integrasi ini menciptakan sinergi yang saling menguntungkan, di mana

limbah tanaman seperti jerami dan hijauan dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak, sementara kotoran ternak diolah menjadi pupuk organik yang mengembalikan kesuburan tanah, sehingga membentuk siklus hara yang lebih tertutup dan efisien dibandingkan sistem produksi tanaman atau ternak yang dikelola secara terpisah.

Manfaat ekologis sistem terpadu tanaman-ternak mencakup perbaikan struktur dan kesuburan tanah melalui penambahan bahan organik dari kotoran ternak, pengurangan kebutuhan pupuk kimia sintetis, serta peningkatan keanekaragaman hayati melalui variasi vegetasi yang mendukung populasi organisme tanah yang lebih beragam. Sekaran, Lai, Ussiri, Kumar, dan Clay (2021) mencatat bahwa sistem terpadu juga berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan sistem pertanian terhadap risiko iklim dan fluktuasi harga pasar, karena diversifikasi sumber pendapatan dari tanaman dan ternak memberikan bantalan ekonomi bagi petani ketika salah satu komoditas mengalami penurunan harga atau kegagalan produksi akibat faktor cuaca yang tidak terduga.

Berbagai model integrasi tanaman-ternak dapat diterapkan sesuai dengan kondisi agroekologi dan preferensi petani, meliputi sistem tumpang sari tanaman pakan dengan tanaman pangan, sistem penggembalaan rotasi pada lahan bekas panen, serta sistem kandang terintegrasi yang menempatkan kandang ternak berdekatan dengan lahan pertanaman untuk memudahkan transfer pupuk organik dan pakan hijauan. Pemilihan model integrasi yang tepat perlu mempertimbangkan jenis komoditas tanaman dan ternak yang dipelihara, ketersediaan lahan, serta preferensi dan kapasitas manajerial petani dalam mengelola kompleksitas sistem produksi yang melibatkan dua jenis komoditas berbeda secara simultan.

Sistem integrasi sapi-padi menjadi salah satu model yang paling banyak diterapkan di Indonesia, khususnya di wilayah sentra produksi padi, di mana jerami padi dimanfaatkan sebagai pakan ternak sapi setelah melalui proses fermentasi untuk meningkatkan nilai nutrisinya, sementara kotoran sapi diolah menjadi pupuk kandang atau biogas yang dimanfaatkan kembali untuk mendukung produksi tanaman padi pada musim tanam berikutnya. Model ini terbukti mampu meningkatkan pendapatan petani secara signifikan melalui diversifikasi sumber pendapatan, sekaligus mengurangi biaya produksi melalui substitusi

pupuk kimia dengan pupuk organik hasil pengolahan kotoran ternak yang tersedia secara lokal di tingkat usaha tani.

Tantangan implementasi sistem terpadu tanaman-ternak meliputi kebutuhan pengetahuan dan keterampilan manajerial yang lebih kompleks dibandingkan sistem produksi tunggal, kebutuhan investasi awal untuk infrastruktur seperti kandang dan fasilitas pengolahan pupuk organik, serta potensi konflik pemanfaatan lahan antara kebutuhan pakan ternak dan produksi tanaman pangan pada lahan yang terbatas. Pendampingan teknis yang intensif dari penyuluh pertanian dan peternakan menjadi kunci penting dalam mendukung petani mengoptimalkan manajemen sistem terpadu ini, khususnya dalam menentukan proporsi ideal antara luas lahan tanaman dan jumlah ternak yang dipelihara agar tercapai keseimbangan optimal dalam siklus hara dan pakan pada sistem terintegrasi tersebut.

Tabel 8.1 Aliran Sumber Daya Timbal Balik dalam Sistem Terpadu Tanaman-Ternak

Komponen	Kontribusi terhadap Ternak	Kontribusi terhadap Tanaman
Jerami dan sisa panen	Sumber pakan hijauan/kasar	-
Kotoran ternak	-	Pupuk organik dan penambah bahan organik tanah
Tenaga ternak	-	Tenaga pengolahan lahan (pada sistem tradisional)
Biogas dari limbah ternak	Sumber energi kandang	Sumber energi pengolahan hasil pertanian
Lahan penggembalaan rotasi	Sumber pakan segar	Pemupukan alami dari sisa kotoran saat merumput

Tabel di atas memperlihatkan bahwa sistem terpadu tanaman-ternak menciptakan aliran sumber daya dua arah yang saling

menguntungkan, sehingga mengurangi kebutuhan input eksternal pada kedua komponen produksi. Efisiensi yang dihasilkan dari siklus tertutup ini menjadi salah satu argumen utama keberlanjutan ekonomi dan lingkungan dari penerapan sistem pertanian terpadu dibandingkan sistem produksi tunggal yang terpisah.

1. Manajemen Nutrisi Pakan dari Hasil Samping Tanaman

Optimalisasi pemanfaatan hasil samping tanaman sebagai pakan ternak memerlukan pemahaman mengenai kandungan nutrisi dan metode pengolahan yang tepat untuk meningkatkan kecernaan dan nilai gizi bahan pakan tersebut. Jerami padi misalnya, memiliki kandungan serat kasar tinggi namun kandungan protein rendah, sehingga memerlukan proses pengolahan seperti fermentasi menggunakan mikroorganisme selulolitik atau amoniasi menggunakan urea untuk meningkatkan kecernaan dan kandungan protein kasar, sebelum dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai pakan utama bagi ternak ruminansia seperti sapi dan kambing dalam sistem integrasi tanaman-ternak.

Diversifikasi sumber pakan dari berbagai hasil samping tanaman, seperti daun singkong, batang jagung, dan kulit kacang tanah, dapat meningkatkan kualitas nutrisi ransum ternak secara keseluruhan melalui kombinasi berbagai bahan pakan yang saling melengkapi kandungan nutrisinya. Pengembangan formulasi pakan berbasis hasil samping tanaman lokal yang disesuaikan dengan ketersediaan musiman di suatu wilayah menjadi strategi penting untuk mengoptimalkan sistem integrasi tanaman-ternak, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pakan konsentrat komersial yang harganya cenderung fluktuatif dan membebani biaya produksi peternakan.

2. Pengelolaan Kotoran Ternak menjadi Pupuk Berkualitas

Pengolahan kotoran ternak menjadi pupuk organik berkualitas memerlukan proses pengomposan yang tepat untuk menstabilkan kandungan hara dan menghilangkan patogen serta biji gulma yang mungkin terkandung dalam kotoran ternak segar. Proses pengomposan yang baik melibatkan pengaturan rasio karbon-nitrogen yang optimal, kelembapan yang sesuai, serta aerasi yang memadai untuk mendukung aktivitas mikroorganisme dekomposer, menghasilkan pupuk kompos

matang dengan kandungan hara yang stabil dan aman diaplikasikan pada tanaman tanpa risiko efek samping negatif yang dapat terjadi apabila kotoran ternak segar langsung diaplikasikan ke lahan pertanaman.

Teknologi biodigester untuk mengolah kotoran ternak menjadi biogas sekaligus menghasilkan pupuk organik cair sebagai produk sampingan proses pencernaan anaerobik menjadi solusi yang semakin diadopsi pada sistem integrasi tanaman-ternak skala menengah hingga besar. Pemanfaatan biogas untuk kebutuhan energi rumah tangga atau operasional usaha tani mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, sementara pupuk organik cair hasil sampingan biodigester memiliki kandungan hara yang lebih mudah diserap tanaman dibandingkan kompos padat konvensional, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan hara dari limbah ternak secara keseluruhan dalam sistem pertanian terpadu.

3. Kesehatan Ternak dalam Sistem Terpadu

Pengelolaan kesehatan ternak menjadi aspek penting yang tidak boleh diabaikan dalam sistem terpadu tanaman-ternak, mengingat kondisi lingkungan yang lebih terbuka dan bervariasi dibandingkan sistem peternakan intensif konvensional dapat meningkatkan risiko paparan terhadap parasit dan penyakit tertentu. Penerapan program vaksinasi rutin, pengendalian parasit internal dan eksternal secara terjadwal, serta pemantauan kondisi kesehatan ternak secara berkala menjadi praktik manajemen penting yang perlu diterapkan secara konsisten untuk menjaga produktivitas ternak dalam sistem integrasi yang melibatkan interaksi lebih dekat dengan lingkungan lahan pertanaman.

Rotasi lokasi penggembalaan atau penempatan kandang secara berkala dapat membantu memutus siklus hidup parasit tertentu yang bergantung pada kontak berkelanjutan dengan area yang sama, sehingga mengurangi tekanan infeksi parasit pada ternak tanpa harus bergantung sepenuhnya pada obat-obatan kimia sintetis. Pendekatan manajemen kesehatan ternak yang terintegrasi dengan siklus rotasi tanaman ini mencerminkan prinsip holistik sistem pertanian terpadu, di mana pengelolaan kesehatan hewan tidak dipandang secara terpisah, melainkan sebagai bagian integral dari keseluruhan sistem manajemen lahan dan sumber daya yang saling berkaitan.

4. Diversifikasi Jenis Ternak dalam Sistem Terpadu

Selain sapi yang menjadi jenis ternak paling umum diintegrasikan dengan tanaman pangan, diversifikasi jenis ternak lain seperti kambing, domba, dan unggas juga menawarkan peluang integrasi yang menarik disesuaikan dengan karakteristik lahan dan preferensi petani setempat. Kambing dan domba misalnya, memiliki keunggulan dalam memanfaatkan vegetasi gulma dan semak yang kurang disukai ternak sapi, sehingga cocok diintegrasikan pada sistem perkebunan dengan tutupan vegetasi bawah tegakan yang beragam, sekaligus membantu pengendalian gulma secara alami tanpa memerlukan aplikasi herbisida kimia yang berdampak negatif terhadap lingkungan.

Integrasi unggas, seperti ayam kampung dan itik, dengan sistem pertanaman padi atau hortikultura menawarkan manfaat tambahan berupa pengendalian hama serangga secara alami melalui aktivitas mencari makan unggas di sekitar area pertanaman, sekaligus menghasilkan sumber pendapatan tambahan dari telur dan daging unggas bagi rumah tangga petani. Model integrasi unggas ini particularly cocok diterapkan pada skala usaha tani rumah tangga yang memiliki keterbatasan lahan, mengingat kebutuhan ruang untuk pemeliharaan unggas relatif lebih kecil dibandingkan ternak ruminansia besar seperti sapi dan kerbau.

5. Kontribusi Sistem Terpadu terhadap Pengurangan Emisi Metana

Pengelolaan kotoran ternak yang tepat dalam sistem terpadu tanaman-ternak, khususnya melalui pengolahan biodigester anaerobik, berkontribusi terhadap pengurangan emisi metana yang signifikan dibandingkan penumpukan kotoran ternak secara terbuka yang menghasilkan emisi metana tinggi akibat proses dekomposisi anaerobik yang tidak terkendali. Penangkapan metana melalui biodigester tidak hanya mengurangi dampak pemanasan global, tetapi juga menghasilkan sumber energi terbarukan yang bermanfaat, menjadikan pengelolaan limbah ternak sebagai salah satu titik intervensi penting dalam strategi mitigasi emisi gas rumah kaca sektor pertanian secara keseluruhan.

6. Peran Sistem Terpadu dalam Ketahanan Ekonomi Rumah Tangga Petani

Diversifikasi sumber pendapatan yang dihasilkan dari sistem terpadu tanaman-ternak memberikan bantalan ekonomi penting bagi rumah tangga petani dalam menghadapi guncangan ekonomi maupun lingkungan, mengingat ketergantungan pada satu sumber pendapatan tunggal meningkatkan kerentanan rumah tangga terhadap risiko kegagalan produksi atau fluktuasi harga komoditas tertentu. Data empiris dari berbagai studi menunjukkan bahwa rumah tangga petani yang menerapkan sistem terpadu cenderung memiliki tingkat stabilitas pendapatan yang lebih baik dibandingkan rumah tangga yang mengandalkan sistem produksi tunggal, khususnya pada periode terjadinya anomali cuaca yang memengaruhi produktivitas salah satu komoditas yang mereka usahakan.

Kontribusi sistem terpadu terhadap ketahanan ekonomi rumah tangga petani juga tercermin dari fleksibilitas dalam pengelolaan arus kas usaha tani, mengingat siklus produksi ternak dan tanaman yang berbeda memungkinkan petani memperoleh pendapatan pada periode waktu yang lebih tersebar sepanjang tahun, dibandingkan sistem monokultur yang umumnya hanya menghasilkan pendapatan besar pada periode panen tertentu saja, sehingga memerlukan pengelolaan keuangan yang lebih hati-hati untuk mencukupi kebutuhan rumah tangga pada periode antarpanen yang mungkin berlangsung cukup lama.

Sistem terpadu tanaman-ternak menegaskan kearifan strategi diversifikasi yang telah lama dipraktikkan petani Indonesia secara tradisional, yang kini semakin diperkuat dengan dukungan pengetahuan ilmiah modern mengenai optimalisasi siklus hara dan energi antarkomponen produksi. Penguatan dukungan kebijakan dan pendampingan teknis yang konsisten akan menjadi penentu penting bagi perluasan adopsi sistem ini secara lebih signifikan di berbagai wilayah Indonesia pada masa mendatang.

B. Sistem Mina Padi

Sistem mina padi (*rice-fish farming*) merupakan salah satu bentuk sistem pertanian terintegrasi tertua di Asia yang menggabungkan budi daya ikan dengan tanaman padi sawah dalam satu hamparan lahan

yang sama, memanfaatkan genangan air sawah sebagai media hidup ikan sekaligus mendukung pertumbuhan tanaman padi. Ahmed, Zhang, Bunting, dan kolega (2021) menjelaskan bahwa sistem mina padi menciptakan hubungan simbiosis yang saling menguntungkan, di mana ikan membantu mengendalikan populasi hama dan gulma melalui aktivitas makan mereka, sekaligus kotoran ikan menyediakan sumber hara tambahan bagi tanaman padi, sementara tanaman padi memberikan naungan dan perlindungan bagi ikan dari predator dan paparan sinar matahari berlebih.

Manfaat ekologis sistem mina padi mencakup pengurangan kebutuhan pestisida kimia karena ikan berperan sebagai agen pengendali hayati alami terhadap berbagai hama padi, seperti wereng dan larva serangga lainnya, serta pengurangan kebutuhan pupuk kimia melalui pemanfaatan kotoran ikan sebagai sumber hara organik. Nayak dan kolega (2020) mencatat bahwa sistem mina padi juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas metana dari lahan sawah tergenang, karena aktivitas ikan dalam mengaduk lapisan lumpur dasar sawah meningkatkan oksigenasi tanah yang menekan aktivitas mikroorganisme penghasil metana dalam kondisi anaerobik yang biasa terjadi pada sawah tergenang secara konvensional.

Manfaat ekonomi sistem mina padi bagi petani sangat signifikan karena menciptakan diversifikasi sumber pendapatan dari hasil panen padi dan hasil panen ikan secara simultan pada lahan yang sama, tanpa memerlukan lahan tambahan di luar lahan sawah yang telah dimiliki petani. Pendapatan tambahan dari hasil panen ikan dapat menjadi penyangga ekonomi yang penting bagi petani, khususnya ketika terjadi fluktuasi harga gabah yang tidak menguntungkan, sehingga sistem mina padi berkontribusi terhadap peningkatan ketahanan ekonomi rumah tangga petani secara keseluruhan dibandingkan sistem monokultur padi konvensional yang hanya mengandalkan satu sumber pendapatan dari hasil panen padi semata.

Pemilihan jenis ikan yang sesuai untuk sistem mina padi perlu mempertimbangkan toleransi terhadap kondisi genangan air dangkal dan fluktuasi kualitas air sawah, dengan jenis ikan yang umum dibudidayakan di Indonesia meliputi ikan mas, ikan nila, dan ikan mujair yang dikenal memiliki toleransi tinggi terhadap kondisi lingkungan sawah. Desain infrastruktur pendukung, seperti pembuatan parit keliling

(*caren*) dan kolam penampungan (*refugia*) pada sudut petak sawah, menjadi elemen penting dalam desain teknis sistem mina padi untuk menyediakan tempat berlindung bagi ikan selama periode pengeringan sawah yang diperlukan untuk aktivitas budi daya padi tertentu, seperti pemupukan atau pengendalian gulma secara manual.

Tantangan implementasi sistem mina padi meliputi kebutuhan pengetahuan teknis tambahan mengenai budi daya perikanan yang mungkin belum dikuasai oleh petani padi konvensional, risiko kematian ikan akibat aplikasi pestisida yang tidak terhindarkan pada kondisi serangan hama berat, serta kebutuhan modifikasi infrastruktur sawah yang memerlukan investasi awal tambahan. Pendampingan teknis terpadu yang mencakup aspek budi daya tanaman dan perikanan secara simultan menjadi kunci keberhasilan penerapan sistem mina padi, mengingat kompleksitas pengelolaan yang lebih tinggi dibandingkan sistem monokultur padi konvensional yang telah lama dikuasai oleh mayoritas petani sawah di Indonesia.

Gambar 8.1 Siklus Simbiosis dalam Sistem Mina Padi



Siklus simbiosis pada sistem mina padi menggambarkan hubungan saling menguntungkan antara tanaman padi dan ikan yang

dipelihara secara bersamaan. Keberhasilan sistem ini sangat bergantung pada pengelolaan kualitas air dan ketepatan waktu aplikasi input produksi, khususnya terkait penghindaran aplikasi pestisida kimia yang dapat membahayakan populasi ikan yang dipelihara di dalam petak sawah.

1. Desain Teknis Petak Sawah untuk Mina Padi

Desain teknis petak sawah untuk sistem mina padi memerlukan modifikasi konstruksi dibandingkan sawah konvensional, mencakup pembuatan parit keliling dengan kedalaman tertentu di sekeliling petak sawah yang berfungsi sebagai tempat berlindung ikan selama periode pengeringan sawah, serta penguatan pematang sawah agar mampu menahan ketinggian air yang lebih tinggi dibandingkan budi daya padi konvensional tanpa mengalami kebocoran yang dapat menyebabkan ikan lolos keluar dari petak sawah yang telah ditentukan sebagai area budi daya.

Penempatan pintu air dan sistem drainase yang tepat menjadi elemen desain krusial untuk memungkinkan pengaturan ketinggian air yang sesuai dengan kebutuhan fase pertumbuhan padi yang berbeda-beda, sekaligus mencegah ikan terbawa keluar bersama aliran air pembuangan selama proses pengaturan ketinggian air tersebut. Penggunaan saringan pada pintu air menjadi solusi teknis sederhana namun efektif untuk mengatasi tantangan ini, memungkinkan pengaturan tinggi genangan air yang fleksibel tanpa mengorbankan populasi ikan yang dipelihara dalam sistem mina padi.

2. Pemilihan Varietas Padi yang Kompatibel dengan Mina Padi

Pemilihan varietas padi yang sesuai untuk sistem mina padi perlu mempertimbangkan karakteristik seperti tinggi tanaman yang memadai untuk mentoleransi genangan air yang lebih dalam dibandingkan budi daya padi konvensional, serta ketahanan terhadap rebah yang baik mengingat aktivitas ikan dalam air dapat menciptakan gangguan fisik tambahan pada batang tanaman padi dibandingkan kondisi sawah tanpa ikan. Varietas padi lokal tertentu yang telah lama dibudidayakan bersama sistem mina padi tradisional di berbagai daerah umumnya telah memiliki karakteristik yang sesuai secara alami melalui proses seleksi petani selama bertahun-tahun.

Pengembangan varietas padi unggul baru yang secara spesifik dirancang untuk kompatibel dengan sistem mina padi menjadi arah riset yang menjanjikan untuk mengoptimalkan produktivitas kedua komoditas secara simultan. Kombinasi sifat unggul seperti hasil tinggi, umur genjah, dan toleransi genangan yang lebih dalam perlu diintegrasikan dalam program pemuliaan khusus untuk mendukung pengembangan sistem mina padi yang lebih optimal dan menguntungkan bagi petani yang menerapkan sistem integrasi tanaman-ikan tersebut secara komersial.

3. Perluasan Konsep Mina Padi menjadi Mina Padi Multikultur

Pengembangan lebih lanjut dari konsep mina padi tradisional mengarah pada sistem mina padi multikultur yang mengintegrasikan lebih dari satu jenis biota air dalam satu petak sawah, seperti kombinasi ikan dengan udang galah atau kepiting, menciptakan diversifikasi hasil panen yang lebih beragam dan berpotensi meningkatkan nilai ekonomi total per satuan luas lahan sawah yang dikelola. Kombinasi berbagai jenis biota air perlu mempertimbangkan kompatibilitas ekologis antarspesies, mengingat beberapa kombinasi berpotensi menimbulkan kompetisi sumber daya atau bahkan predasi antarspesies yang dapat merugikan hasil panen keseluruhan apabila tidak direncanakan dengan cermat berdasarkan pemahaman mendalam mengenai perilaku dan kebutuhan ekologis masing-masing spesies yang diintegrasikan.

Pengembangan sistem mina padi multikultur memerlukan dukungan riset lebih lanjut mengenai kombinasi spesies yang optimal untuk berbagai kondisi agroekologi di Indonesia, mengingat variasi kondisi kualitas air, suhu, dan ketersediaan pakan alami antarwilayah dapat memengaruhi kesesuaian kombinasi spesies tertentu. Kolaborasi antara lembaga riset perikanan dan pertanian menjadi penting untuk menghasilkan rekomendasi teknis yang lebih spesifik bagi petani yang tertarik mengembangkan sistem mina padi multikultur sebagai strategi diversifikasi dan peningkatan nilai ekonomi lahan sawah mereka secara lebih optimal.

4. Kontribusi Mina Padi terhadap Diversifikasi Pangan Lokal

Sistem mina padi berkontribusi terhadap diversifikasi pangan lokal melalui penyediaan sumber protein hewani tambahan bagi rumah

tangga petani, yang bermanfaat khususnya bagi wilayah dengan akses terbatas terhadap sumber protein hewani lain akibat kendala geografis atau ekonomi. Peningkatan konsumsi ikan hasil panen mina padi secara langsung oleh rumah tangga petani berkontribusi terhadap perbaikan status gizi keluarga, sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pembelian sumber protein dari pasar yang mungkin memerlukan biaya tambahan bagi rumah tangga petani berpenghasilan rendah di wilayah pedesaan.

5. Dukungan Kebijakan Pemerintah bagi Pengembangan Mina Padi

Dukungan kebijakan pemerintah menjadi faktor penting dalam mempercepat adopsi sistem mina padi secara lebih luas di Indonesia, mencakup penyediaan bantuan bibit ikan bersubsidi, pelatihan teknis terpadu budi daya padi dan ikan, serta insentif bagi petani yang bersedia melakukan modifikasi infrastruktur sawah yang diperlukan untuk mendukung sistem mina padi. Program pemerintah yang mengintegrasikan dukungan dari sektor pertanian dan perikanan secara simultan, alih-alih berjalan secara terpisah pada masing-masing kementerian teknis, dapat meningkatkan efektivitas dukungan yang diterima petani dalam mengadopsi sistem mina padi secara berkelanjutan.

Pengembangan kawasan sentra mina padi yang didukung infrastruktur bersama, seperti unit pembenihan ikan dan fasilitas pengolahan hasil panen ikan, dapat menciptakan skala ekonomi yang lebih menguntungkan bagi petani dibandingkan pengembangan mina padi secara individual dan tersebar. Model kawasan sentra ini juga memudahkan penyediaan pendampingan teknis secara lebih efisien oleh penyuluh pertanian dan perikanan, mengingat konsentrasi petani mina padi dalam satu kawasan memungkinkan penyuluhan dilakukan secara kolektif dibandingkan kunjungan individual yang memerlukan sumber daya penyuluhan yang jauh lebih besar.

Sistem mina padi yang telah dipraktikkan secara turun-temurun oleh petani Asia menawarkan inspirasi berharga bagi pengembangan sistem pertanian berkelanjutan modern, membuktikan bahwa kearifan tradisional dapat berpadu secara harmonis dengan prinsip ilmiah kontemporer mengenai efisiensi sumber daya dan keseimbangan ekosistem. Revitalisasi dan modernisasi sistem mina padi dengan

dukungan teknologi dan kebijakan yang tepat berpotensi menjadikannya salah satu model unggulan pertanian terintegrasi Indonesia di tingkat regional maupun global.

C. Integrated Farming System

Integrated Farming System (IFS) merupakan konsep yang lebih luas dibandingkan integrasi tanaman-ternak atau mina padi semata, yang mencakup penggabungan berbagai komponen produksi pertanian, peternakan, perikanan, dan kehutanan dalam satu unit pengelolaan usaha tani secara holistik, dengan tujuan memaksimalkan efisiensi pemanfaatan sumber daya lahan, air, dan tenaga kerja yang tersedia. Franzluebbers dan kolega (2021) menekankan bahwa keberhasilan *Integrated Farming System* bergantung pada perencanaan yang cermat mengenai kompatibilitas dan sinergi antarkomponen produksi yang diintegrasikan, guna memastikan bahwa setiap komponen memberikan kontribusi positif terhadap komponen lainnya, bukan justru menciptakan kompetisi yang merugikan terhadap sumber daya lahan dan tenaga kerja yang terbatas.

Prinsip dasar *Integrated Farming System* mencakup optimalisasi penggunaan lahan melalui pemanfaatan ruang secara vertikal dan horizontal, seperti kombinasi tanaman tahunan dan tanaman semusim, pemanfaatan limbah antarkomponen produksi sebagai input bagi komponen lain, serta diversifikasi produk yang dihasilkan guna mengurangi risiko kegagalan ekonomi akibat ketergantungan pada satu komoditas tunggal. Penerapan *Integrated Farming System* yang optimal memerlukan analisis daya dukung lahan yang cermat untuk menentukan kombinasi dan proporsi komponen produksi yang paling sesuai dengan karakteristik agroekologi spesifik suatu wilayah, termasuk ketersediaan air, jenis tanah, dan kondisi topografi lahan yang akan dikelola.

Model pekarangan pangan lestari merupakan salah satu bentuk penerapan *Integrated Farming System* pada skala rumah tangga yang mengintegrasikan budi daya sayuran, tanaman buah, ternak unggas skala kecil, dan kolam ikan dalam satu lahan pekarangan yang terbatas, bertujuan memenuhi kebutuhan pangan dan gizi keluarga secara mandiri sekaligus menghasilkan surplus produk yang dapat dijual untuk menambah pendapatan rumah tangga. Model ini terbukti efektif dalam

mendukung ketahanan pangan tingkat rumah tangga, khususnya di wilayah perkotaan dan pedesaan yang menghadapi keterbatasan akses terhadap pasar pangan segar dengan harga terjangkau secara konsisten sepanjang tahun.

Pada skala yang lebih besar, *Integrated Farming System* diterapkan melalui model kawasan pertanian terpadu yang mengintegrasikan berbagai komoditas unggulan suatu wilayah dalam satu kawasan pengembangan, didukung oleh infrastruktur bersama seperti fasilitas pengolahan hasil dan pemasaran kolektif. Pendekatan kawasan ini memungkinkan terciptanya skala ekonomi yang lebih efisien dibandingkan penerapan *Integrated Farming System* pada skala usaha tani individual, sekaligus memperkuat posisi tawar petani dalam rantai pasok melalui konsolidasi produksi dan pemasaran secara kolektif di tingkat kawasan pengembangan pertanian terpadu tersebut.

Keberhasilan implementasi *Integrated Farming System* sangat bergantung pada kapasitas manajerial petani dalam mengelola kompleksitas sistem yang melibatkan berbagai komponen produksi secara simultan, yang menuntut pengetahuan multidisiplin mencakup agronomi, peternakan, perikanan, dan manajemen usaha tani secara terpadu. Program pelatihan dan pendampingan yang komprehensif, yang mencakup seluruh aspek teknis dan manajerial *Integrated Farming System*, menjadi kebutuhan penting untuk mendukung petani dalam mengadopsi dan mengoptimalkan sistem produksi terintegrasi ini secara berkelanjutan dalam jangka panjang.

Tabel 8.2 Komponen Umum dalam *Integrated Farming System* Skala Rumah Tangga

Komponen	**Fungsi Utama**	**Contoh Pemanfaatan Limbah/Hasil Sampingan**
Tanaman sayuran	Sumber pangan dan pendapatan	Sisa sayuran sebagai pakan ternak/kompos
Tanaman buah tahunan	Sumber pangan jangka panjang	Daun gugur sebagai bahan kompos
Ternak unggas	Sumber protein dan pendapatan	Kotoran sebagai pupuk organik

Komponen	Fungsi Utama	Contoh Pemanfaatan Limbah/Hasil Sampingan
Kolam ikan	Sumber protein tambahan	Air kolam kaya nutrien untuk penyiraman tanaman
Unit kompos	Pengolah limbah organik	Pupuk organik untuk seluruh komponen tanaman

1. Analisis Kelayakan Ekonomi *Integrated Farming System*

Analisis kelayakan ekonomi *Integrated Farming System* memerlukan pendekatan yang berbeda dibandingkan analisis usaha tani komoditas tunggal, karena perlu mempertimbangkan interaksi ekonomi antarkomponen produksi yang saling terintegrasi, termasuk penghematan biaya input akibat pemanfaatan hasil samping antarkomponen, serta diversifikasi risiko yang dihasilkan dari beragamnya sumber pendapatan yang dimiliki petani. Perhitungan kelayakan ekonomi yang komprehensif perlu memasukkan nilai ekonomi implisit dari penghematan biaya pakan dan pupuk yang dihasilkan dari sinergi antarkomponen, yang sering kali tidak tercermin dalam analisis usaha tani konvensional yang hanya berfokus pada komoditas tunggal.

Studi kelayakan *Integrated Farming System* pada berbagai skala usaha tani di Indonesia umumnya menunjukkan bahwa meskipun kompleksitas manajerial yang lebih tinggi diperlukan, tingkat pengembalian investasi dan stabilitas pendapatan yang dihasilkan cenderung lebih baik dibandingkan sistem usaha tani tunggal, terutama dalam menghadapi fluktuasi harga komoditas dan risiko cuaca yang tidak menentu. Pertimbangan ekonomi ini menjadi argumen kuat bagi promosi adopsi *Integrated Farming System* secara lebih luas, meskipun tantangan modal awal dan kapasitas manajerial tetap perlu diatasi melalui pendampingan dan dukungan pembiayaan yang memadai bagi petani yang berminat mengadopsi sistem ini.

2. Peran Teknologi Digital dalam Manajemen *Integrated Farming System*

Kompleksitas pengelolaan berbagai komponen produksi dalam *Integrated Farming System* dapat didukung secara signifikan oleh pemanfaatan teknologi digital, seperti aplikasi pencatatan usaha tani terpadu yang memungkinkan petani memantau kinerja masing-masing komponen produksi secara simultan, termasuk jadwal pemberian pakan ternak, siklus tanam berbagai jenis tanaman, dan jadwal panen ikan, dalam satu platform yang terintegrasi dan mudah diakses melalui perangkat telepon pintar yang dimiliki petani.

Pengembangan aplikasi digital khusus untuk manajemen *Integrated Farming System* yang mempertimbangkan kompleksitas interaksi antarkomponen produksi masih tergolong terbatas dibandingkan aplikasi pertanian untuk komoditas tunggal, sehingga membuka peluang pengembangan lebih lanjut bagi perusahaan rintisan teknologi pertanian Indonesia untuk menghasilkan solusi digital yang secara spesifik dirancang untuk mendukung kebutuhan manajemen sistem pertanian terintegrasi yang semakin diminati oleh petani sebagai strategi diversifikasi dan peningkatan ketahanan usaha tani mereka.

3. Pengembangan Kapasitas Kelembagaan Petani untuk *Integrated Farming System*

Keberhasilan jangka panjang penerapan *Integrated Farming System* sangat bergantung pada penguatan kapasitas kelembagaan petani, termasuk pembentukan kelompok tani yang secara khusus berfokus pada pengembangan sistem terintegrasi, yang dapat menjadi wadah pembelajaran kolektif dan berbagi pengalaman antarpetani dalam mengelola kompleksitas sistem produksi yang melibatkan berbagai komoditas secara simultan. Kelembagaan yang kuat juga memudahkan akses petani terhadap dukungan teknis, pembiayaan, dan pemasaran kolektif hasil produksi dari berbagai komponen dalam sistem *Integrated Farming System* yang mereka kelola secara terintegrasi.

Pengembangan sekolah lapang *Integrated Farming System* yang menggabungkan pembelajaran teori dan praktik langsung di lahan percontohan menjadi metode pelatihan yang efektif untuk membangun kapasitas petani dalam mengelola sistem terintegrasi secara komprehensif, mencakup aspek teknis budi daya berbagai komoditas,

manajemen keuangan usaha tani terintegrasi, hingga strategi pemasaran produk yang beragam. Pendekatan pembelajaran berbasis pengalaman langsung ini terbukti lebih efektif dibandingkan pelatihan konvensional yang hanya bersifat teoretis, karena petani dapat langsung mengamati dan mempraktikkan pengelolaan sistem *Integrated Farming System* pada kondisi lapangan yang nyata dan relevan dengan konteks usaha tani mereka sendiri.

4. Integrasi *Integrated Farming System* dengan Prinsip Agroekologi

Prinsip agroekologi yang menekankan optimalisasi interaksi ekologis antarkomponen dalam sistem pertanian sangat sejalan dengan filosofi dasar *Integrated Farming System*, di mana keberhasilan sistem tidak semata-mata diukur dari produktivitas masing-masing komponen secara terpisah, melainkan dari keseluruhan kinerja sistem yang mempertimbangkan keseimbangan ekologis, efisiensi sumber daya, dan ketahanan terhadap gangguan eksternal secara terintegrasi. Penerapan prinsip agroekologi dalam perancangan *Integrated Farming System* mendorong pertimbangan yang lebih holistik mengenai penempatan spasial dan temporal berbagai komponen produksi, guna memaksimalkan sinergi ekologis yang dapat dihasilkan dari interaksi antarkomponen tersebut.

Pendekatan perancangan *Integrated Farming System* berbasis agroekologi juga mempertimbangkan pemanfaatan keanekaragaman hayati fungsional, seperti penanaman tanaman berbunga yang mendukung populasi serangga penyerbuk dan musuh alami hama, sebagai komponen tambahan yang memperkuat ketahanan ekologis keseluruhan sistem *Integrated Farming System*. Integrasi elemen-elemen fungsional semacam ini menunjukkan bahwa *Integrated Farming System* yang dirancang dengan baik dapat memberikan manfaat yang melampaui sekadar diversifikasi ekonomi, melainkan juga berkontribusi terhadap pemulihan dan penguatan fungsi ekosistem pertanian secara menyeluruh dalam jangka panjang.

Integrated Farming System menawarkan visi komprehensif mengenai bagaimana usaha tani masa depan dapat dirancang secara lebih tangguh, efisien, dan berkelanjutan melalui optimalisasi interaksi antarkomponen produksi yang terintegrasi dalam satu unit pengelolaan.

Investasi dalam pengembangan kapasitas petani dan infrastruktur pendukung akan menjadi kunci penting bagi perluasan adopsi model *Integrated Farming System* secara lebih signifikan sebagai strategi utama peningkatan kesejahteraan dan ketahanan usaha tani keluarga di Indonesia.

D. Circular Agriculture

Pertanian sirkular (*circular agriculture*) merupakan konsep pengelolaan sistem pertanian yang mengadopsi prinsip ekonomi sirkular, yaitu meminimalkan penggunaan sumber daya baru dan limbah yang terbuang melalui optimalisasi siklus penggunaan kembali (*reuse*), daur ulang (*recycle*), dan pengurangan (*reduce*) material dalam seluruh rantai produksi pertanian. Van Zanten, Van Ittersum, dan De Boer (2019) menjelaskan bahwa peran hewan ternak dalam sistem pangan sirkular sangat penting, karena ternak mampu mengonversi biomassa yang tidak dapat dikonsumsi manusia secara langsung, seperti limbah pertanian dan hasil samping industri pengolahan pangan, menjadi produk pangan bernilai gizi tinggi seperti daging, susu, dan telur, sehingga mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya biomassa yang tersedia dalam sistem pangan secara keseluruhan.

Prinsip dasar pertanian sirkular menekankan penutupan siklus hara dan energi dalam sistem produksi pertanian, sehingga output atau limbah dari satu proses produksi menjadi input bagi proses produksi lainnya, meminimalkan kebocoran sumber daya ke luar sistem yang berpotensi menyebabkan pencemaran lingkungan. De Boer dan Van Ittersum (2018) mengidentifikasi tiga prinsip utama pertanian sirkular, yaitu penggunaan biomassa secara optimal sesuai dengan nilai tertingginya, penutupan siklus hara pada tingkat lokal atau regional, serta diversifikasi sistem produksi untuk meningkatkan ketahanan terhadap gangguan eksternal, yang secara kolektif berkontribusi terhadap pengurangan tekanan terhadap sumber daya alam yang semakin terbatas.

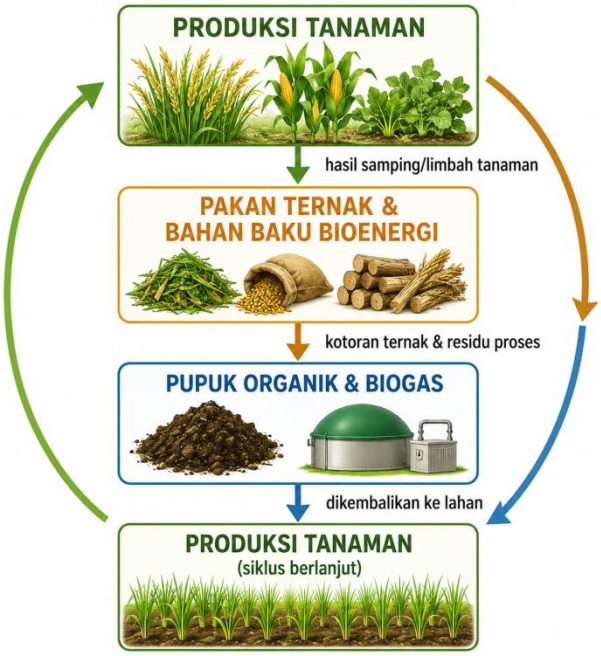
Penerapan pertanian sirkular pada konteks Indonesia dapat diwujudkan melalui berbagai strategi, meliputi pemanfaatan limbah pertanian dan perkebunan sebagai bahan baku energi terbarukan, integrasi sistem produksi tanaman dan ternak untuk menutup siklus hara secara lokal, serta pengembangan model bisnis yang mendorong

kolaborasi antarpelaku usaha dalam memanfaatkan hasil samping produksi secara optimal. Sebagai contoh, limbah cair pabrik kelapa sawit dapat diolah menjadi biogas dan pupuk organik cair, sementara tandan kosong kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku kompos atau media tanam, menciptakan nilai tambah dari material yang sebelumnya dianggap sebagai limbah yang tidak bermanfaat secara ekonomi.

Muscat, de Olde, de Boer, dan Ripoll-Bosch (2020) mengingatkan bahwa penerapan prinsip sirkular dalam sistem pangan perlu mempertimbangkan potensi kompetisi pemanfaatan biomassa antara kebutuhan pangan, pakan, dan bahan bakar, yang dikenal sebagai kompetisi *food-feed-fuel*, guna memastikan bahwa prioritas pemanfaatan biomassa tetap mengutamakan pemenuhan kebutuhan pangan manusia sebelum dialokasikan untuk kebutuhan lain seperti pakan ternak atau produksi bioenergi, terutama dalam konteks negara yang masih menghadapi tantangan ketahanan pangan seperti Indonesia.

Pengembangan indikator dan metodologi pengukuran tingkat sirkularitas sistem pertanian menjadi kebutuhan penting untuk mengevaluasi kemajuan implementasi konsep pertanian sirkular secara objektif, mencakup indikator seperti persentase limbah yang berhasil dimanfaatkan kembali, tingkat efisiensi penggunaan hara, serta jejak lingkungan keseluruhan sistem produksi. Ketersediaan metodologi pengukuran yang standar dan dapat diaplikasikan secara luas akan memudahkan perbandingan tingkat keberhasilan penerapan pertanian sirkular antarwilayah dan antarkomoditas, sekaligus menjadi dasar bagi perumusan kebijakan insentif yang mendorong adopsi praktik sirkular secara lebih luas di kalangan pelaku usaha pertanian nasional.

Gambar 8.2 Alur Siklus Tertutup dalam Model Pertanian Sirkular



Alur siklus tertutup tersebut mengilustrasikan bagaimana material yang sebelumnya dianggap limbah pada satu tahap produksi dapat menjadi sumber daya bernilai bagi tahap produksi berikutnya, sehingga meminimalkan kebocoran sumber daya keluar dari sistem pertanian. Penerapan model ini memerlukan perencanaan tata letak dan logistik yang matang agar aliran material antarkomponen dapat berjalan secara efisien tanpa memerlukan biaya transportasi yang berlebihan.

1. Kebijakan Pendukung Ekonomi Sirkular di Sektor Pertanian

Pengembangan kebijakan yang mendukung penerapan ekonomi sirkular di sektor pertanian memerlukan pendekatan lintas kementerian yang mengintegrasikan kebijakan pertanian, lingkungan hidup, dan energi secara koheren, mengingat penerapan pertanian sirkular melibatkan berbagai aspek yang saling terkait mulai dari pengelolaan limbah, produksi energi terbarukan, hingga pengelolaan hara tanah. De Boer dan Van Ittersum (2018) menekankan pentingnya insentif kebijakan yang mendorong pelaku usaha pertanian untuk berinvestasi dalam teknologi dan praktik sirkular, mengingat manfaat lingkungan jangka panjang dari pertanian sirkular sering kali belum sepenuhnya tercermin dalam kalkulasi ekonomi jangka pendek yang menjadi

pertimbangan utama pelaku usaha dalam pengambilan keputusan investasi.

Pengembangan sistem sertifikasi atau label khusus bagi produk yang dihasilkan melalui praktik pertanian sirkular dapat menjadi instrumen kebijakan yang mendorong permintaan pasar terhadap produk tersebut, memberikan insentif ekonomi tambahan bagi petani dan pelaku usaha yang telah menerapkan praktik sirkular dalam sistem produksi mereka. Pengembangan skema semacam ini di Indonesia masih berada pada tahap awal dan memerlukan kolaborasi antara pemerintah, lembaga sertifikasi, dan pelaku usaha untuk merumuskan kriteria dan mekanisme sertifikasi yang kredibel dan dapat diterima secara luas oleh pasar domestik maupun internasional.

2. Studi Kasus Sirkularitas pada Kawasan Perkebunan Tebu

Industri gula berbasis tebu di Indonesia menunjukkan potensi besar penerapan prinsip sirkular melalui pemanfaatan berbagai hasil samping proses produksi, termasuk ampas tebu (*bagasse*) yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler pabrik gula, blotong yang dapat diolah menjadi pupuk organik, serta tetes tebu (*molasses*) yang menjadi bahan baku industri fermentasi seperti produksi etanol dan bahan pakan ternak, menciptakan rantai nilai yang lebih panjang dan terintegrasi dari satu jenis komoditas perkebunan tunggal.

Pengembangan konsep bioindustri gula terintegrasi yang mengoptimalkan pemanfaatan seluruh hasil samping proses produksi gula berpotensi meningkatkan nilai tambah ekonomi industri gula nasional secara signifikan, sekaligus mengurangi jejak lingkungan dari limbah yang sebelumnya kurang termanfaatkan secara optimal. Replikasi model bioindustri terintegrasi berbasis prinsip sirkular pada komoditas perkebunan strategis lainnya, seperti kelapa dan kopi, menjadi arah pengembangan yang potensial untuk memperkuat daya saing dan keberlanjutan industri perkebunan Indonesia secara keseluruhan di masa mendatang.

3. Peran Teknologi Digital dalam Pemantauan Sirkularitas

Pemanfaatan teknologi digital, termasuk sistem pelacakan berbasis *blockchain* dan aplikasi pencatatan aliran material, semakin banyak diterapkan untuk memantau dan memverifikasi tingkat

sirkularitas suatu sistem produksi pertanian secara lebih akurat dan transparan. Teknologi ini memungkinkan pelacakan aliran material dari satu komponen produksi ke komponen lainnya secara *real-time*, memberikan data yang lebih andal untuk keperluan pelaporan keberlanjutan maupun sertifikasi produk yang dihasilkan melalui praktik pertanian sirkular, dibandingkan metode pencatatan manual konvensional yang rentan terhadap kesalahan dan manipulasi data.

Pengembangan platform digital yang mengintegrasikan pemantauan sirkularitas dengan sistem informasi pasar dapat membuka peluang baru bagi petani dan pelaku usaha untuk memperoleh insentif ekonomi tambahan dari praktik sirkular yang mereka terapkan, misalnya melalui akses terhadap pasar khusus yang mengapresiasi produk dengan jejak lingkungan rendah atau melalui partisipasi dalam skema insentif karbon yang semakin berkembang di tingkat nasional maupun internasional sebagai bagian dari upaya mitigasi perubahan iklim global.

4. Pertanian Sirkular dan Pengurangan Jejak Karbon Rantai Pasok

Penerapan prinsip sirkular dalam rantai pasok pertanian berkontribusi terhadap pengurangan jejak karbon secara keseluruhan, mengingat pemanfaatan sumber daya lokal dan pengurangan kebutuhan transportasi bahan baku dari luar sistem produksi turut mengurangi emisi yang dihasilkan dari aktivitas logistik. Muscat dan kolega (2020) menekankan pentingnya perencanaan tata letak fasilitas produksi dan pengolahan yang mempertimbangkan jarak transportasi antarkomponen dalam sistem sirkular, guna memaksimalkan manfaat lingkungan dari penerapan prinsip sirkularitas dalam sistem produksi pertanian secara menyeluruh.

5. *Circular Agriculture* dan Ketahanan Pangan Regional

Penerapan prinsip pertanian sirkular pada skala regional atau kawasan berpotensi memperkuat ketahanan pangan lokal melalui optimalisasi pemanfaatan sumber daya biomassa yang tersedia dalam suatu wilayah, mengurangi ketergantungan terhadap input dari luar daerah yang rentan terhadap gangguan rantai pasok akibat berbagai faktor eksternal. Pengembangan kawasan pertanian sirkular yang mengintegrasikan berbagai komoditas dan sektor produksi dalam satu

wilayah administratif dapat menjadi model pembangunan ekonomi daerah yang berkelanjutan, sekaligus memperkuat kemandirian pangan pada tingkat regional yang menjadi bagian penting dari strategi ketahanan pangan nasional secara keseluruhan.

Perencanaan tata ruang wilayah yang mempertimbangkan prinsip sirkularitas pertanian, termasuk penempatan fasilitas pengolahan limbah dan produksi energi terbarukan berbasis biomassa pertanian secara strategis, menjadi elemen penting dalam mewujudkan kawasan pertanian sirkular yang efisien dan berkelanjutan. Kolaborasi antara pemerintah daerah, akademisi, dan pelaku usaha dalam merencanakan pengembangan kawasan sirkular semacam ini perlu mempertimbangkan karakteristik komoditas unggulan dan potensi biomassa spesifik masing-masing wilayah di Indonesia yang sangat beragam secara geografis.

Prinsip pertanian sirkular menawarkan kerangka berpikir baru yang penting bagi transformasi industri pertanian dan perkebunan Indonesia menuju model bisnis yang lebih efisien dan berkelanjutan, mengubah paradigma limbah sebagai beban menjadi limbah sebagai sumber daya bernilai. Penguatan kebijakan pendukung dan investasi teknologi akan terus menjadi faktor penentu bagi perluasan penerapan prinsip sirkular ini di berbagai subsektor pertanian dan perkebunan nasional pada masa mendatang.

E. Zero Waste Agriculture

Pertanian tanpa limbah (*zero waste agriculture*) merupakan pendekatan yang lebih ambisius dibandingkan pertanian sirkular, yang menargetkan pemanfaatan seluruh material yang dihasilkan dari proses produksi pertanian tanpa menyisakan limbah yang dibuang ke lingkungan, melalui optimalisasi teknologi pengolahan dan inovasi produk turunan dari setiap hasil samping produksi. Koul, Yakoob, dan Shah (2022) menjelaskan bahwa pendekatan zero waste memerlukan perubahan paradigma dalam memandang limbah pertanian, dari sesuatu yang harus dibuang menjadi sumber daya potensial yang dapat diolah menjadi berbagai produk bernilai tambah, seperti bahan baku industri, sumber energi, atau bahan baku pertanian itu sendiri dalam bentuk pupuk dan media tanam.

Konsep hierarki pengelolaan limbah yang diterapkan dalam kerangka *zero waste agriculture* mengikuti prinsip prioritas mulai dari pencegahan timbulan limbah melalui optimalisasi proses produksi, penggunaan kembali material secara langsung, daur ulang menjadi produk baru, pemulihan energi melalui proses seperti pembakaran terkendali atau produksi biogas, hingga pembuangan akhir yang aman sebagai opsi terakhir yang seharusnya diminimalkan seminimal mungkin. Penerapan hierarki ini secara konsisten dalam pengelolaan seluruh rantai produksi pertanian berpotensi secara signifikan mengurangi volume limbah yang berakhir di tempat pembuangan akhir atau dibakar secara terbuka yang berdampak negatif terhadap kualitas udara dan kesehatan masyarakat sekitar.

Duque-Acevedo, Belmonte-Ureña, Cortés-García, dan Camacho-Ferre (2020) mengulas berbagai pendekatan alternatif pemanfaatan limbah pertanian yang telah dikembangkan secara global, meliputi konversi menjadi bahan bakar nabati generasi kedua, ekstraksi senyawa bioaktif bernilai tinggi untuk industri farmasi dan kosmetik, produksi material komposit ramah lingkungan sebagai pengganti plastik konvensional, serta pemanfaatan sebagai substrat budi daya jamur pangan yang menghasilkan sumber protein alternatif bernilai ekonomi tinggi dari limbah yang sebelumnya tidak termanfaatkan secara optimal dalam sistem produksi pertanian konvensional.

Penerapan *zero waste agriculture* pada skala usaha tani individual maupun kawasan pertanian terpadu memerlukan investasi teknologi pengolahan yang memadai, serta kemitraan dengan industri hilir yang dapat menyerap berbagai produk turunan hasil pengolahan limbah pertanian secara berkelanjutan. Pengembangan kawasan industri pertanian terpadu yang mengintegrasikan berbagai fasilitas pengolahan limbah dalam satu kawasan menjadi strategi yang efektif untuk mencapai skala ekonomi yang memadai bagi investasi teknologi zero waste, sekaligus memfasilitasi kolaborasi antarpelaku usaha dalam memanfaatkan hasil samping produksi secara optimal dan saling menguntungkan.

Tantangan utama penerapan *zero waste agriculture* di Indonesia meliputi keterbatasan teknologi pengolahan limbah yang terjangkau bagi petani skala kecil, kurangnya kesadaran dan pengetahuan mengenai potensi nilai ekonomi limbah pertanian, serta keterbatasan infrastruktur

logistik untuk mengumpulkan dan mendistribusikan limbah pertanian yang tersebar pada banyak lokasi usaha tani berskala kecil menuju fasilitas pengolahan terpusat. Pengembangan model bisnis kolektif berbasis koperasi atau kelembagaan petani menjadi salah satu strategi yang dapat mengatasi tantangan skala ekonomi ini, memungkinkan konsolidasi limbah pertanian dari banyak petani kecil untuk mencapai volume yang cukup ekonomis bagi investasi teknologi pengolahan limbah yang lebih canggih.

1. Model Bisnis Sosial dalam *Zero Waste Agriculture*

Pengembangan model bisnis sosial yang melibatkan masyarakat lokal dalam pengumpulan dan pengolahan limbah pertanian menjadi produk bernilai tambah menawarkan pendekatan yang tidak hanya berorientasi pada keberlanjutan lingkungan, tetapi juga menciptakan dampak sosial ekonomi positif bagi masyarakat sekitar kawasan pertanian, khususnya kelompok masyarakat rentan seperti perempuan dan pemuda pedesaan yang dapat dilibatkan dalam kegiatan pengolahan limbah pertanian skala kecil dan menengah sebagai sumber pendapatan tambahan bagi rumah tangga mereka.

Koul, Yakoob, dan Shah (2022) mencatat bahwa keberhasilan model bisnis sosial berbasis pengelolaan limbah pertanian sangat bergantung pada dukungan pendampingan teknis dan akses pasar bagi produk yang dihasilkan, mengingat kelompok masyarakat yang terlibat umumnya memiliki keterbatasan pengetahuan teknis dan jaringan pemasaran dibandingkan pelaku usaha komersial berskala besar. Kemitraan dengan lembaga pemerintah, akademisi, dan sektor swasta menjadi kunci penting untuk memastikan keberlanjutan model bisnis sosial ini dalam jangka panjang, tidak hanya bergantung pada bantuan atau subsidi sementara dari program pemerintah semata.

2. Pengukuran Jejak Lingkungan dalam *Zero Waste Agriculture*

Pengukuran jejak lingkungan sistem *zero waste agriculture* memerlukan metodologi penilaian siklus hidup (*life cycle assessment*) yang komprehensif, mencakup evaluasi dampak lingkungan dari seluruh tahapan produksi, mulai dari input produksi awal hingga pengolahan akhir hasil samping dan limbah yang dihasilkan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi titik-titik dalam rantai produksi yang memberikan kontribusi terbesar terhadap jejak lingkungan, sehingga

upaya perbaikan dapat difokuskan pada area yang memberikan dampak paling signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan sistem produksi pertanian secara keseluruhan.

Penerapan metodologi penilaian siklus hidup pada sistem pertanian *zero waste* di Indonesia masih tergolong terbatas, mengingat keterbatasan data primer mengenai dampak lingkungan spesifik berbagai praktik pertanian lokal, sehingga banyak penilaian masih mengandalkan data sekunder dari studi negara lain yang mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi spesifik agroekologi Indonesia. Investasi dalam pengumpulan data primer dan pengembangan basis data jejak lingkungan spesifik komoditas dan wilayah Indonesia menjadi kebutuhan penting untuk mendukung evaluasi yang lebih akurat terhadap kemajuan implementasi *zero waste agriculture* secara nasional.

3. Edukasi Konsumen mengenai Produk *Zero Waste Agriculture*

Keberhasilan pengembangan pasar bagi produk turunan *zero waste agriculture* sangat bergantung pada tingkat kesadaran dan penerimaan konsumen terhadap produk-produk yang dihasilkan dari pengolahan limbah pertanian, yang mungkin belum familiar bagi sebagian besar konsumen dibandingkan produk pertanian konvensional. Edukasi konsumen mengenai proses produksi dan manfaat lingkungan dari produk *zero waste agriculture* menjadi strategi pemasaran penting untuk membangun kepercayaan dan minat beli konsumen, khususnya segmen konsumen yang peduli terhadap isu keberlanjutan dan pengurangan limbah dalam kehidupan sehari-hari mereka.

Kolaborasi dengan platform digital dan media sosial untuk mengampanyekan narasi keberlanjutan di balik produk *zero waste agriculture* dapat memperluas jangkauan edukasi konsumen secara lebih efektif dibandingkan metode promosi konvensional, khususnya untuk menjangkau segmen konsumen muda perkotaan yang cenderung lebih aktif dalam mencari informasi mengenai keberlanjutan produk yang mereka konsumsi melalui platform digital yang mereka akses sehari-hari.

4. Peran Kebijakan Insentif Fiskal bagi *Zero Waste Agriculture*

Kebijakan insentif fiskal, seperti keringanan pajak bagi investasi teknologi pengolahan limbah pertanian atau subsidi bagi petani yang

menerapkan praktik zero waste, dapat menjadi pendorong penting dalam mempercepat adopsi pendekatan ini secara lebih luas di kalangan pelaku usaha pertanian Indonesia. Perancangan kebijakan insentif yang tepat sasaran perlu mempertimbangkan skala usaha yang berbeda, memastikan bahwa insentif yang diberikan benar-benar menjangkau petani kecil yang sering kali memiliki keterbatasan modal untuk berinvestasi dalam teknologi pengolahan limbah pertanian secara mandiri tanpa dukungan kebijakan yang memadai dari pemerintah.

5. *Zero Waste Agriculture* sebagai Bagian dari Ekonomi Hijau

Penerapan *zero waste agriculture* sejalan dengan agenda pengembangan ekonomi hijau nasional yang menekankan pertumbuhan ekonomi yang tidak mengorbankan keberlanjutan lingkungan, mengingat pendekatan ini menciptakan nilai ekonomi baru dari pengelolaan limbah yang optimal, sekaligus mengurangi dampak negatif lingkungan dari pembuangan limbah pertanian yang tidak terkelola dengan baik. Integrasi *zero waste agriculture* ke dalam kerangka kebijakan ekonomi hijau nasional dapat memperkuat dukungan kebijakan dan pembiayaan bagi pengembangan pendekatan ini secara lebih luas di berbagai wilayah dan komoditas pertanian Indonesia.

Pengembangan indikator kontribusi *zero waste agriculture* terhadap pencapaian target ekonomi hijau nasional, termasuk kontribusi terhadap penciptaan lapangan kerja hijau dan pengurangan emisi gas rumah kaca, menjadi kebutuhan penting untuk mengintegrasikan pendekatan ini secara lebih sistematis ke dalam perencanaan pembangunan ekonomi hijau di tingkat nasional maupun daerah, sehingga kontribusi sektor pertanian terhadap agenda keberlanjutan dapat terukur dan dilaporkan secara lebih transparan kepada publik dan pemangku kepentingan internasional.

Visi *zero waste agriculture* yang ambisius memerlukan komitmen jangka panjang dan kolaborasi luas antarpemangku kepentingan, namun manfaat ekonomi dan lingkungan yang ditawarkannya menjadikan pendekatan ini sebagai arah yang layak terus diperjuangkan bagi keberlanjutan sistem pertanian Indonesia. Inklusivitas dalam desain kebijakan dan program pendukung menjadi penting untuk memastikan bahwa manfaat pendekatan ini dapat

dirasakan secara merata oleh petani skala kecil, tidak hanya oleh pelaku usaha berskala besar yang memiliki kapasitas investasi lebih memadai.

F. Pemanfaatan Limbah Pertanian

Limbah pertanian yang dihasilkan dari berbagai tahapan produksi, mulai dari sisa panen di lahan, hasil samping proses pascapanen, hingga limbah pengolahan hasil pertanian, memiliki potensi pemanfaatan yang sangat beragam apabila dikelola dengan pendekatan yang tepat. Sadh, Duhan, dan Duhan (2018) mengulas berbagai teknik fermentasi substrat padat (*solid state fermentation*) yang dapat diterapkan untuk mengolah limbah pertanian menjadi produk bernilai tambah, seperti enzim industri, asam organik, dan pakan ternak yang difortifikasi, memanfaatkan aktivitas mikroorganisme untuk mengonversi material limbah yang kaya serat menjadi produk dengan nilai ekonomi dan nutrisi yang lebih tinggi.

Pemanfaatan jerami padi sebagai salah satu limbah pertanian yang paling melimpah di Indonesia dapat dilakukan melalui berbagai jalur, meliputi pengolahan menjadi pakan ternak melalui proses fermentasi atau amoniasi untuk meningkatkan kecernaan dan kandungan protein, pemanfaatan sebagai media tanam jamur merang yang menghasilkan sumber protein alternatif, serta pengolahan menjadi biochar melalui proses pirolisis yang dapat digunakan sebagai pembenah tanah untuk meningkatkan kapasitas tukar kation dan retensi air tanah dalam jangka panjang, sekaligus berkontribusi terhadap sekuestrasi karbon di dalam tanah.

Limbah cair industri pengolahan hasil pertanian, seperti limbah cair pabrik kelapa sawit dan limbah cair industri tapioka, mengandung beban organik tinggi yang apabila dibuang langsung ke badan air dapat menyebabkan pencemaran serius, namun sesungguhnya menyimpan potensi besar sebagai bahan baku produksi biogas melalui proses pencernaan anaerobik. Pemanfaatan biogas dari limbah cair industri pertanian tidak hanya mengurangi beban pencemaran lingkungan, tetapi juga menghasilkan sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan energi pabrik atau dijual ke jaringan listrik, menciptakan nilai tambah ekonomi dari pengelolaan limbah yang sebelumnya hanya menjadi beban biaya pengolahan bagi industri.

Cangkang dan tandan kosong kelapa sawit, sebagai limbah padat utama industri kelapa sawit, telah banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar biomassa untuk pembangkit listrik tenaga biomassa, bahan baku pembuatan pupuk kompos, serta bahan baku industri papan partikel dan produk turunan lainnya. Pemanfaatan limbah padat kelapa sawit ini menjadi contoh nyata penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam industri perkebunan besar di Indonesia, yang berkontribusi signifikan terhadap pengurangan jejak lingkungan industri kelapa sawit sekaligus menciptakan nilai tambah ekonomi dari material yang sebelumnya dianggap sebagai beban pengelolaan limbah semata.

Pengembangan kebijakan insentif bagi pemanfaatan limbah pertanian, termasuk dukungan pembiayaan untuk investasi teknologi pengolahan dan jaminan pasar bagi produk turunan limbah pertanian, menjadi kebutuhan penting untuk mendorong adopsi praktik pemanfaatan limbah secara lebih luas di kalangan pelaku usaha pertanian, baik pada skala petani individual maupun industri pengolahan hasil pertanian berskala besar. Kolaborasi antara pemerintah, lembaga riset, dan sektor swasta dalam mengembangkan dan mendiseminasikan teknologi pengolahan limbah pertanian yang terjangkau dan aplikatif menjadi kunci penting dalam mewujudkan potensi ekonomi dan lingkungan dari pemanfaatan limbah pertanian secara optimal di Indonesia.

Tabel 8.3 Contoh Limbah Pertanian dan Potensi Produk Turunannya

Jenis Limbah	Sumber	Potensi Produk Turunan
Jerami padi	Sisa panen padi	Pakan ternak, media jamur merang, biochar
Tandan kosong sawit	Pabrik kelapa sawit	Kompos, bahan bakar biomassa, papan partikel
Limbah cair tapioka	Industri pengolahan tapioka	Biogas, pupuk organik cair
Sekam padi	Penggilingan padi	Arang sekam, media tanam, bahan bakar
Kulit kakao/kopi	Pengolahan pascapanen	Kompos, pakan ternak, ekstrak antioksidan

1. Pemanfaatan Limbah Hortikultura untuk Pakan dan Kompos

Limbah hortikultura, termasuk sisa sayuran dan buah yang tidak memenuhi standar kualitas pasar akibat kerusakan fisik atau ukuran yang tidak sesuai, memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai pakan ternak segar atau bahan baku kompos, mengingat kandungan air dan nutrisi yang masih tinggi pada limbah tersebut. Pemanfaatan limbah hortikultura sebagai pakan ternak perlu memperhatikan aspek kesegaran dan keamanan pakan, mengingat limbah yang telah mengalami pembusukan dapat mengandung senyawa toksik yang berbahaya bagi kesehatan ternak apabila dikonsumsi dalam jumlah signifikan tanpa proses pengolahan yang tepat.

Pengembangan fasilitas pengomposan terpusat di sentra produksi hortikultura, seperti pasar induk sayuran dan buah, dapat menjadi solusi efektif untuk mengelola volume limbah hortikultura yang signifikan dan terkonsentrasi pada satu lokasi, menghasilkan pupuk kompos berkualitas yang dapat didistribusikan kembali kepada petani di sekitar kawasan tersebut. Model pengelolaan limbah terpusat semacam ini menawarkan efisiensi skala yang lebih baik dibandingkan pengelolaan limbah secara individual oleh masing-masing petani hortikultura yang umumnya memiliki keterbatasan sumber daya untuk berinvestasi dalam fasilitas pengomposan mandiri.

2. Ekstraksi Senyawa Bernilai Tinggi dari Limbah Pertanian

Perkembangan riset bioteknologi membuka peluang ekstraksi berbagai senyawa bioaktif bernilai tinggi dari limbah pertanian, seperti senyawa antioksidan dari kulit buah dan biji-bijian, pektin dari kulit jeruk dan apel untuk industri pangan, serta selulosa dari berbagai limbah tanaman berserat untuk bahan baku industri tekstil dan kemasan ramah lingkungan. Sadh, Duhan, dan Duhan (2018) menekankan bahwa ekstraksi senyawa bernilai tinggi ini menawarkan potensi nilai ekonomi yang jauh lebih besar dibandingkan pemanfaatan limbah pertanian sebagai kompos atau pakan ternak semata, meskipun memerlukan investasi teknologi ekstraksi yang lebih canggih dan kompleks.

Pengembangan industri hilir berbasis ekstraksi senyawa bernilai tinggi dari limbah pertanian di Indonesia masih berada pada tahap awal, memerlukan kolaborasi antara lembaga riset, industri, dan pemerintah

untuk mengembangkan teknologi ekstraksi yang efisien dan ekonomis, serta membangun rantai pasok yang menghubungkan sumber limbah pertanian dengan fasilitas pengolahan dan pasar produk turunan bernilai tinggi tersebut. Potensi pengembangan industri hilir ini sangat besar mengingat volume limbah pertanian dan perkebunan yang dihasilkan Indonesia setiap tahunnya, yang apabila dimanfaatkan secara optimal dapat menciptakan nilai ekonomi tambahan yang signifikan bagi perekonomian nasional.

3. Standardisasi Kualitas Produk Turunan Limbah Pertanian

Pengembangan standar kualitas yang jelas bagi berbagai produk turunan limbah pertanian, seperti kompos, biochar, dan pakan ternak hasil olahan, menjadi kebutuhan penting untuk membangun kepercayaan pasar dan memfasilitasi perdagangan produk tersebut secara lebih luas, baik di pasar domestik maupun internasional. Standardisasi ini mencakup parameter seperti kandungan hara, tingkat kontaminan, dan konsistensi kualitas antarbatch produksi, yang menjadi pertimbangan penting bagi pembeli dalam menentukan keputusan pembelian produk turunan limbah pertanian secara komersial.

Lembaga sertifikasi dan standardisasi nasional perlu mengembangkan skema sertifikasi khusus bagi produk turunan limbah pertanian yang mempertimbangkan karakteristik unik bahan baku dan proses produksinya, berbeda dari standar produk pertanian konvensional pada umumnya. Pengembangan skema sertifikasi ini penting untuk mendukung pertumbuhan industri hilir pengolahan limbah pertanian yang semakin berkembang di Indonesia, sekaligus melindungi kepentingan konsumen dari produk turunan limbah pertanian yang tidak memenuhi standar kualitas dan keamanan yang memadai.

4. Kemitraan Multipihak dalam Rantai Nilai Pemanfaatan Limbah

Pengembangan rantai nilai pemanfaatan limbah pertanian yang efektif memerlukan kemitraan multipihak yang melibatkan petani sebagai penyedia bahan baku limbah, industri pengolahan sebagai penghasil produk turunan, lembaga riset sebagai penyedia teknologi, serta pemerintah sebagai regulator dan fasilitator kebijakan pendukung. Model kemitraan yang saling menguntungkan ini penting untuk

memastikan bahwa nilai tambah ekonomi yang dihasilkan dari pemanfaatan limbah pertanian dapat terdistribusi secara adil kepada seluruh pihak yang terlibat dalam rantai nilai, khususnya petani sebagai penyedia bahan baku yang sering kali berada pada posisi tawar yang lebih lemah dibandingkan pelaku usaha industri hilir.

5. Riset dan Inovasi Berkelanjutan Pemanfaatan Limbah Pertanian

Keberlanjutan pengembangan pemanfaatan limbah pertanian di Indonesia sangat bergantung pada dukungan riset dan inovasi berkelanjutan yang menghasilkan teknologi pengolahan baru serta produk turunan yang lebih beragam dan bernilai tambah tinggi. Kolaborasi antara lembaga riset, perguruan tinggi, dan industri dalam mengembangkan inovasi pemanfaatan limbah pertanian perlu terus didorong melalui skema pendanaan riset terapan yang berorientasi pada solusi praktis yang dapat diadopsi oleh pelaku usaha pertanian dan industri pengolahan hasil pertanian di Indonesia.

Pengembangan pusat unggulan riset pemanfaatan limbah pertanian yang berfokus pada komoditas unggulan spesifik Indonesia, seperti kelapa sawit, tebu, dan padi, dapat mempercepat inovasi teknologi pengolahan limbah yang disesuaikan dengan karakteristik dan volume limbah spesifik komoditas tersebut. Investasi jangka panjang dalam riset pemanfaatan limbah pertanian ini berpotensi menghasilkan manfaat ekonomi dan lingkungan yang signifikan bagi Indonesia sebagai salah satu produsen utama berbagai komoditas pertanian dan perkebunan di tingkat global.

6. Limbah Pertanian sebagai Sumber Daya Masa Depan

Transformasi cara pandang terhadap limbah pertanian, dari beban yang harus dibuang menjadi sumber daya bernilai ekonomi dan lingkungan, mencerminkan pergeseran paradigma penting menuju sistem pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan. Pengembangan riset, investasi teknologi, dan kebijakan pendukung yang konsisten akan menjadi kunci penting bagi terwujudnya potensi penuh pemanfaatan limbah pertanian Indonesia yang melimpah bagi kesejahteraan ekonomi dan kelestarian lingkungan secara berkelanjutan.

G. Studi Implementasi Sistem Terintegrasi

Berbagai studi implementasi sistem pertanian terintegrasi di Indonesia menunjukkan hasil yang beragam, dipengaruhi oleh faktor kondisi agroekologi setempat, dukungan kelembagaan, serta tingkat kesiapan petani dalam mengelola kompleksitas sistem yang terintegrasi. Model integrasi sapi-padi yang dikembangkan di beberapa sentra produksi padi di Pulau Jawa menunjukkan peningkatan pendapatan petani yang signifikan melalui diversifikasi produk, meskipun keberhasilan implementasi sangat bergantung pada ketersediaan pendampingan teknis yang konsisten dari penyuluh pertanian dan peternakan, khususnya pada tahap awal adopsi ketika petani masih dalam proses pembelajaran mengenai manajemen sistem terintegrasi yang lebih kompleks dibandingkan sistem monokultur konvensional.

Penerapan sistem mina padi di berbagai wilayah, termasuk di Jawa Barat dan Sumatera Barat, menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam hal peningkatan pendapatan dan ketahanan pangan tingkat rumah tangga petani, meskipun skala penerapannya masih relatif terbatas dibandingkan potensi luas lahan sawah nasional yang dapat dikembangkan untuk sistem ini. Ahmed, Zhang, Bunting, dan kolega (2021) mencatat bahwa keberhasilan sistem mina padi di berbagai negara Asia Tenggara sangat dipengaruhi oleh dukungan kebijakan pemerintah, termasuk penyediaan bibit ikan bersubsidi dan pelatihan teknis, yang menjadi faktor kunci dalam mempercepat adopsi sistem ini secara lebih luas di kalangan petani sawah.

Studi implementasi pertanian sirkular pada kawasan industri kelapa sawit terpadu menunjukkan bahwa integrasi antara perkebunan, pabrik pengolahan, dan unit pengelolaan limbah dalam satu kawasan mampu menghasilkan efisiensi ekonomi dan lingkungan yang signifikan, termasuk pengurangan biaya pengelolaan limbah dan penciptaan sumber pendapatan tambahan dari produk turunan limbah seperti biogas dan kompos. Model kawasan industri terpadu semacam ini berpotensi direplikasi pada komoditas perkebunan lain di Indonesia, seperti karet dan tebu, yang juga menghasilkan volume limbah signifikan dari proses produksi dan pengolahannya.

Implementasi model pekarangan pangan lestari sebagai bentuk IFS skala rumah tangga telah diterapkan secara luas melalui program

pemerintah di berbagai wilayah Indonesia, menunjukkan kontribusi positif terhadap peningkatan ketahanan pangan dan gizi keluarga, khususnya pada masa krisis seperti pandemi yang membatasi mobilitas dan akses terhadap pasar pangan segar. Keberlanjutan program pekarangan pangan lestari pascaperiode intervensi pemerintah menjadi tantangan tersendiri, mengingat motivasi rumah tangga untuk terus mengelola pekarangan secara konsisten memerlukan insentif dan pendampingan berkelanjutan, bukan hanya pada tahap awal peluncuran program semata.

Pembelajaran dari berbagai studi implementasi sistem terintegrasi tersebut menegaskan bahwa keberhasilan jangka panjang tidak hanya ditentukan oleh kesesuaian teknis model dengan kondisi agroekologi setempat, melainkan juga oleh faktor kelembagaan, seperti dukungan kebijakan pemerintah, akses pembiayaan, dan pendampingan teknis berkelanjutan, serta faktor sosial seperti tingkat penerimaan dan kesiapan petani dalam mengadopsi sistem yang lebih kompleks dibandingkan praktik konvensional yang telah lama mereka jalankan secara turun-temurun. Sinergi antara faktor teknis, kelembagaan, dan sosial ini menjadi kunci penting bagi keberlanjutan dan replikasi sistem pertanian terintegrasi secara lebih luas di berbagai wilayah Indonesia pada masa mendatang.

Tabel 8.4 Faktor Kunci Keberhasilan Implementasi Sistem Terintegrasi

Faktor	Peran dalam Keberhasilan	Contoh Intervensi Pendukung
Kesesuaian teknis agroekologi	Menentukan kelayakan model pada suatu wilayah	Kajian kesesuaian lahan sebelum implementasi
Dukungan kelembagaan	Menjamin keberlanjutan pascaintervensi awal	Penguatan kelompok tani dan koperasi
Akses pembiayaan	Mendukung investasi infrastruktur awal	Skema KUR dan bantuan pemerintah
Pendampingan teknis	Mempercepat proses pembelajaran petani	Penyuluhan terpadu lintas komoditas

Faktor	Peran dalam Keberhasilan	Contoh Intervensi Pendukung
Kesiapan sosial petani	Menentukan tingkat adopsi dan keberlanjutan	Sosialisasi manfaat dan studi banding petani

1. Pembelajaran dari Kegagalan Implementasi Sistem Terintegrasi

Tidak seluruh upaya implementasi sistem pertanian terintegrasi di Indonesia berhasil mencapai tujuan yang diharapkan, dengan beberapa kasus kegagalan yang disebabkan oleh ketidaksesuaian model dengan kondisi agroekologi setempat, kurangnya pendampingan teknis yang berkelanjutan setelah periode intervensi awal program berakhir, serta ketidaksiapan kelembagaan petani dalam mengelola kompleksitas sistem yang terintegrasi. Pembelajaran dari kegagalan tersebut penting untuk dianalisis secara mendalam guna menghindari pengulangan kesalahan yang sama pada program pengembangan sistem terintegrasi di masa mendatang.

Evaluasi kritis terhadap program-program sistem terintegrasi yang kurang berhasil menunjukkan pentingnya pendekatan partisipatif sejak tahap perencanaan awal, yang melibatkan petani secara aktif dalam menentukan jenis komoditas dan model integrasi yang akan diterapkan, dibandingkan pendekatan top-down yang menentukan model secara seragam tanpa mempertimbangkan preferensi dan kondisi spesifik petani setempat. Pendekatan partisipatif ini terbukti menghasilkan tingkat keberlanjutan program yang lebih tinggi, karena petani memiliki rasa kepemilikan yang lebih kuat terhadap sistem yang mereka bantu rancang sejak awal proses perencanaan program.

2. Replikasi dan Skalabilitas Model Sistem Terintegrasi yang Berhasil

Strategi replikasi model sistem terintegrasi yang telah terbukti berhasil pada suatu wilayah ke wilayah lain memerlukan pertimbangan cermat mengenai kesesuaian kondisi agroekologi dan sosial ekonomi, mengingat model yang berhasil pada satu konteks tidak selalu dapat diterapkan secara langsung tanpa modifikasi pada konteks yang berbeda. Pendekatan replikasi yang adaptif, yang mempertahankan prinsip dasar keberhasilan model sambil menyesuaikan detail teknis dengan kondisi

lokal spesifik wilayah tujuan replikasi, menjadi strategi yang lebih realistis dibandingkan replikasi identik yang mengabaikan variasi kondisi antarwilayah di Indonesia yang sangat beragam secara geografis dan sosial budaya.

Skalabilitas model sistem terintegrasi dari skala percontohan menuju skala yang lebih luas memerlukan dukungan infrastruktur dan kelembagaan yang memadai, termasuk ketersediaan fasilitas pengolahan hasil dan pemasaran yang mampu menampung peningkatan volume produksi seiring bertambahnya jumlah petani yang mengadopsi sistem terintegrasi tersebut. Perencanaan skalabilitas yang matang sejak tahap awal pengembangan model percontohan menjadi penting untuk menghindari hambatan struktural yang dapat menghambat perluasan adopsi sistem terintegrasi secara lebih luas di masa mendatang, sehingga manfaat yang telah terbukti pada skala kecil dapat direplikasi secara lebih signifikan bagi ketahanan pangan nasional.

Sistem produksi pertanian terintegrasi menawarkan pendekatan yang komprehensif dan adaptif dalam menjawab tantangan keberlanjutan pertanian modern, menggabungkan prinsip efisiensi sumber daya, diversifikasi ekonomi, dan pelestarian lingkungan dalam satu kerangka pengelolaan yang holistik. Keberhasilan penerapannya di Indonesia menuntut sinergi berkelanjutan antara inovasi teknis, penguatan kelembagaan, dan dukungan kebijakan yang konsisten, sehingga manfaat sistem terintegrasi ini dapat dirasakan secara luas oleh petani Indonesia dalam mewujudkan ketahanan pangan nasional yang berkelanjutan bagi generasi kini dan mendatang.

Tabel 8.5 Estimasi Manfaat Ekonomi dan Lingkungan Berbagai Model Sistem Terintegrasi

Sistem Terintegrasi	Manfaat Ekonomi Utama	Manfaat Lingkungan Utama
Tanaman-Ternak	Diversifikasi pendapatan, penghematan biaya pupuk dan pakan	Perbaikan struktur tanah, penurunan emisi metana terkelola

Sistem Terintegrasi	Manfaat Ekonomi Utama	Manfaat Lingkungan Utama
Mina Padi	Pendapatan tambahan dari hasil ikan tanpa lahan tambahan	Pengurangan pestisida kimia, penurunan emisi metana sawah
Circular Agriculture	Nilai tambah dari produk turunan limbah	Penutupan siklus hara, pengurangan pencemaran
Zero Waste Agriculture	Diversifikasi produk bernilai tinggi dari limbah	Minimalisasi limbah terbuang ke lingkungan

Ringkasan manfaat pada tabel di atas menegaskan bahwa setiap model sistem terintegrasi menawarkan kombinasi manfaat ekonomi dan lingkungan yang saling melengkapi, sehingga pemilihan model yang tepat perlu disesuaikan dengan konteks spesifik agroekologi, ketersediaan sumber daya, dan preferensi petani pada suatu wilayah. Kombinasi lebih dari satu model sistem terintegrasi pada skala kawasan yang lebih luas berpotensi menghasilkan manfaat kumulatif yang lebih besar dibandingkan penerapan satu model tunggal secara terpisah pada wilayah yang sama.



BAB IX
PERTANIAN PERKOTAAN DAN PRODUKSI PANGAN MASA DEPAN

Urbanisasi yang berlangsung pesat di berbagai belahan dunia menghadirkan tantangan sekaligus peluang baru bagi sistem pangan global, mengingat proporsi penduduk yang tinggal di kawasan perkotaan diproyeksikan terus meningkat secara signifikan dalam beberapa dekade mendatang. Langemeyer, Madrid-Lopez, Beltran, dan Mendez (2021) menegaskan bahwa pertanian perkotaan (*urban agriculture*) bukan lagi sekadar aktivitas hobi atau pengisi waktu luang, melainkan telah berkembang menjadi komponen strategis dalam upaya membangun ketahanan pangan dan resiliensi kota terhadap berbagai guncangan, termasuk gangguan rantai pasok pangan konvensional yang bergantung pada wilayah produksi jauh dari pusat konsumsi perkotaan.

Bab ini mengulas secara komprehensif berbagai bentuk inovasi produksi pangan yang berkembang khusus untuk konteks perkotaan dan lahan terbatas, meliputi pertanian perkotaan secara umum, hidroponik, aeroponik, akuaponik, pertanian vertikal (*vertical farming*), pertanian lingkungan terkendali (*Controlled Environment Agriculture*/CEA), hingga berbagai peluang strategis yang ditawarkan pendekatan-pendekatan tersebut bagi ketahanan pangan perkotaan di masa depan. Pembahasan disusun dengan menautkan landasan teoretis, bukti empiris dari literatur mutakhir, serta konteks penerapan di Indonesia sebagai negara dengan tingkat urbanisasi yang terus meningkat dan menghadapi tantangan ketahanan pangan perkotaan yang semakin kompleks.

A. Urban Farming

Pertanian perkotaan atau *urban farming* didefinisikan sebagai praktik budi daya tanaman dan/atau pemeliharaan hewan ternak yang dilakukan di dalam dan sekitar batas administratif kawasan perkotaan,

memanfaatkan berbagai ruang yang tersedia seperti pekarangan rumah, atap bangunan, lahan kosong, maupun ruang publik yang dialihfungsikan sementara untuk kegiatan produksi pangan. Weidner, Yang, dan Hamm (2019) menjelaskan bahwa pertanian perkotaan modern telah berkembang jauh melampaui konsep berkebun rumah tangga tradisional, mencakup berbagai model produksi yang lebih terorganisasi, termasuk pertanian komunitas, pertanian komersial skala kecil, hingga integrasi dengan sistem pangan kota yang lebih luas melalui rantai pasok pendek antara produsen dan konsumen perkotaan.

Manfaat multidimensi pertanian perkotaan mencakup dimensi pangan melalui penyediaan sumber pangan segar yang dapat diakses langsung oleh masyarakat perkotaan, dimensi lingkungan melalui pengurangan jejak karbon transportasi pangan dan peningkatan ruang hijau kota, dimensi sosial melalui penguatan kohesi komunitas dan penyediaan ruang interaksi sosial, serta dimensi ekonomi melalui penciptaan lapangan kerja dan sumber pendapatan tambahan bagi masyarakat perkotaan. Artmann dan Sartison (2018) mengategorikan pertanian perkotaan sebagai salah satu solusi berbasis alam (*nature-based solution*) yang mampu menjawab berbagai tantangan perkotaan secara simultan, termasuk mitigasi pulau panas perkotaan, pengelolaan air hujan, dan peningkatan kualitas udara di tengah padatnya kawasan permukiman dan aktivitas industri perkotaan.

Gambar 9.1 *Urban Farming*



Berbagai model kelembagaan pertanian perkotaan telah berkembang secara beragam, meliputi kebun komunitas (*community garden*) yang dikelola secara kolektif oleh warga setempat, pertanian sosial yang melibatkan kelompok rentan seperti lansia dan penyandang disabilitas sebagai bagian dari program rehabilitasi sosial, hingga pertanian komersial perkotaan yang dikelola oleh perusahaan rintisan teknologi pertanian dengan orientasi profit yang jelas. Keberagaman model ini mencerminkan fleksibilitas pertanian perkotaan dalam beradaptasi dengan berbagai konteks sosial ekonomi dan tujuan yang berbeda-beda, mulai dari tujuan sosial kemasyarakatan hingga tujuan bisnis komersial yang berorientasi keuntungan finansial secara langsung.

Grebitus, Chenarides, Muenich, dan Mahalov (2020) melakukan studi eksploratif mengenai persepsi konsumen terhadap pertanian perkotaan, menemukan bahwa faktor kesegaran produk, kepercayaan terhadap sumber pangan, dan keinginan mendukung ekonomi lokal menjadi motivasi utama konsumen dalam mendukung dan membeli produk hasil pertanian perkotaan, meskipun harga yang ditawarkan sering kali lebih tinggi dibandingkan produk dari rantai pasok konvensional. Temuan ini mengindikasikan adanya segmen pasar khusus yang bersedia membayar premium untuk produk pertanian perkotaan, membuka peluang model bisnis yang berkelanjutan secara ekonomi bagi pelaku usaha pertanian perkotaan yang mampu mengomunikasikan nilai tambah produk mereka secara efektif kepada konsumen target.

Penerapan pertanian perkotaan di Indonesia menunjukkan perkembangan yang dinamis, terutama pascapandemi ketika masyarakat perkotaan semakin menyadari pentingnya kemandirian pangan tingkat rumah tangga di tengah gangguan mobilitas dan rantai pasok pangan konvensional. Lal (2020) mencatat bahwa berkebun rumah tangga dan pertanian perkotaan mengalami lonjakan minat signifikan selama periode pandemi global, memberikan kontribusi nyata terhadap ketahanan pangan dan gizi keluarga di berbagai negara, termasuk Indonesia, yang kemudian mendorong pemerintah daerah di berbagai kota besar untuk mengembangkan program dukungan pertanian perkotaan secara lebih terstruktur dan berkelanjutan pascapandemi.

Tabel 9.1 Model Kelembagaan Pertanian Perkotaan dan Karakteristiknya

Model	Orientasi Utama	Contoh Bentuk Kegiatan
Kebun komunitas	Sosial dan ketahanan pangan lokal	Lahan bersama dikelola warga RT/RW
Pertanian sosial	Rehabilitasi dan pemberdayaan	Kebun terapi bagi lansia/disabilitas
Pertanian komersial perkotaan	Profit dan efisiensi bisnis	Startup hidroponik/vertical farm skala kota
Pertanian sekolah/institusi	Edukasi dan kesadaran lingkungan	Kebun edukatif di sekolah dan kampus
Pertanian atap (rooftop farming)	Optimalisasi ruang terbatas	Budi daya di atap gedung perkantoran/apartemen

Keberagaman model kelembagaan pertanian perkotaan tersebut menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat diadaptasi sesuai dengan tujuan dan konteks sosial ekonomi yang berbeda. Pemilihan model yang tepat perlu mempertimbangkan ketersediaan lahan, karakteristik komunitas, serta tujuan utama yang ingin dicapai, apakah lebih berorientasi pada manfaat sosial, edukasi, atau keuntungan ekonomi secara komersial.

1. Tipologi Ruang Perkotaan untuk Produksi Pangan

Identifikasi dan pemanfaatan berbagai tipologi ruang perkotaan yang berpotensi dikonversi menjadi lahan produksi pangan menjadi langkah awal penting dalam pengembangan pertanian perkotaan yang optimal. Orsini, Pennisi, Michelon, dan kolega (2020) mengulas berbagai fungsi multifungsi pertanian perkotaan di kawasan utara global, mengidentifikasi ruang-ruang potensial seperti lahan kosong sementara (*vacant lot*) yang menunggu pembangunan, atap bangunan komersial dan residensial, dinding bangunan yang dapat dimanfaatkan untuk pertanian vertikal luar ruangan, hingga ruang bawah tanah dan area

parkir yang jarang digunakan secara optimal yang berpotensi dialihfungsikan sementara maupun permanen untuk kegiatan produksi pangan perkotaan.

Pemetaan potensi ruang perkotaan untuk pertanian memerlukan kolaborasi antara pemerintah kota, pemilik lahan swasta, dan komunitas masyarakat, mengingat sebagian besar ruang potensial berada dalam kepemilikan pihak yang beragam dengan kepentingan yang mungkin berbeda-beda. Pengembangan basis data digital mengenai ruang kosong perkotaan yang dapat diakses publik menjadi instrumen penting untuk memfasilitasi pencocokan antara pihak yang memiliki lahan tidak termanfaatkan dengan kelompok masyarakat atau pelaku usaha yang berminat mengembangkan kegiatan pertanian perkotaan pada lahan tersebut secara sementara maupun jangka panjang.

2. Kebijakan Pemerintah Kota dalam Mendukung Urban Farming

Dukungan kebijakan pemerintah kota menjadi faktor determinan penting bagi keberhasilan dan keberlanjutan pertanian perkotaan, mencakup regulasi yang memfasilitasi penggunaan lahan sementara untuk pertanian, insentif pajak bagi pemilik lahan yang bersedia menyediakan ruang untuk kegiatan pertanian perkotaan, serta program bantuan teknis dan sarana produksi bagi kelompok masyarakat yang mengembangkan kebun komunitas. Sanyé-Mengual, Specht, Krikser, dan kolega (2018) menekankan pentingnya pembentukan komunitas praktik (*community of practice*) yang menghubungkan berbagai pemangku kepentingan pertanian perkotaan, termasuk pemerintah, akademisi, dan praktisi, guna memfasilitasi pertukaran pengetahuan dan pengalaman dalam mengatasi berbagai tantangan implementasi di lapangan.

Beberapa kota besar di Indonesia telah mulai mengembangkan kebijakan pendukung pertanian perkotaan, meskipun implementasinya masih bervariasi dan belum sepenuhnya terintegrasi ke dalam kerangka perencanaan pembangunan kota secara menyeluruh. Penguatan koordinasi antarunit kerja pemerintah kota, termasuk dinas pertanian, dinas tata ruang, dan dinas lingkungan hidup, menjadi kebutuhan penting untuk memastikan kebijakan pendukung pertanian perkotaan dapat diimplementasikan secara koheren dan tidak saling bertentangan antara

satu kebijakan sektoral dengan kebijakan sektoral lainnya yang terkait dengan pemanfaatan ruang kota.

3. *Urban Farming* dan Kesehatan Mental Masyarakat Perkotaan

Selain manfaat produksi pangan, keterlibatan dalam kegiatan pertanian perkotaan juga menunjukkan dampak positif terhadap kesehatan mental dan kesejahteraan psikologis masyarakat perkotaan, mengingat aktivitas berkebun terbukti secara ilmiah mampu mengurangi tingkat stres dan kecemasan, meningkatkan mood positif, serta memberikan rasa pencapaian dan koneksi dengan alam yang sering kali hilang dalam kehidupan perkotaan yang serba cepat dan padat aktivitas. Manfaat kesehatan mental ini menjadi salah satu argumen penting bagi pemerintah kota dalam mendukung pengembangan ruang pertanian perkotaan sebagai bagian dari strategi kesehatan masyarakat yang lebih luas, melampaui manfaat langsung terhadap ketahanan pangan semata.

Program pertanian perkotaan yang dirancang secara inklusif, melibatkan kelompok masyarakat rentan seperti lansia, penyandang disabilitas, dan kelompok berpenghasilan rendah, menunjukkan potensi tambahan sebagai instrumen pemberdayaan sosial yang menciptakan rasa kepemilikan komunitas dan memperkuat jaringan dukungan sosial antarwarga. Keterlibatan lintas generasi dalam kegiatan pertanian perkotaan turut membuka peluang transfer pengetahuan tradisional mengenai budi daya tanaman dari generasi tua kepada generasi muda perkotaan yang semakin jauh dari praktik pertanian akibat gaya hidup modern yang didominasi aktivitas non-pertanian.

4. Rantai Pasok Pendek dan Pemasaran Langsung Hasil *Urban Farming*

Pengembangan rantai pasok pendek (*short food supply chain*) menjadi karakteristik khas pertanian perkotaan yang membedakannya dari sistem pangan konvensional, di mana jarak antara produsen dan konsumen dapat dipersingkat secara signifikan, bahkan pada beberapa kasus produk dapat langsung dikonsumsi pada hari yang sama dengan waktu panen. Model pemasaran langsung melalui pasar tani perkotaan (*urban farmers market*), skema berlangganan sayur mingguan (*community supported agriculture*), maupun platform digital yang menghubungkan produsen pertanian perkotaan dengan konsumen

sekitar, menawarkan margin keuntungan yang lebih baik bagi produsen dibandingkan penjualan melalui rantai distribusi konvensional yang melibatkan banyak perantara.

Weidner, Yang, dan Hamm (2019) mencatat bahwa keberhasilan rantai pasok pendek pertanian perkotaan sangat bergantung pada kemampuan produsen membangun hubungan kepercayaan langsung dengan konsumen, termasuk transparansi mengenai metode budi daya yang digunakan dan komitmen terhadap keberlanjutan lingkungan. Investasi dalam branding dan komunikasi pemasaran yang efektif menjadi kunci penting bagi keberlanjutan ekonomi usaha pertanian perkotaan skala kecil hingga menengah, mengingat diferensiasi produk berdasarkan narasi lokalitas dan keberlanjutan menjadi salah satu keunggulan kompetitif utama dibandingkan produk dari rantai pasok konvensional yang lebih mengandalkan skala ekonomi dan efisiensi biaya produksi.

5. Tantangan Kualitas Tanah dan Kontaminasi pada *Urban Farming*

Kualitas tanah pada lahan perkotaan sering kali menjadi perhatian serius dalam pengembangan pertanian perkotaan berbasis tanah, mengingat riwayat penggunaan lahan sebelumnya berpotensi meninggalkan kontaminan seperti logam berat dan residu bahan kimia industri yang dapat terakumulasi dalam tanaman dan membahayakan kesehatan konsumen apabila tidak ditangani dengan tepat. Pengujian kualitas tanah secara menyeluruh sebelum memulai kegiatan pertanian perkotaan berbasis tanah menjadi langkah mitigasi risiko yang tidak boleh diabaikan, khususnya pada lahan bekas kawasan industri atau lahan yang berdekatan dengan jalan raya dengan tingkat polusi udara tinggi yang berpotensi mencemari tanah di sekitarnya melalui deposisi partikulat dari waktu ke waktu.

Pada lahan dengan tingkat kontaminasi yang tidak memenuhi standar keamanan untuk budi daya tanaman pangan, penerapan sistem budi daya tanpa tanah seperti hidroponik atau penggunaan wadah tanam dengan media tanam bersih yang diimpor dari luar lokasi menjadi solusi alternatif yang lebih aman, meskipun memerlukan biaya tambahan dibandingkan budi daya langsung pada tanah yang tersedia di lokasi. Edukasi bagi masyarakat mengenai pentingnya pengujian kualitas tanah

dan pemilihan metode budi daya yang sesuai dengan kondisi lahan menjadi bagian penting dari program pendampingan teknis yang perlu disediakan pemerintah kota bagi kelompok masyarakat yang mengembangkan kebun komunitas di berbagai lokasi perkotaan.

6. Pengukuran Dampak Sosial Ekonomi *Urban Farming*

Pengukuran dampak sosial ekonomi pertanian perkotaan secara sistematis dan terstandardisasi menjadi kebutuhan penting untuk membangun basis bukti yang kuat mengenai kontribusi nyata sektor ini terhadap kesejahteraan masyarakat kota, mencakup indikator seperti penghematan pengeluaran rumah tangga untuk pangan, penciptaan lapangan kerja, serta peningkatan interaksi sosial antarwarga yang terlibat dalam kegiatan pertanian perkotaan bersama. Pengembangan metodologi evaluasi dampak yang komprehensif, melampaui sekadar penghitungan volume produksi, penting untuk mengomunikasikan nilai penuh pertanian perkotaan kepada pengambil kebijakan yang perlu mengalokasikan sumber daya publik secara efektif berdasarkan bukti empiris mengenai manfaat program yang telah berjalan.

Studi longitudinal yang memantau dampak program pertanian perkotaan dari waktu ke waktu dapat memberikan wawasan yang lebih mendalam mengenai keberlanjutan manfaat yang dihasilkan, dibandingkan studi *cross-sectional* yang hanya menangkap kondisi pada satu titik waktu tertentu. Investasi dalam riset evaluasi dampak jangka panjang pertanian perkotaan di berbagai kota Indonesia menjadi kebutuhan akademik dan kebijakan yang penting, mengingat keputusan alokasi anggaran dan dukungan kebijakan pemerintah idealnya didasarkan pada bukti yang kuat mengenai efektivitas program pertanian perkotaan dalam mencapai tujuan yang telah ditetapkan sejak awal perencanaan program tersebut.

7. *Urban Farming* dan Adaptasi Perubahan Iklim Perkotaan

Kontribusi pertanian perkotaan terhadap adaptasi perubahan iklim kota semakin mendapat pengakuan, mengingat vegetasi yang dihasilkan dari kegiatan pertanian perkotaan berkontribusi terhadap mitigasi efek pulau panas perkotaan (*urban heat island*) melalui proses evapotranspirasi dan penyediaan naungan, sekaligus membantu pengelolaan limpasan air hujan yang dapat mengurangi risiko banjir

perkotaan pada musim hujan intensif. Artmann dan Sartison (2018) menegaskan bahwa integrasi pertanian perkotaan ke dalam infrastruktur hijau kota (*green infrastructure*) secara lebih sistematis dapat memperkuat kapasitas adaptasi kota terhadap dampak perubahan iklim yang semakin nyata dirasakan, termasuk peningkatan frekuensi gelombang panas dan curah hujan ekstrem yang berdampak pada kenyamanan dan keselamatan penduduk perkotaan.

Perencanaan pertanian perkotaan yang mempertimbangkan fungsi ganda sebagai instrumen adaptasi iklim, tidak hanya sebagai sumber produksi pangan, membuka peluang integrasi yang lebih strategis ke dalam rencana aksi iklim kota yang tengah dikembangkan berbagai pemerintah daerah di Indonesia. Penempatan strategis area pertanian perkotaan pada lokasi yang rentan terhadap banjir atau efek pulau panas dapat mengoptimalkan manfaat ganda dari investasi ruang hijau kota, sekaligus memberikan manfaat tambahan berupa produksi pangan lokal yang mendukung ketahanan pangan masyarakat sekitar area tersebut.

8. *Urban Farming* sebagai Fondasi Ekosistem Pangan Perkotaan

Pendekatan *urban farming* menjadi fondasi penting bagi keseluruhan ekosistem produksi pangan perkotaan yang dibahas dalam bab ini, menyediakan kerangka konseptual dan kelembagaan yang menjadi basis pengembangan berbagai teknologi lebih spesifik seperti hidroponik, akuaponik, dan *vertical farming* yang akan dibahas pada sub bab berikutnya. Keberagaman model dan skala urban farming, mulai dari kebun rumah tangga sederhana hingga fasilitas komersial berteknologi tinggi, mencerminkan fleksibilitas pendekatan ini dalam menjawab kebutuhan yang beragam dari berbagai segmen masyarakat perkotaan Indonesia.

9. Pembiayaan Mikro bagi Pelaku Usaha *Urban Farming*

Akses pembiayaan mikro yang disesuaikan dengan karakteristik usaha pertanian perkotaan skala kecil menjadi kebutuhan penting yang belum sepenuhnya terpenuhi oleh lembaga keuangan konvensional, mengingat skema pembiayaan pertanian yang ada umumnya dirancang untuk konteks pertanian pedesaan skala luas dengan siklus produksi dan agunan yang berbeda karakteristiknya dari usaha pertanian perkotaan

skala kecil. Pengembangan produk pembiayaan mikro khusus yang mempertimbangkan siklus produksi lebih pendek dan skala investasi lebih kecil yang khas pada usaha pertanian perkotaan dapat membuka akses modal yang lebih inklusif bagi pelaku usaha pemula di sektor ini.

Kemitraan antara lembaga keuangan mikro, koperasi, dan platform crowdfunding dengan komunitas pertanian perkotaan dapat menciptakan ekosistem pembiayaan yang lebih beragam dan sesuai kebutuhan, mengingat setiap skema pembiayaan menawarkan karakteristik risiko dan persyaratan yang berbeda-beda. Diversifikasi sumber pembiayaan ini penting untuk mengakomodasi keberagaman profil pelaku usaha pertanian perkotaan, mulai dari individu hobiis yang ingin mengembangkan usaha kecil-kecilan hingga wirausahawan yang berambisi mengembangkan bisnis pertanian perkotaan berskala lebih besar dan membutuhkan modal investasi yang lebih signifikan.

10. Integrasi *Urban Farming* dengan Desain Bangunan Hijau

Integrasi fungsi pertanian ke dalam desain bangunan hijau (*green building*) semakin menjadi tren arsitektur perkotaan kontemporer, di mana elemen produksi pangan tidak lagi dipandang sebagai tambahan terpisah, melainkan bagian integral dari sistem bangunan yang berkelanjutan, mencakup pemanfaatan dinding hijau produktif, taman atap yang menghasilkan pangan, dan balkon yang dirancang khusus untuk mendukung budi daya tanaman skala rumah tangga. Standar sertifikasi bangunan hijau di berbagai negara mulai memasukkan kriteria integrasi pertanian perkotaan sebagai salah satu poin penilaian, mendorong pengembang properti untuk mempertimbangkan elemen produksi pangan sejak tahap perencanaan desain awal bangunan yang akan dibangun.

Penerapan konsep ini di Indonesia masih tergolong baru, namun beberapa pengembang properti kelas atas mulai mengintegrasikan fasilitas berkebun bersama sebagai daya tarik pemasaran bagi hunian vertikal yang mereka kembangkan, menawarkan nilai tambah gaya hidup sehat dan berkelanjutan bagi calon penghuni yang semakin peduli terhadap kualitas hidup dan keberlanjutan lingkungan. Insentif kebijakan bagi pengembang yang mengintegrasikan fasilitas pertanian perkotaan produktif ke dalam desain bangunan mereka dapat mempercepat adopsi tren ini secara lebih luas di industri properti Indonesia.

B. Hidroponik

Hidroponik merupakan teknik budi daya tanaman tanpa menggunakan media tanah, melainkan memanfaatkan larutan nutrisi yang dilarutkan dalam air sebagai sumber hara bagi pertumbuhan tanaman, dengan akar tanaman tumbuh langsung di dalam larutan nutrisi atau media *inert* seperti *rockwool, perlite*, dan sekam bakar yang berfungsi sebagai penopang fisik tanaman. Velazquez-Gonzalez et al (2022) menjelaskan bahwa keunggulan utama hidroponik dibandingkan budi daya konvensional berbasis tanah terletak pada efisiensi penggunaan air yang jauh lebih tinggi, karena sistem hidroponik memungkinkan resirkulasi larutan nutrisi sehingga air yang tidak diserap tanaman dapat digunakan kembali, berbeda dengan budi daya berbasis tanah yang mengalami kehilangan air signifikan akibat perkolasi dan evaporasi.

Berbagai jenis sistem hidroponik telah dikembangkan dengan karakteristik dan tingkat kompleksitas yang beragam, meliputi sistem sumbu (*wick system*) yang paling sederhana dan tidak memerlukan energi listrik, sistem rakit apung (*deep water culture*) yang menempatkan akar tanaman terendam langsung dalam larutan nutrisi, sistem *Nutrient Film Technique* (NFT) yang mengalirkan lapisan tipis larutan nutrisi secara kontinu melalui saluran tempat akar tanaman tumbuh, serta sistem irigasi tetes (*drip system*) yang meneteskan larutan nutrisi secara terjadwal ke media tanam tempat tanaman tumbuh.

Gambar 9.2 Hidroponik

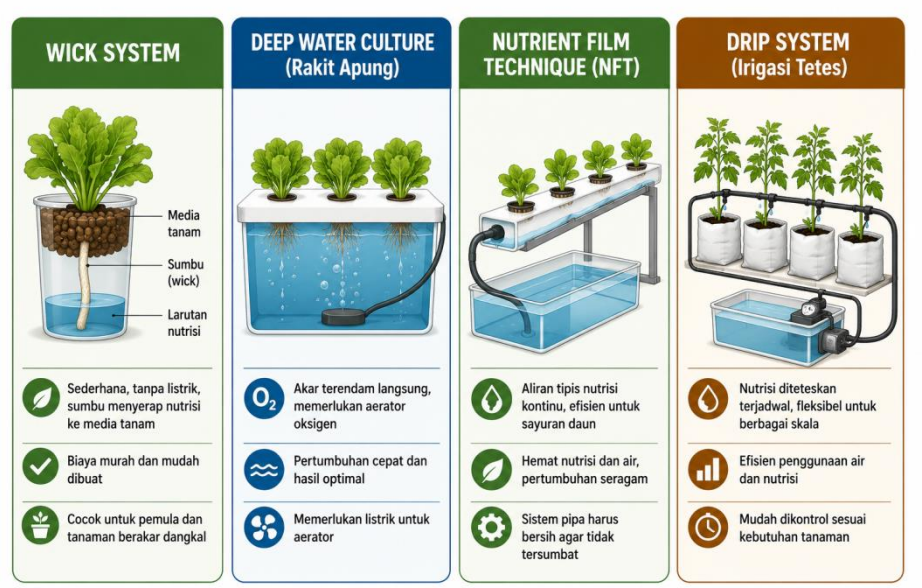


Sharma, Acharya, Kumar, Singh, dan Chaurasia (2019) menekankan pentingnya formulasi larutan nutrisi yang tepat dalam sistem hidroponik, mencakup keseimbangan unsur hara makro seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, serta unsur hara mikro seperti besi, mangan, dan seng, yang perlu disesuaikan dengan kebutuhan spesifik setiap jenis tanaman dan fase pertumbuhannya. Pemantauan parameter larutan nutrisi, termasuk tingkat keasaman (*pH*) dan konduktivitas listrik (*electrical conductivity*/EC) yang mencerminkan konsentrasi total garam terlarut, menjadi aspek krusial dalam manajemen sistem hidroponik untuk memastikan tanaman memperoleh hara secara optimal tanpa mengalami defisiensi atau toksisitas akibat konsentrasi larutan yang tidak sesuai dengan kebutuhan fisiologis tanaman.

Keunggulan hidroponik dalam konteks pertanian perkotaan sangat signifikan, mengingat sistem ini memungkinkan produksi tanaman pada lahan yang sangat terbatas, bahkan pada ruang dalam ruangan (*indoor*) yang sepenuhnya terisolasi dari kondisi cuaca eksternal, dengan produktivitas per satuan luas yang jauh lebih tinggi dibandingkan budi daya konvensional berbasis tanah. Sistem hidroponik juga menawarkan kontrol yang lebih baik terhadap kualitas dan konsistensi hasil panen, karena variabel pertumbuhan seperti ketersediaan hara dapat dikendalikan secara lebih presisi dibandingkan budi daya berbasis tanah yang dipengaruhi oleh variabilitas kondisi tanah alami yang sulit dikendalikan secara seragam pada skala produksi komersial.

Tantangan penerapan hidroponik meliputi kebutuhan investasi awal yang relatif tinggi untuk infrastruktur sistem, termasuk pompa, wadah, dan instrumen pemantauan, ketergantungan terhadap pasokan listrik yang stabil untuk sistem yang memerlukan sirkulasi larutan nutrisi secara kontinu, serta kebutuhan pengetahuan teknis mengenai manajemen nutrisi tanaman yang mungkin belum dikuasai oleh petani yang terbiasa dengan budi daya konvensional berbasis tanah. Pelatihan dan pendampingan teknis yang memadai menjadi kunci penting dalam mendukung keberhasilan adopsi hidroponik, khususnya bagi pelaku usaha baru yang tertarik memasuki bisnis pertanian perkotaan berbasis teknologi hidroponik ini.

Gambar 9.3 Perbandingan Empat Jenis Sistem Hidroponik Utama



Keempat sistem hidroponik tersebut menunjukkan tingkatan kompleksitas dan kebutuhan investasi yang berbeda, mulai dari sistem sumbu yang paling sederhana dan cocok bagi pemula, hingga sistem NFT yang memerlukan pengaturan kemiringan dan aliran yang presisi namun menawarkan efisiensi produksi yang lebih tinggi untuk skala komersial. Pemilihan sistem yang tepat perlu mempertimbangkan skala usaha, jenis tanaman yang dibudidayakan, serta ketersediaan modal dan pengetahuan teknis pengelola.

1. Formulasi Larutan Nutrisi untuk Berbagai Fase Pertumbuhan

Kebutuhan hara tanaman dalam sistem hidroponik bervariasi secara signifikan pada setiap fase pertumbuhan, mulai dari fase vegetatif yang memerlukan proporsi nitrogen lebih tinggi untuk mendukung pertumbuhan daun dan batang, hingga fase generatif yang memerlukan proporsi fosfor dan kalium lebih tinggi untuk mendukung pembentukan bunga, buah, atau umbi. Velazquez-Gonzalez dan kolega (2022) menekankan pentingnya penyesuaian formulasi larutan nutrisi secara dinamis mengikuti fase pertumbuhan tanaman, berbeda dengan pendekatan pemupukan tunggal yang statis sepanjang siklus produksi, guna mengoptimalkan hasil dan kualitas produk akhir yang dihasilkan dari sistem hidroponik yang dikelola secara presisi.

Pengembangan formulasi larutan nutrisi standar untuk berbagai jenis tanaman dan kondisi iklim tropis Indonesia masih memerlukan riset lebih lanjut, mengingat sebagian besar formulasi yang tersedia dan banyak digunakan saat ini dikembangkan berdasarkan riset di negara empat musim dengan kondisi iklim dan karakteristik air yang berbeda dari kondisi tropis Indonesia. Adaptasi formulasi nutrisi yang mempertimbangkan karakteristik sumber air lokal, suhu lingkungan tropis, dan varietas tanaman lokal menjadi kebutuhan penting untuk mengoptimalkan produktivitas sistem hidroponik yang dikembangkan di Indonesia secara lebih spesifik dan kontekstual.

2. Analisis Kelayakan Ekonomi Usaha Hidroponik Skala Kecil

Analisis kelayakan ekonomi usaha hidroponik skala kecil hingga menengah menunjukkan bahwa meskipun biaya investasi awal relatif lebih tinggi dibandingkan budi daya konvensional, periode pengembalian investasi dapat dicapai dalam waktu yang relatif singkat bagi komoditas bernilai ekonomi tinggi seperti sayuran daun premium dan tanaman herbal yang diminati pasar segmen menengah ke atas di kawasan perkotaan. Perhitungan kelayakan ekonomi yang cermat perlu mempertimbangkan biaya operasional berkelanjutan, termasuk biaya listrik, larutan nutrisi, dan tenaga kerja, yang secara proporsional dapat lebih tinggi dibandingkan budi daya konvensional berbasis tanah pada skala usaha yang sama.

Diversifikasi produk dan strategi pemasaran langsung ke konsumen melalui platform digital atau kemitraan dengan restoran dan hotel menjadi strategi penting bagi keberlanjutan ekonomi usaha hidroponik skala kecil, mengingat margin keuntungan yang lebih tinggi dapat diperoleh melalui penjualan langsung dibandingkan menjual melalui rantai distribusi konvensional yang panjang. Pengembangan merek dan narasi keberlanjutan yang kuat mengenai proses produksi hidroponik yang ramah lingkungan dan efisien sumber daya juga menjadi strategi pemasaran yang efektif untuk menjangkau segmen konsumen perkotaan yang semakin peduli terhadap keberlanjutan produk pangan yang mereka konsumsi.

3. Integrasi Hidroponik dengan Teknologi Otomasi dan IoT

Integrasi sistem hidroponik dengan teknologi IoT yang telah dibahas pada bab sebelumnya semakin banyak diterapkan untuk mengotomatisasi pemantauan dan penyesuaian parameter larutan nutrisi, termasuk pH, EC, dan suhu larutan, secara real-time tanpa memerlukan pengecekan manual yang intensif oleh pengelola. Sensor otomatis yang terhubung dengan sistem dosing pump memungkinkan penyesuaian konsentrasi larutan nutrisi secara otomatis ketika parameter yang terukur menyimpang dari rentang optimal yang telah ditetapkan, meningkatkan konsistensi kualitas produksi sekaligus mengurangi kebutuhan tenaga kerja untuk pemantauan manual yang harus dilakukan secara berkala sepanjang hari.

Pengembangan aplikasi seluler yang memungkinkan pengelola hidroponik memantau kondisi sistem dari jarak jauh dan menerima notifikasi otomatis ketika terjadi anomali parameter menjadi fitur yang semakin diminati oleh pelaku usaha hidroponik skala menengah, mengingat kemampuan pemantauan jarak jauh ini memberikan fleksibilitas operasional yang tinggi tanpa mengorbankan kualitas pengelolaan sistem. Investasi dalam otomasi dan IoT untuk sistem hidroponik perlu mempertimbangkan skala usaha dan nilai ekonomi komoditas yang dibudidayakan, mengingat biaya investasi teknologi otomasi mungkin belum sepenuhnya ekonomis untuk skala usaha yang sangat kecil dengan komoditas bernilai ekonomi rendah.

4. Pemanfaatan Air Limbah Olahan untuk Sistem Hidroponik

Pemanfaatan air limbah rumah tangga yang telah diolah (*greywater*) sebagai sumber air untuk sistem hidroponik menjadi inovasi menarik yang mendukung prinsip ekonomi sirkular dalam konteks perkotaan, mengurangi tekanan terhadap sumber air bersih sekaligus memberikan solusi pengelolaan air limbah yang lebih berkelanjutan dibandingkan pembuangan langsung ke saluran drainase kota. Penerapan teknologi pengolahan air limbah skala kecil yang terintegrasi dengan sistem hidroponik memerlukan perhatian cermat terhadap keamanan mikrobiologis air yang digunakan, mengingat kontaminasi patogen pada air limbah yang tidak diolah secara memadai berpotensi mencemari produk tanaman yang dikonsumsi langsung oleh manusia.

Riset mengenai efektivitas dan keamanan pemanfaatan air limbah olahan untuk hidroponik masih terus berkembang, dengan berbagai teknologi pengolahan seperti filtrasi membran dan disinfeksi ultraviolet menunjukkan potensi untuk menghasilkan kualitas air yang memadai bagi sistem hidroponik tanpa risiko kontaminasi yang membahayakan kesehatan konsumen. Pengembangan standar keamanan yang jelas mengenai pemanfaatan air limbah olahan untuk produksi pangan menjadi kebutuhan regulasi penting yang perlu dirumuskan pemerintah guna memastikan praktik ini dapat diterapkan secara aman dan bertanggung jawab dalam konteks pertanian perkotaan Indonesia.

5. Hidroponik sebagai Solusi Ketahanan Pangan pada Lahan Kritis

Kemampuan hidroponik untuk beroperasi tanpa bergantung pada kualitas tanah menjadikannya solusi yang relevan bagi wilayah dengan kondisi lahan kritis, termasuk lahan bekas tambang, lahan tercemar, maupun lahan dengan tingkat salinitas tinggi yang tidak sesuai untuk budi daya tanaman konvensional berbasis tanah. Penerapan hidroponik pada lahan-lahan marjinal semacam ini membuka peluang pemanfaatan produktif terhadap lahan yang sebelumnya terbengkalai, sekaligus berkontribusi terhadap pemulihan fungsi ekonomi wilayah yang mengalami degradasi lingkungan akibat aktivitas industri atau eksploitasi sumber daya alam yang tidak berkelanjutan pada masa lampau.

Pengembangan proyek percontohan hidroponik pada lahan kritis di berbagai wilayah Indonesia dapat memberikan pembelajaran berharga mengenai kelayakan teknis dan ekonomi pendekatan ini dalam konteks pemulihan fungsi produktif lahan terdegradasi. Kolaborasi antara pemerintah daerah, perusahaan pertambangan yang memiliki kewajiban reklamasi lahan pascatambang, dan lembaga riset pertanian dapat mempercepat pengembangan model hidroponik yang sesuai untuk pemanfaatan lahan kritis secara produktif, sekaligus memenuhi kewajiban tanggung jawab sosial dan lingkungan perusahaan terkait reklamasi lahan bekas operasi pertambangan mereka.

6. Pengembangan Varietas Tanaman Khusus untuk Hidroponik

Pengembangan varietas tanaman yang secara khusus disesuaikan dengan karakteristik sistem hidroponik menjadi arah riset pemuliaan yang semakin mendapat perhatian, mencakup sifat-sifat seperti sistem perakaran yang responsif terhadap ketersediaan oksigen tinggi, arsitektur tanaman yang kompak untuk mengoptimalkan kepadatan tanam, serta toleransi terhadap fluktuasi konsentrasi larutan nutrisi yang mungkin terjadi dalam sistem hidroponik skala kecil dengan kontrol otomatis yang belum sepenuhnya presisi. Varietas yang dikembangkan khusus untuk kondisi hidroponik dapat menghasilkan produktivitas dan kualitas yang lebih optimal dibandingkan varietas konvensional yang dikembangkan untuk kondisi budi daya berbasis tanah.

Kolaborasi antara pemulia tanaman dan praktisi hidroponik dalam mengidentifikasi karakteristik varietas yang ideal untuk sistem hidroponik tropis Indonesia menjadi peluang riset yang menjanjikan, mengingat sebagian besar varietas komersial yang digunakan saat ini masih mengandalkan impor benih yang dikembangkan untuk kondisi iklim dan preferensi pasar negara lain. Pengembangan varietas hidroponik lokal yang sesuai dengan preferensi rasa dan kondisi agroklimat Indonesia berpotensi meningkatkan daya saing produk hidroponik domestik sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap benih impor yang harganya relatif lebih mahal bagi pelaku usaha hidroponik skala kecil.

7. Hidroponik Substrat sebagai Alternatif Sistem Sirkulasi

Sistem hidroponik substrat, yang menggunakan media tanam padat seperti *rockwool, cocopeat*, atau *perlite* sebagai penopang akar sekaligus media penahan larutan nutrisi, menawarkan alternatif yang lebih toleran terhadap fluktuasi pasokan listrik dibandingkan sistem sirkulasi aktif seperti NFT yang sepenuhnya bergantung pada pompa yang beroperasi terus-menerus. Karakteristik media substrat yang mampu menahan kelembapan untuk periode waktu tertentu memberikan margin keamanan tambahan bagi tanaman apabila terjadi gangguan pasokan listrik sementara, menjadikannya pilihan yang lebih sesuai untuk wilayah dengan keandalan infrastruktur listrik yang belum sepenuhnya stabil, sebagaimana masih dijumpai di beberapa wilayah Indonesia.

Pemilihan jenis media substrat yang tepat perlu mempertimbangkan karakteristik seperti kapasitas menahan air dan udara, tingkat keasaman alami media, ketersediaan dan biaya di pasar lokal, serta kemudahan sterilisasi untuk penggunaan berulang guna mengurangi biaya operasional jangka panjang. Cocopeat yang berasal dari sabut kelapa menjadi pilihan media substrat yang menarik bagi konteks Indonesia mengingat ketersediaannya yang melimpah sebagai hasil samping industri pengolahan kelapa, sekaligus mendukung prinsip ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah pertanian lokal sebagai bahan baku media tanam hidroponik yang terjangkau dan berkelanjutan.

8. Perbandingan Biaya Produksi Hidroponik dan Konvensional

Perbandingan struktur biaya produksi antara hidroponik dan budi daya konvensional berbasis tanah menunjukkan pola yang berbeda signifikan, di mana hidroponik memerlukan proporsi biaya investasi infrastruktur dan energi yang lebih tinggi, namun dapat menghemat biaya lahan, tenaga kerja untuk pengolahan tanah, dan kehilangan hasil akibat gangguan hama tanah yang umumnya lebih rendah dibandingkan budi daya konvensional. Perhitungan total biaya kepemilikan yang komprehensif, mencakup seluruh siklus hidup investasi, diperlukan untuk membandingkan kelayakan ekonomi kedua pendekatan secara adil, mengingat perbandingan yang hanya berdasarkan biaya operasional per siklus produksi tanpa mempertimbangkan biaya investasi awal dapat menghasilkan kesimpulan yang menyesatkan bagi calon investor.

9. Hidroponik Vertikal Rumah Tangga Berbasis Material Daur Ulang

Pengembangan sistem hidroponik vertikal sederhana berbasis material daur ulang, seperti botol plastik bekas dan pipa PVC bekas, menjadi solusi kreatif yang memungkinkan masyarakat perkotaan dengan keterbatasan anggaran tetap dapat mengakses manfaat teknologi hidroponik tanpa memerlukan investasi besar pada peralatan komersial. Pendekatan ini sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular yang telah dibahas pada bab sebelumnya, mengubah sampah plastik yang menjadi permasalahan lingkungan serius di kawasan perkotaan menjadi infrastruktur produktif bagi produksi pangan skala rumah tangga yang bermanfaat langsung bagi kebutuhan keluarga.

Program pelatihan pembuatan sistem hidroponik sederhana berbasis material daur ulang yang diselenggarakan oleh pemerintah kota atau organisasi masyarakat sipil dapat menjadi instrumen edukasi ganda, mengajarkan keterampilan produksi pangan sekaligus menumbuhkan kesadaran pengelolaan sampah yang lebih baik di kalangan masyarakat perkotaan. Replikasi program semacam ini secara luas berpotensi memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan volume sampah plastik perkotaan, sekaligus memperluas akses masyarakat terhadap manfaat produksi pangan segar skala rumah tangga secara mandiri dan berkelanjutan.

10. Tantangan Fluktuasi Harga Input Hidroponik

Fluktuasi harga bahan baku pupuk hidroponik yang sebagian besar masih bergantung pada impor menjadi tantangan signifikan bagi kelayakan ekonomi usaha hidroponik di Indonesia, mengingat perubahan nilai tukar mata uang dan gangguan rantai pasok global dapat berdampak langsung terhadap biaya produksi yang harus ditanggung pelaku usaha hidroponik domestik. Pengembangan kapasitas produksi pupuk hidroponik dalam negeri, memanfaatkan bahan baku lokal yang tersedia, menjadi strategi penting untuk mengurangi kerentanan industri hidroponik nasional terhadap fluktuasi harga input impor yang sulit dikendalikan oleh pelaku usaha individual.

Hidroponik telah terbukti menjadi pintu gerbang yang paling mudah diakses bagi masyarakat perkotaan Indonesia yang ingin memulai perjalanan mereka dalam produksi pangan modern, mengingat tingkat kompleksitas yang relatif moderat dan ketersediaan sumber belajar yang semakin melimpah melalui berbagai platform digital. Keberhasilan hidroponik dalam menjangkau berbagai segmen masyarakat, mulai dari hobiis rumah tangga hingga pelaku usaha komersial skala besar, menjadikannya teknologi fondasional yang layak terus mendapat dukungan pengembangan dan diseminasi pengetahuan secara lebih luas di berbagai wilayah Indonesia.

11. Pengembangan Larutan Nutrisi Berbasis Bahan Organik Lokal

Pengembangan larutan nutrisi hidroponik berbasis bahan organik lokal, seperti ekstrak kompos cair dan limbah organik yang telah difermentasi, menjadi arah riset yang menjanjikan untuk mengurangi

ketergantungan terhadap pupuk kimia sintetis impor sekaligus mendukung prinsip pertanian organik dalam konteks hidroponik. Velazquez-Gonzalez dan kolega (2022) mencatat bahwa meskipun larutan nutrisi organik umumnya memerlukan formulasi yang lebih kompleks dan pemantauan yang lebih intensif dibandingkan larutan nutrisi sintetis konvensional, potensi manfaatnya dalam mendukung sertifikasi organik dan mengurangi biaya impor bahan baku menjadikannya arah pengembangan yang layak terus didalami oleh peneliti dan praktisi hidroponik Indonesia.

Kolaborasi antara peneliti hidroponik dengan produsen pupuk organik lokal dalam mengembangkan formulasi larutan nutrisi organik yang teruji secara ilmiah dapat mempercepat komersialisasi solusi ini bagi pelaku usaha hidroponik yang ingin beralih ke praktik yang lebih berkelanjutan. Pengujian lapangan yang ekstensif diperlukan untuk memvalidasi efektivitas dan konsistensi larutan nutrisi organik ini sebelum dapat direkomendasikan secara luas kepada pelaku usaha hidroponik komersial yang membutuhkan jaminan hasil yang konsisten untuk keberlanjutan bisnis mereka.

Hidroponik telah membuktikan diri sebagai salah satu teknologi paling matang dan siap diaplikasikan secara luas dalam ekosistem pertanian perkotaan Indonesia, dengan jejak rekam yang terus berkembang dari skala hobi rumah tangga hingga bisnis komersial berskala besar. Investasi berkelanjutan dalam riset, pengembangan sumber daya manusia, dan penguatan rantai pasok input produksi domestik akan menjadi penentu utama seberapa jauh potensi teknologi ini dapat dioptimalkan bagi ketahanan pangan perkotaan Indonesia di masa mendatang, sekaligus menjadi fondasi penting bagi pengembangan teknologi produksi pangan perkotaan yang lebih maju lainnya.

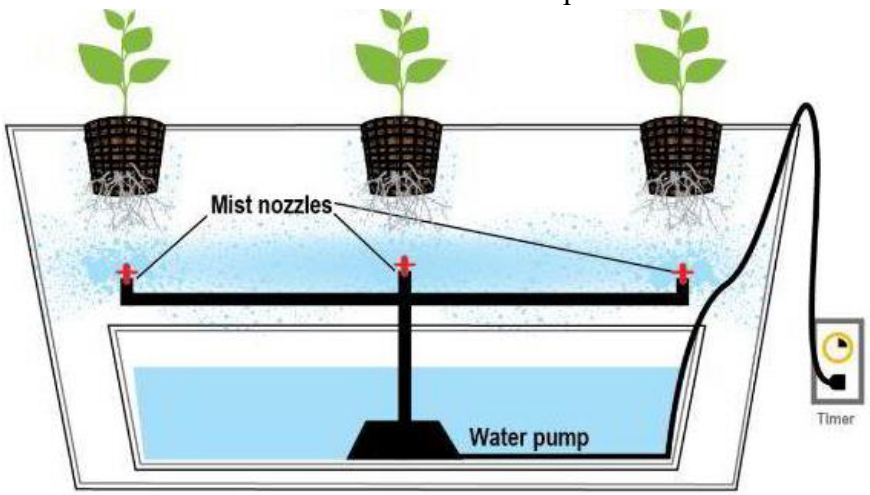
C. Aeroponik

Aeroponik merupakan teknik budi daya tanaman yang memelihara akar tanaman menggantung bebas di udara di dalam ruang tertutup dan gelap, dengan larutan nutrisi disemprotkan secara berkala dalam bentuk kabut halus (*mist*) langsung ke permukaan akar, tanpa menggunakan media tanam padat maupun genangan larutan nutrisi sebagaimana pada sistem hidroponik konvensional. Eldridge, Manzoni,

Graham, Rodgers, Farmer, dan Dodd (2020) menjelaskan bahwa pendekatan ini memaksimalkan ketersediaan oksigen bagi akar tanaman, karena akar yang menggantung bebas di udara memiliki akses oksigen yang jauh lebih optimal dibandingkan akar yang terendam dalam larutan nutrisi atau tertanam dalam media padat, sehingga berpotensi menghasilkan laju pertumbuhan tanaman yang lebih cepat dibandingkan sistem budi daya konvensional lainnya.

Mekanisme kerja sistem aeroponik melibatkan penggunaan nozel penyemprot bertekanan tinggi yang menghasilkan tetesan larutan nutrisi berukuran mikro, memungkinkan penyerapan hara yang lebih efisien oleh akar tanaman dibandingkan tetesan berukuran besar yang cenderung menggenang dan mengurangi ketersediaan oksigen di sekitar zona perakaran. Eldridge dan kolega (2020) mencatat bahwa interval dan durasi penyemprotan perlu diatur secara presisi, mengingat penyemprotan yang terlalu jarang berisiko menyebabkan akar mengalami kekeringan, sementara penyemprotan yang terlalu sering dapat mengurangi ketersediaan oksigen akibat kelembapan berlebih di sekitar zona perakaran tanaman yang dipelihara dalam sistem aeroponik tersebut.

Gambar 9.4 Sistem Aeroponik



Keunggulan aeroponik dibandingkan hidroponik konvensional mencakup penggunaan air dan nutrisi yang lebih efisien lagi, mengingat sistem ini hanya memerlukan larutan nutrisi dalam jumlah sangat kecil yang disemprotkan secara terputus-putus, dibandingkan sistem

hidroponik yang umumnya memerlukan volume larutan nutrisi yang lebih besar untuk merendam akar atau mengalir secara kontinu melalui sistem irigasi. Efisiensi penggunaan sumber daya yang tinggi ini menjadikan aeroponik sebagai pilihan yang menarik untuk aplikasi di lingkungan dengan keterbatasan sumber daya air yang ekstrem, termasuk potensi aplikasi pada penelitian pertanian luar angkasa yang memerlukan efisiensi sumber daya maksimal dalam kondisi lingkungan yang sangat terbatas.

Aplikasi komersial aeroponik saat ini masih terbatas dibandingkan hidroponik, mengingat kompleksitas teknis dan biaya investasi yang lebih tinggi, termasuk kebutuhan sistem pompa bertekanan tinggi dan nozel presisi yang memerlukan pemeliharaan rutin untuk mencegah penyumbatan akibat endapan mineral dari larutan nutrisi. Meskipun demikian, aeroponik menunjukkan potensi besar untuk aplikasi khusus seperti produksi bibit tanaman berkualitas tinggi dengan sistem perakaran yang lebih sehat dan seragam, serta produksi tanaman obat dan tanaman bernilai ekonomi tinggi yang memerlukan kondisi pertumbuhan akar yang optimal untuk menghasilkan kualitas produk premium yang diinginkan pasar.

Pengembangan aeroponik di Indonesia masih berada pada tahap awal dan terbatas pada skala penelitian dan beberapa pelaku usaha perintis, mengingat kompleksitas teknis dan kebutuhan investasi yang relatif tinggi dibandingkan hidroponik konvensional yang telah lebih dahulu berkembang dan dikenal luas oleh masyarakat. Potensi pengembangan aeroponik di Indonesia cukup menjanjikan, khususnya untuk produksi benih kentang berkualitas tinggi yang bebas penyakit, mengingat teknik ini telah terbukti efektif di berbagai negara untuk menghasilkan bibit kentang unggul dengan tingkat kesehatan dan produktivitas yang lebih baik dibandingkan metode perbanyakan konvensional menggunakan umbi bibit dari lapangan.

Tabel 9.2 Perbandingan Hidroponik dan Aeroponik

Aspek	Hidroponik	Aeroponik
Media perakaran	Larutan nutrisi/media inert	Udara terbuka dengan kabut nutrisi

Aspek	Hidroponik	Aeroponik
Efisiensi penggunaan air	Tinggi (dengan resirkulasi)	Sangat tinggi (volume nutrisi minimal)
Ketersediaan oksigen akar	Sedang, tergantung sistem	Sangat tinggi
Kompleksitas teknis	Sedang	Tinggi (memerlukan tekanan presisi)
Biaya investasi	Sedang	Tinggi
Kesesuaian skala	Rumah tangga hingga komersial besar	Riset dan produksi bibit khusus

1. Aplikasi Aeroponik dalam Produksi Bibit Berkualitas Tinggi

Produksi bibit tanaman berkualitas tinggi menjadi salah satu aplikasi paling menjanjikan dari teknologi aeroponik, mengingat kondisi perakaran yang optimal dengan ketersediaan oksigen tinggi menghasilkan sistem perakaran yang lebih sehat, seragam, dan bebas dari patogen tular tanah dibandingkan metode pembibitan konvensional. Eldridge dan kolega (2020) mencatat bahwa aeroponik telah banyak diaplikasikan secara komersial untuk produksi bibit kentang generasi awal (*pre-basic seed*) yang bebas penyakit, menghasilkan jumlah bibit per tanaman induk yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode perbanyakan konvensional menggunakan umbi bibit dari lapangan yang rentan terhadap kontaminasi patogen tular tanah.

Perluasan aplikasi aeroponik untuk produksi bibit komoditas hortikultura lain, seperti tanaman hias dan tanaman obat bernilai ekonomi tinggi, menjadi arah pengembangan yang menjanjikan bagi industri perbenihan Indonesia, mengingat kualitas bibit yang dihasilkan berpotensi memberikan nilai tambah signifikan dibandingkan bibit konvensional. Investasi dalam riset dan pengembangan fasilitas aeroponik skala menengah yang dikelola oleh lembaga riset pemerintah atau kemitraan dengan sektor swasta dapat mempercepat adopsi teknologi ini untuk mendukung penyediaan bibit unggul berkualitas tinggi bagi petani Indonesia secara lebih luas.

2. Tantangan Pemeliharaan Sistem Nozel Aeroponik

Pemeliharaan sistem nozel penyemprot menjadi tantangan operasional utama dalam pengelolaan aeroponik, mengingat nozel yang menghasilkan tetesan berukuran mikro sangat rentan mengalami penyumbatan akibat endapan mineral dari larutan nutrisi maupun pertumbuhan biofilm mikroba yang dapat menghambat aliran larutan secara optimal. Pembersihan dan kalibrasi nozel secara berkala menjadi prosedur perawatan rutin yang tidak boleh diabaikan, mengingat penyumbatan sebagian nozel dapat menyebabkan distribusi larutan nutrisi yang tidak merata dan berdampak pada pertumbuhan tanaman yang tidak seragam dalam satu unit produksi aeroponik.

Pengembangan filter air berkualitas tinggi sebelum larutan nutrisi memasuki sistem nozel menjadi langkah pencegahan penting untuk meminimalkan risiko penyumbatan, di samping pemilihan bahan baku pupuk yang memiliki kelarutan tinggi dan minim residu yang dapat mengendap dalam sistem perpipaan dan nozel. Investasi dalam sistem filtrasi dan pemeliharaan preventif yang baik pada akhirnya memberikan penghematan biaya operasional jangka panjang, mengingat penggantian nozel yang rusak akibat penyumbatan kronis memerlukan biaya yang signifikan dibandingkan biaya pemeliharaan preventif yang dilakukan secara rutin dan terjadwal.

3. Kombinasi Aeroponik dengan Sistem Pencahayaan Vertikal

Kombinasi teknologi aeroponik dengan sistem pertanian vertikal menciptakan sinergi menarik yang menggabungkan efisiensi penggunaan sumber daya aeroponik dengan optimalisasi ruang tiga dimensi *vertical farming*, berpotensi menghasilkan produktivitas per satuan luas lahan dasar yang sangat tinggi dibandingkan pendekatan tunggal masing-masing teknologi. Beberapa perusahaan teknologi pertanian mutakhir telah mengembangkan sistem hibrida aeroponik-vertikal yang menempatkan rak-rak bertingkat berisi tanaman dengan akar menggantung bebas dan disemprot larutan nutrisi secara otomatis, memaksimalkan baik dimensi ruang maupun efisiensi sumber daya dalam satu sistem produksi terintegrasi.

Kompleksitas teknis dan biaya investasi kombinasi aeroponik-vertikal yang tinggi membatasi adopsinya saat ini pada segmen pelaku usaha dengan kapasitas modal besar dan orientasi teknologi tinggi,

namun tren penurunan biaya komponen elektronik dan otomasi dari waktu ke waktu berpotensi meningkatkan aksesibilitas teknologi hibrida ini bagi pelaku usaha skala menengah di masa mendatang. Riset lebih lanjut mengenai optimalisasi desain sistem hibrida yang disesuaikan dengan kondisi iklim tropis dan struktur biaya operasional Indonesia dapat mempercepat adopsi teknologi canggih ini secara lebih luas di industri pertanian perkotaan nasional.

4. Posisi Strategis Aeroponik dalam Portofolio Teknologi Pertanian Perkotaan

Aeroponik menempati posisi strategis khusus dalam portofolio teknologi pertanian perkotaan, tidak sebagai teknologi pengganti hidroponik konvensional secara menyeluruh, melainkan sebagai solusi pelengkap untuk aplikasi spesifik yang memerlukan efisiensi sumber daya maksimal dan kualitas perakaran superior, seperti produksi bibit unggul dan riset fisiologi tanaman. Pemahaman mengenai posisi strategis ini penting bagi pelaku usaha dan pengambil kebijakan dalam mengalokasikan sumber daya investasi secara tepat sasaran, tidak menerapkan aeroponik secara serampangan pada seluruh aplikasi tanpa mempertimbangkan kesesuaian teknis dan ekonomi yang spesifik terhadap kebutuhan aplikasi tersebut.

Ke depan, penurunan biaya komponen teknis aeroponik seiring perkembangan skala ekonomi produksi global berpotensi memperluas jangkauan aplikasi komersial teknologi ini melampaui segmen khusus yang saat ini menjadi fokus utama pemanfaatannya. Investasi riset berkelanjutan dalam penyederhanaan desain sistem aeroponik yang lebih terjangkau bagi pelaku usaha skala kecil dan menengah di Indonesia menjadi arah pengembangan yang penting untuk mendemokratisasi akses terhadap teknologi canggih ini secara lebih luas di masa mendatang.

Berbagai riset komparatif mengenai efisiensi penyerapan nutrisi antara sistem aeroponik dan hidroponik menunjukkan hasil yang bervariasi tergantung jenis tanaman dan kondisi operasional spesifik, namun secara umum aeroponik menunjukkan keunggulan dalam kecepatan pertumbuhan awal akibat ketersediaan oksigen yang lebih optimal bagi akar tanaman. Eldridge dan kolega (2020) mencatat bahwa perbedaan performa antara kedua sistem cenderung lebih signifikan pada

fase awal pertumbuhan tanaman, sementara pada fase pertumbuhan lanjut perbedaan tersebut cenderung mengecil seiring tanaman mengembangkan sistem perakaran yang lebih matang dan efisien dalam menyerap hara pada kedua jenis sistem produksi tersebut.

5. Prospek Miniaturisasi Teknologi Aeroponik untuk Rumah Tangga

Tren miniaturisasi teknologi aeroponik menjadi perangkat berukuran kompak yang sesuai untuk penggunaan rumah tangga mulai bermunculan di pasar global, menawarkan pengalaman berkebun aeroponik tanpa memerlukan pengetahuan teknis mendalam mengenai pengaturan tekanan dan interval penyemprotan yang biasanya diperlukan pada sistem aeroponik komersial berskala besar. Perangkat aeroponik rumah tangga yang telah diprogram secara otomatis dan dilengkapi antarmuka yang ramah pengguna berpotensi memperluas adopsi teknologi ini melampaui segmen komersial dan riset, menjangkau konsumen rumah tangga yang tertarik mencoba teknologi produksi pangan canggih dalam skala kecil di rumah mereka masing-masing.

D. Akuaponik

Akuaponik merupakan sistem produksi pangan terintegrasi yang menggabungkan budi daya ikan (*aquaculture*) dengan budi daya tanaman secara hidroponik (*hydroponics*) dalam satu siklus tertutup, memanfaatkan limbah metabolisme ikan sebagai sumber hara bagi tanaman, sementara tanaman berfungsi sebagai filter biologis yang membersihkan air sebelum dikembalikan ke kolam ikan. Goddek, Joyce, Kotzen, dan Burnell (2019) menjelaskan bahwa keberhasilan sistem akuaponik bergantung pada keseimbangan ekosistem mikroba nitrifikasi yang mengonversi amonia hasil ekskresi ikan menjadi nitrit dan kemudian nitrat, bentuk nitrogen yang dapat diserap langsung oleh akar tanaman, menciptakan siklus hara tertutup yang meniru proses alami dalam ekosistem akuatik.

Komponen utama sistem akuaponik terdiri atas tangki pemeliharaan ikan, unit filtrasi mekanis untuk memisahkan partikel padat dari air, unit biofilter yang menjadi tempat berkembangnya bakteri

nitrifikasi, serta unit hidroponik tempat tanaman tumbuh dan menyerap hara dari air yang telah difilter. Yep dan Zheng (2019) mengulas berbagai konfigurasi desain akuaponik yang telah dikembangkan, termasuk sistem media bed yang menggunakan kerikil atau material inert lain sebagai tempat tumbuh tanaman sekaligus media biofilter, sistem NFT yang mengalirkan air kaya nutrisi melalui saluran tempat tanaman tumbuh, serta sistem rakit apung yang menempatkan tanaman mengapung di atas kolam air yang telah difilter dari limbah ikan.

Gambar 9.5 Sistem Akuaponik



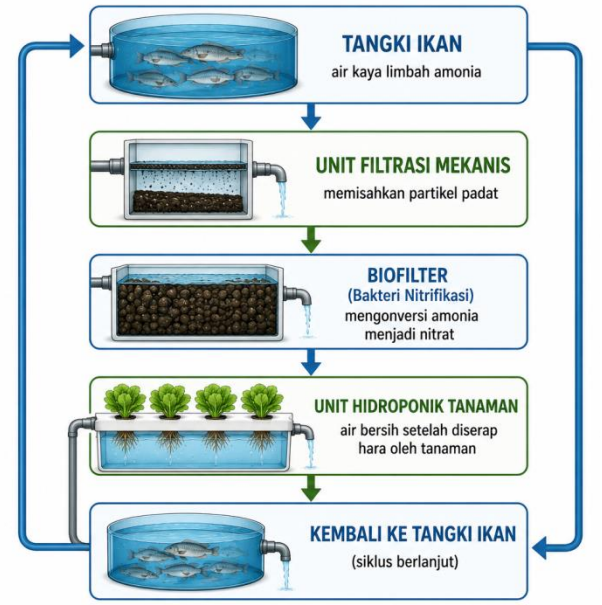
Keunggulan utama akuaponik terletak pada efisiensi penggunaan sumber daya yang sangat tinggi, mengingat sistem ini menghasilkan dua jenis produk pangan bernilai ekonomi, yaitu ikan dan sayuran, dari satu siklus produksi yang saling mendukung, tanpa memerlukan pupuk kimia sintetis untuk tanaman karena hara telah disediakan secara alami dari limbah ikan. Yep dan Zheng (2019) mencatat bahwa akuaponik menawarkan solusi elegan terhadap dua tantangan lingkungan sekaligus, yaitu pengelolaan limbah budi daya ikan yang berpotensi mencemari lingkungan apabila dibuang langsung, serta kebutuhan pupuk sintetis untuk produksi tanaman yang berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan apabila digunakan secara berlebihan dalam budi daya konvensional.

Pemilihan jenis ikan dan tanaman yang kompatibel menjadi pertimbangan penting dalam desain sistem akuaponik, dengan ikan nila

dan lele menjadi pilihan populer di Indonesia karena toleransi tinggi terhadap variasi kualitas air dan tingkat pertumbuhan yang relatif cepat, sementara sayuran daun seperti selada, kangkung, dan bayam menjadi pilihan tanaman yang umum dibudidayakan karena kebutuhan hara yang sesuai dengan konsentrasi nutrisi yang dihasilkan dari sistem akuaponik skala kecil hingga menengah, tanpa memerlukan suplementasi hara tambahan yang signifikan di luar yang disediakan oleh limbah ikan.

Tantangan operasional akuaponik meliputi kompleksitas manajemen yang memerlukan pemahaman simultan mengenai budi daya ikan dan budi daya tanaman, kebutuhan pemantauan kualitas air yang lebih ketat dibandingkan sistem hidroponik atau akuakultur yang berdiri sendiri, serta risiko kegagalan sistem yang dapat berdampak pada kedua komponen produksi sekaligus apabila terjadi gangguan pada salah satu subsistem, seperti kegagalan pompa sirkulasi atau ketidakseimbangan populasi bakteri nitrifikasi yang dapat menyebabkan akumulasi amonia beracun bagi ikan dalam waktu singkat.

Gambar 9.6 Siklus Tertutup Sistem Akuaponik



Siklus tertutup akuaponik tersebut menegaskan interdependensi antara komponen ikan, mikroba, dan tanaman yang harus dijaga keseimbangannya secara cermat. Kegagalan pada salah satu tahapan siklus, misalnya populasi bakteri nitrifikasi yang belum matang pada sistem yang baru dibangun, dapat menyebabkan akumulasi amonia yang berbahaya bagi kesehatan ikan, sehingga periode pematangan sistem

(*cycling*) menjadi tahapan penting yang tidak boleh dilewatkan sebelum sistem akuaponik dioperasikan secara penuh dengan kepadatan ikan yang tinggi.

1. Manajemen Kualitas Air dalam Sistem Akuaponik

Manajemen kualitas air merupakan aspek paling kritis dalam pengelolaan sistem akuaponik, mencakup pemantauan parameter seperti suhu, pH, kadar oksigen terlarut, konsentrasi amonia, nitrit, dan nitrat secara rutin untuk memastikan kondisi optimal bagi kelangsungan hidup ikan sekaligus ketersediaan hara yang memadai bagi pertumbuhan tanaman. Baganz, Junge, Portella, dan kolega (2022) menekankan bahwa keberhasilan sistem akuaponik sangat bergantung pada pemahaman mendalam mengenai prinsip kopling (*coupling*) antara subsistem akuakultur dan hidroponik, di mana keseimbangan rasio antara biomassa ikan dan luas area tanaman hidroponik perlu dikalkulasi secara cermat guna memastikan ketersediaan hara yang cukup bagi tanaman tanpa menyebabkan akumulasi limbah berlebih yang membahayakan kesehatan ikan.

Fluktuasi kualitas air yang signifikan, baik akibat perubahan suhu lingkungan maupun akumulasi limbah metabolisme yang melebihi kapasitas biofilter, dapat menyebabkan stres pada ikan yang berdampak pada penurunan nafsu makan dan pertumbuhan, sekaligus mengurangi ketersediaan hara bagi tanaman akibat penurunan produksi limbah dari ikan yang mengalami stres. Sistem pemantauan otomatis berbasis sensor yang terintegrasi dengan notifikasi dini menjadi investasi penting bagi pengelola akuaponik skala komersial untuk mengantisipasi dan merespons secara cepat terhadap perubahan kualitas air yang berpotensi mengganggu keseimbangan keseluruhan sistem akuaponik yang dikelola.

2. Model Bisnis dan Pemasaran Produk Akuaponik

Pengembangan model bisnis akuaponik yang berkelanjutan memerlukan strategi pemasaran yang mampu mengomunikasikan nilai tambah unik dari kedua jenis produk yang dihasilkan, yaitu ikan dan sayuran yang diproduksi secara simbiosis tanpa pupuk kimia sintetis, kepada segmen konsumen yang tepat. Yep dan Zheng (2019) mencatat bahwa narasi keberlanjutan dan efisiensi sumber daya yang melekat pada produk akuaponik dapat menjadi diferensiasi pemasaran yang kuat,

khususnya bagi konsumen perkotaan yang semakin peduli terhadap jejak lingkungan dari produk pangan yang mereka konsumsi sehari-hari.

Diversifikasi model bisnis akuaponik dapat mencakup penjualan langsung produk segar kepada konsumen, kemitraan dengan restoran yang mengutamakan bahan baku lokal dan berkelanjutan, hingga pengembangan wisata edukasi akuaponik yang memberikan pengalaman langsung bagi pengunjung mengenai proses produksi pangan berkelanjutan. Kombinasi berbagai sumber pendapatan ini penting untuk meningkatkan kelayakan ekonomi usaha akuaponik, mengingat biaya investasi dan operasional yang relatif tinggi memerlukan diversifikasi sumber pendapatan guna mempercepat periode pengembalian investasi bagi pelaku usaha akuaponik skala menengah.

3. Diversifikasi Spesies Ikan dan Tanaman dalam Akuaponik

Diversifikasi jenis ikan yang dibudidayakan dalam sistem akuaponik, melampaui pilihan konvensional seperti nila dan lele, membuka peluang pengembangan produk bernilai ekonomi lebih tinggi, seperti ikan hias tropis yang memiliki nilai jual premium atau ikan konsumsi khusus yang diminati segmen pasar tertentu. Pemilihan spesies ikan alternatif perlu mempertimbangkan kompatibilitas dengan parameter kualitas air yang dihasilkan sistem akuaponik, mengingat setiap spesies ikan memiliki toleransi yang berbeda terhadap fluktuasi suhu, pH, dan konsentrasi amonia yang perlu disesuaikan dengan karakteristik desain sistem akuaponik yang dikembangkan.

Diversifikasi jenis tanaman yang dibudidayakan turut membuka peluang peningkatan nilai ekonomi sistem akuaponik, melampaui sayuran daun konvensional menuju tanaman buah seperti tomat dan stroberi, atau tanaman herbal aromatik bernilai jual tinggi yang diminati pasar restoran dan hotel kelas atas. Pengembangan sistem akuaponik multitanaman yang mengombinasikan berbagai jenis tanaman dengan kebutuhan hara yang saling melengkapi dapat mengoptimalkan pemanfaatan hara yang dihasilkan dari limbah ikan, sekaligus menciptakan diversifikasi produk yang menarik bagi strategi pemasaran usaha akuaponik komersial.

4. Akuaponik Skala Rumah Tangga sebagai Edukasi Keberlanjutan

Pengembangan sistem akuaponik skala kecil untuk rumah tangga menawarkan peluang edukasi yang berharga mengenai prinsip keberlanjutan dan siklus ekologi, memungkinkan anggota keluarga, khususnya anak-anak, mengamati secara langsung bagaimana limbah dapat ditransformasikan menjadi sumber daya bernilai melalui proses biologis alami. Kit akuaponik skala kecil yang dirancang sederhana dan terjangkau semakin banyak tersedia di pasaran, memungkinkan masyarakat perkotaan dengan keterbatasan ruang untuk tetap dapat merasakan pengalaman produksi pangan berkelanjutan skala rumah tangga tanpa memerlukan investasi besar sebagaimana sistem akuaponik komersial.

Potensi akuaponik skala rumah tangga sebagai instrumen edukasi lingkungan menjadikannya kandidat menarik untuk diintegrasikan ke dalam program pendidikan lingkungan hidup di sekolah maupun program pemberdayaan masyarakat perkotaan yang diselenggarakan pemerintah daerah. Investasi dalam pengembangan modul edukasi dan pelatihan sederhana mengenai akuaponik skala rumah tangga dapat memperluas jangkauan manfaat edukatif teknologi ini kepada masyarakat luas, sekaligus menumbuhkan kesadaran generasi muda mengenai pentingnya pengelolaan sumber daya secara berkelanjutan dan efisien dalam kehidupan sehari-hari mereka.

5. Akuaponik Berbasis Komunitas untuk Ketahanan Pangan Lokal

Pengembangan sistem akuaponik berbasis komunitas, yang dikelola secara kolektif oleh kelompok warga atau organisasi masyarakat setempat, menawarkan model yang menjanjikan untuk memperluas manfaat teknologi ini melampaui skala usaha komersial individual, menciptakan sumber protein hewani dan nabati yang dapat diakses secara kolektif oleh anggota komunitas yang terlibat dalam pengelolaan sistem tersebut. Model akuaponik komunitas particularly relevan bagi kawasan perkotaan padat penduduk dengan keterbatasan lahan individual, memungkinkan pemanfaatan bersama satu sistem akuaponik berskala menengah yang dikelola secara bergiliran atau melalui skema pembagian hasil panen antaranggota komunitas yang berpartisipasi.

Keberhasilan model akuaponik komunitas sangat bergantung pada kejelasan mekanisme tata kelola dan pembagian tanggung jawab

pemeliharaan sistem, mengingat kompleksitas teknis akuaponik memerlukan komitmen dan konsistensi perawatan yang lebih tinggi dibandingkan kebun komunitas konvensional berbasis tanah. Pendampingan teknis yang berkelanjutan dari pemerintah daerah atau lembaga swadaya masyarakat yang berpengalaman menjadi faktor penting dalam mendukung keberhasilan jangka panjang model akuaponik komunitas, khususnya pada tahap awal pembentukan ketika anggota komunitas masih dalam proses pembelajaran mengenai kompleksitas pengelolaan sistem yang terintegrasi ini.

6. Akuaponik dan Diversifikasi Pendapatan Petani Ikan

Bagi petani ikan konvensional yang telah memiliki pengalaman dalam budi daya akuakultur, transisi menuju sistem akuaponik menawarkan peluang diversifikasi pendapatan yang menarik tanpa harus meninggalkan sepenuhnya keahlian budi daya ikan yang telah mereka kuasai selama bertahun-tahun. Penambahan komponen hidroponik pada kolam budi daya ikan yang sudah ada memungkinkan petani ikan memperoleh produk tambahan berupa sayuran tanpa memerlukan lahan tambahan yang signifikan, sekaligus meningkatkan efisiensi pemanfaatan limbah budi daya ikan yang sebelumnya mungkin dibuang begitu saja tanpa dimanfaatkan secara optimal.

Program pendampingan teknis yang menyasar petani ikan konvensional untuk beralih atau menambahkan komponen akuaponik pada usaha mereka yang sudah ada menjadi strategi diseminasi teknologi yang lebih efisien dibandingkan membangun kesadaran dari awal pada kelompok masyarakat yang belum memiliki pengalaman budi daya ikan sama sekali. Pendekatan ini memanfaatkan basis pengetahuan yang sudah dimiliki petani ikan mengenai manajemen kualitas air dan kesehatan ikan, yang menjadi fondasi penting bagi keberhasilan pengelolaan sistem akuaponik yang terintegrasi dengan komponen tanaman.

7. Akuaponik Vertikal sebagai Inovasi Hibrida Masa Depan

Kombinasi akuaponik dengan konsep pertanian vertikal menciptakan inovasi hibrida yang menjanjikan, memungkinkan optimalisasi ruang produksi tiga dimensi sekaligus mempertahankan manfaat sirkularitas hara antara komponen ikan dan tanaman yang

menjadi ciri khas akuaponik. Desain akuaponik vertikal yang menempatkan unit hidroponik bertingkat di atas tangki ikan pada lantai dasar menawarkan efisiensi pemanfaatan ruang yang signifikan, particularly relevan bagi konteks perkotaan dengan keterbatasan lahan yang parah namun tetap ingin mengoptimalkan manfaat sistem produksi terintegrasi antara komponen akuakultur dan hidroponik.

Tantangan teknis dalam pengembangan akuaponik vertikal mencakup kebutuhan sistem pompa yang mampu mengangkat air ke ketinggian tingkat atas secara efisien tanpa mengonsumsi energi berlebihan, serta desain struktur yang mampu menahan beban air dan material konstruksi secara aman pada bangunan bertingkat. Riset dan pengembangan lebih lanjut mengenai desain optimal akuaponik vertikal yang mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan keselamatan struktural bangunan menjadi kebutuhan penting bagi realisasi potensi inovasi hibrida ini secara lebih luas di kawasan perkotaan Indonesia yang padat.

Akuaponik, sebagai sistem yang menuntut pemahaman terintegrasi mengenai biologi ikan, kimia air, dan fisiologi tanaman, mencerminkan pentingnya pendekatan lintas disiplin dalam pengembangan inovasi pertanian perkotaan masa depan. Keberhasilan jangka panjang pengembangan akuaponik di Indonesia akan sangat ditentukan oleh kemampuan membangun jembatan pengetahuan antara komunitas perikanan dan pertanian yang selama ini sering kali berkembang secara terpisah, menyatukan keahlian kedua bidang tersebut dalam satu kerangka pengelolaan sistem produksi pangan yang benar-benar terintegrasi dan saling menguntungkan.

E. Vertical Farming

Pertanian vertikal (*vertical farming*) merupakan pendekatan produksi pangan yang menyusun unit budi daya tanaman secara bertingkat ke arah vertikal, memaksimalkan produktivitas per satuan luas lahan dasar dengan memanfaatkan ruang secara tiga dimensi, alih-alih hanya memanfaatkan permukaan lahan horizontal sebagaimana budi daya konvensional. Van Gerrewey, Boon, dan Geelen (2022) menjelaskan bahwa konsep pertanian vertikal modern umumnya dikombinasikan dengan sistem hidroponik atau aeroponik serta

pencahayaan buatan menggunakan lampu LED yang dapat diatur spektrum dan intensitasnya sesuai kebutuhan fotosintesis tanaman, memungkinkan produksi berlangsung sepanjang tahun tanpa bergantung pada ketersediaan sinar matahari alami maupun kondisi cuaca eksternal.

Al-Kodmany (2018) mengulas berbagai implementasi pertanian vertikal skala besar di berbagai kota metropolitan dunia, mengidentifikasi bahwa keberhasilan model bisnis pertanian vertikal sangat bergantung pada optimalisasi biaya energi untuk pencahayaan dan pengendalian iklim, mengingat komponen biaya energi dapat menjadi porsi signifikan dari total biaya operasional dibandingkan pertanian konvensional yang memanfaatkan sinar matahari dan kondisi iklim alami secara gratis. Inovasi teknologi pencahayaan LED yang semakin efisien dari segi konsumsi energi menjadi faktor kunci yang mendorong peningkatan kelayakan ekonomi pertanian vertikal dalam beberapa tahun terakhir dibandingkan periode awal pengembangan konsep ini.

Gambar 9.7 *Vertical Farming*



SharathKumar, Heuvelink, dan Marcelis (2020) menekankan pergeseran paradigma penting dalam pengembangan pertanian vertikal, dari sekadar modifikasi lingkungan tumbuh (*environmental modification*) menuju modifikasi genetik tanaman (*genetic modification*) yang secara spesifik dirancang untuk kondisi pertanian vertikal, seperti varietas dengan arsitektur kanopi kompak yang memungkinkan kepadatan tanam lebih tinggi, serta responsivitas optimal terhadap spektrum cahaya LED tertentu yang berbeda dari spektrum cahaya

matahari alami yang selama ini menjadi acuan pemuliaan tanaman konvensional.

Beacham, Vickers, dan Monaghan (2019) mengklasifikasikan berbagai pendekatan teknis pertanian vertikal berdasarkan tingkat kompleksitas infrastruktur, mulai dari sistem sederhana berupa rak bertingkat dengan pencahayaan alami dari jendela, hingga *Plant Factory with Artificial Lighting* (PFAL) yang sepenuhnya tertutup dan terkendali menggunakan pencahayaan buatan serta sistem pengendalian iklim otomatis. PFAL menawarkan kontrol lingkungan yang paling optimal namun memerlukan investasi infrastruktur dan biaya operasional energi yang paling tinggi dibandingkan pendekatan pertanian vertikal lainnya yang masih memanfaatkan sebagian sumber daya alami seperti sinar matahari.

Penerapan pertanian vertikal di Indonesia masih terbatas pada skala percontohan dan beberapa pelaku usaha perintis di kota-kota besar, mengingat tantangan biaya investasi dan operasional yang tinggi, khususnya terkait biaya listrik untuk pencahayaan dan pengendalian iklim yang relatif mahal dibandingkan negara-negara dengan subsidi energi yang lebih besar atau biaya listrik yang lebih rendah. Meskipun demikian, potensi pertanian vertikal di Indonesia cukup menjanjikan mengingat keterbatasan lahan pertanian produktif di kawasan perkotaan yang terus menyempit akibat tekanan pembangunan properti dan infrastruktur perkotaan yang semakin intensif dari waktu ke waktu.

1. Efisiensi Energi dalam Sistem Pertanian Vertikal

Efisiensi penggunaan energi menjadi determinan utama kelayakan ekonomi dan lingkungan sistem pertanian vertikal, mengingat kebutuhan energi untuk pencahayaan buatan dan pengendalian iklim dapat menyumbang porsi signifikan dari total biaya operasional. Avgoustaki dan Xydis (2020) menganalisis berbagai strategi optimalisasi konsumsi energi dalam pertanian vertikal dalam ruangan, termasuk pemanfaatan lampu LED dengan efisiensi tinggi yang dapat diatur spektrum cahayanya sesuai kebutuhan spesifik fotosintesis tanaman, serta pengaturan siklus pencahayaan yang optimal untuk memaksimalkan laju fotosintesis tanpa pemborosan energi pada periode ketika tanaman tidak lagi mampu memanfaatkan tambahan cahaya secara efektif.

Integrasi sumber energi terbarukan, seperti panel surya, dengan fasilitas pertanian vertikal menjadi strategi yang semakin dipertimbangkan untuk mengurangi ketergantungan terhadap listrik dari jaringan konvensional sekaligus menekan jejak karbon operasional. Butturini dan Marcelis (2020) mencatat bahwa optimalisasi desain bangunan fasilitas pertanian vertikal, termasuk insulasi termal yang baik untuk mengurangi kebutuhan energi pendinginan, menjadi pertimbangan arsitektural penting yang perlu diintegrasikan sejak tahap perencanaan awal pembangunan fasilitas pertanian vertikal komersial berskala besar.

2. Analisis Siklus Hidup Lingkungan Pertanian Vertikal

Penilaian siklus hidup (*life cycle assessment*) menjadi metodologi penting untuk mengevaluasi dampak lingkungan menyeluruh dari sistem pertanian vertikal, mencakup emisi karbon dari konsumsi energi, penggunaan air, serta dampak dari material konstruksi fasilitas. Martin dan Molin (2019) melakukan penilaian lingkungan terhadap sistem pertanian vertikal hidroponik perkotaan di Swedia, menemukan bahwa meskipun sistem ini menawarkan penghematan penggunaan air dan lahan yang signifikan, jejak karbon dari konsumsi energi listrik untuk pencahayaan buatan dapat menjadi lebih tinggi dibandingkan pertanian konvensional apabila sumber listrik yang digunakan masih didominasi oleh bahan bakar fosil.

Hasil penilaian siklus hidup tersebut menegaskan pentingnya mempertimbangkan bauran sumber energi listrik dalam evaluasi keberlanjutan pertanian vertikal, mengingat manfaat lingkungan dari penghematan air dan lahan dapat diimbangi atau bahkan dikalahkan oleh dampak negatif emisi karbon apabila sumber energi yang digunakan tidak berasal dari energi terbarukan. Implikasi ini menjadi pertimbangan penting bagi pengembangan pertanian vertikal di Indonesia, di mana transisi menuju bauran energi terbarukan yang lebih besar akan secara langsung meningkatkan keberlanjutan lingkungan dari sistem pertanian vertikal yang dikembangkan di berbagai kota besar Indonesia.

3. Pemilihan Komoditas Optimal untuk *Vertical Farming*

Pemilihan jenis komoditas yang tepat menjadi faktor penentu kelayakan ekonomi sistem pertanian vertikal, mengingat tidak semua jenis tanaman memberikan nilai ekonomi yang sepadan dengan

tingginya biaya investasi dan operasional sistem ini. Sayuran daun bersiklus pendek seperti selada, kangkung, dan berbagai jenis *microgreens* menjadi pilihan komoditas paling umum dibudidayakan dalam sistem pertanian vertikal komersial, mengingat siklus produksi yang singkat memungkinkan perputaran produksi yang lebih cepat, sementara nilai jual per satuan berat yang relatif tinggi membantu menutupi biaya operasional yang signifikan dari sistem pertanian vertikal yang beroperasi secara intensif menggunakan energi listrik dalam jumlah besar.

Perluasan jenis komoditas yang dibudidayakan dalam pertanian vertikal menuju tanaman bernilai ekonomi lebih tinggi, seperti tanaman obat, rempah premium, dan bunga potong tertentu, menjadi arah pengembangan yang menjanjikan untuk meningkatkan profitabilitas usaha, meskipun memerlukan riset lebih lanjut mengenai kesesuaian karakteristik pertumbuhan komoditas tersebut dengan kondisi lingkungan terkendali yang ditawarkan sistem pertanian vertikal. SharathKumar, Heuvelink, dan Marcelis (2020) menekankan pentingnya penelitian lanjutan mengenai respons berbagai komoditas terhadap kondisi lingkungan *vertical farming* yang unik, guna memperluas portofolio komoditas yang secara ekonomi layak dibudidayakan menggunakan pendekatan ini di masa mendatang.

4. Model Bisnis *Vertical Farming* Perkotaan Berbasis Kemitraan Ritel

Pengembangan model bisnis *vertical farming* yang berlokasi langsung di dalam atau berdekatan dengan gerai ritel, dikenal dengan istilah *in-store farming*, menawarkan keunggulan berupa jarak distribusi yang sangat pendek antara lokasi produksi dan titik penjualan, memaksimalkan kesegaran produk sekaligus menciptakan daya tarik pemasaran unik bagi konsumen yang dapat menyaksikan langsung proses produksi pangan yang mereka beli. Model ini semakin diminati oleh jaringan ritel modern yang ingin membedakan diri melalui penawaran produk segar dengan jaminan kesegaran maksimal, sekaligus mengurangi biaya dan kompleksitas logistik distribusi produk segar yang selama ini menjadi tantangan signifikan dalam rantai pasok ritel pangan segar konvensional.

Kemitraan antara penyedia teknologi *vertical farming* dengan jaringan ritel, restoran, dan hotel di kawasan perkotaan Indonesia membuka peluang model bisnis yang saling menguntungkan, di mana penyedia teknologi memperoleh jaminan pasar yang stabil, sementara mitra ritel memperoleh diferensiasi produk dan jaminan pasokan yang konsisten sepanjang tahun tanpa bergantung pada musim panen konvensional. Pengembangan kemitraan semacam ini memerlukan negosiasi yang cermat mengenai skema harga dan volume pasokan yang saling menguntungkan kedua belah pihak dalam jangka panjang, mengingat investasi infrastruktur *vertical farming* memerlukan kepastian pasar yang stabil untuk mencapai kelayakan ekonomi yang berkelanjutan.

5. Tantangan Regulasi dan Perizinan *Vertical Farming* di Indonesia

Kerangka regulasi dan perizinan bagi fasilitas *vertical farming* di Indonesia masih belum sepenuhnya jelas dan terstandardisasi, mengingat aktivitas ini berada pada persimpangan antara regulasi pertanian, regulasi bangunan gedung, dan regulasi kelistrikan yang masing-masing dikelola oleh instansi berbeda dengan kemungkinan tumpang tindih kewenangan atau kekosongan regulasi pada aspek tertentu yang spesifik bagi karakteristik unik fasilitas *vertical farming*. Ketidakjelasan regulasi ini berpotensi menghambat investasi pada sektor ini, mengingat calon investor memerlukan kepastian hukum mengenai persyaratan perizinan yang harus dipenuhi sebelum membangun fasilitas produksi pangan vertikal skala komersial di kawasan perkotaan.

Penyederhanaan dan harmonisasi regulasi yang mengatur fasilitas *vertical farming* menjadi kebutuhan penting yang perlu segera direspons oleh pemerintah, termasuk klasifikasi yang jelas mengenai kategori penggunaan lahan dan bangunan bagi fasilitas produksi pangan vertikal, guna memberikan kepastian hukum bagi pelaku usaha yang ingin berinvestasi pada sektor ini. Pembentukan forum koordinasi lintas instansi yang secara khusus menangani perizinan inovasi pertanian perkotaan dapat mempercepat proses harmonisasi regulasi tersebut, sekaligus menjadi wadah konsultasi bagi pelaku usaha dalam memahami persyaratan perizinan yang berlaku bagi pengembangan fasilitas *vertical farming* di berbagai kota Indonesia.

6. Pengembangan Sumber Daya Manusia untuk Industri *Vertical Farming*

Pertumbuhan industri *vertical farming* di Indonesia memerlukan dukungan pengembangan sumber daya manusia yang memiliki kompetensi multidisiplin, mencakup pengetahuan agronomi, teknik elektro dan otomasi, manajemen bisnis, serta ilmu data untuk mengelola dan menganalisis data operasional fasilitas produksi yang kompleks. Kesenjangan antara kebutuhan kompetensi industri dengan ketersediaan lulusan pendidikan tinggi yang memiliki keahlian multidisiplin tersebut menjadi tantangan yang perlu diatasi melalui pengembangan program pendidikan vokasi dan sarjana yang secara khusus dirancang untuk mempersiapkan tenaga kerja industri pertanian perkotaan berteknologi tinggi.

Kemitraan antara perusahaan *vertical farming* dengan lembaga pendidikan dalam menyediakan program magang dan pelatihan bersama dapat mempercepat pengembangan kapasitas sumber daya manusia yang dibutuhkan industri ini, sekaligus memberikan pengalaman praktis yang berharga bagi mahasiswa dan lulusan baru yang tertarik berkarier di sektor pertanian perkotaan berbasis teknologi tinggi. Investasi dalam pengembangan sumber daya manusia ini menjadi salah satu faktor kunci yang akan menentukan kecepatan pertumbuhan dan daya saing industri *vertical farming* Indonesia dibandingkan negara-negara lain yang telah lebih dahulu mengembangkan ekosistem industri ini secara lebih matang.

7. Estetika dan Fungsi Sosial *Vertical Farming* Perkotaan

Selain fungsi produksi pangan, fasilitas *vertical farming* yang dirancang dengan mempertimbangkan aspek estetika dapat memberikan kontribusi terhadap keindahan visual lanskap perkotaan, menciptakan elemen hijau yang menyegarkan di tengah dominasi struktur beton dan kaca yang lazim dijumpai pada kawasan perkotaan padat. Beberapa fasilitas *vertical farming* yang dirancang secara terbuka dan dapat diakses publik bahkan berfungsi ganda sebagai ruang publik dan destinasi wisata edukasi, menggabungkan fungsi produksi pangan dengan fungsi sosial dan rekreasi bagi warga kota yang ingin belajar mengenai teknologi pertanian modern secara langsung.

Integrasi *vertical farming* ke dalam desain bangunan publik, seperti perpustakaan, pusat komunitas, atau ruang terbuka hijau kota, membuka peluang menciptakan ruang multifungsi yang mengoptimalkan pemanfaatan lahan perkotaan yang terbatas sekaligus memberikan manfaat edukatif dan rekreatif bagi masyarakat. Pendekatan desain yang mengintegrasikan fungsi produksi pangan dengan fungsi sosial ini mencerminkan visi pengembangan kota yang lebih holistik, di mana infrastruktur pangan tidak lagi dipandang sebagai fasilitas tersembunyi, melainkan sebagai bagian integral dari identitas dan kehidupan sosial kota yang dapat dinikmati dan dipelajari oleh seluruh warga.

8. *Vertical farming* sebagai Simbol Transformasi Pangan Perkotaan

Vertical farming, dengan segala kompleksitas teknis dan tantangan ekonominya, telah menjadi simbol yang merepresentasikan transformasi mendasar dalam cara manusia memandang dan memproduksi pangan di tengah keterbatasan ruang perkotaan yang semakin nyata. Meskipun perjalanan menuju adopsi yang meluas masih panjang, terutama dalam konteks Indonesia yang menghadapi tantangan biaya energi dan investasi, potensi jangka panjang teknologi ini dalam mendukung ketahanan pangan perkotaan tetap menjadikannya arah pengembangan yang layak terus mendapat dukungan riset, kebijakan, dan investasi dari berbagai pemangku kepentingan yang peduli terhadap masa depan sistem pangan perkotaan yang berkelanjutan.

Perjalanan pengembangan *vertical farming* di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan struktural, termasuk biaya energi dan investasi yang tinggi, namun potensi jangka panjangnya dalam mengoptimalkan keterbatasan lahan perkotaan menjadikannya arah pengembangan yang layak terus mendapat dukungan riset dan kebijakan. Harapan besar diletakkan pada inovasi teknologi yang terus berkembang dan penurunan biaya dari waktu ke waktu untuk meningkatkan kelayakan ekonomi *vertical farming* secara lebih luas di berbagai kota Indonesia pada masa mendatang.

F. Controlled Environment Agriculture

Controlled Environment Agriculture (CEA) merupakan pendekatan produksi pangan yang lebih luas dibandingkan pertanian vertikal semata, mencakup seluruh sistem budi daya yang mengendalikan variabel lingkungan tumbuh tanaman secara aktif, termasuk suhu, kelembapan, konsentrasi karbon dioksida, intensitas dan spektrum cahaya, serta ketersediaan hara, guna menciptakan kondisi pertumbuhan yang optimal terlepas dari kondisi cuaca dan iklim eksternal yang berlangsung di luar fasilitas produksi. Kozai dan Niu (2020) menjelaskan bahwa CEA mencakup berbagai skala dan tingkat kompleksitas, mulai dari rumah kaca sederhana dengan ventilasi alami hingga fasilitas produksi tertutup penuh dengan kontrol iklim otomatis yang canggih seperti PFAL.

Keunggulan mendasar CEA terletak pada kemampuannya menghasilkan produktivitas yang konsisten dan dapat diprediksi sepanjang tahun, tanpa terpengaruh oleh variabilitas cuaca musiman atau kejadian cuaca ekstrem yang semakin sering terjadi akibat perubahan iklim global. Kemampuan mengendalikan lingkungan tumbuh secara presisi juga memungkinkan optimalisasi kualitas nutrisi dan karakteristik organoleptik produk, seperti kandungan vitamin, rasa, dan tekstur, yang dapat disesuaikan dengan preferensi pasar melalui pengaturan parameter lingkungan tumbuh yang spesifik selama siklus produksi tanaman berlangsung di dalam fasilitas CEA.

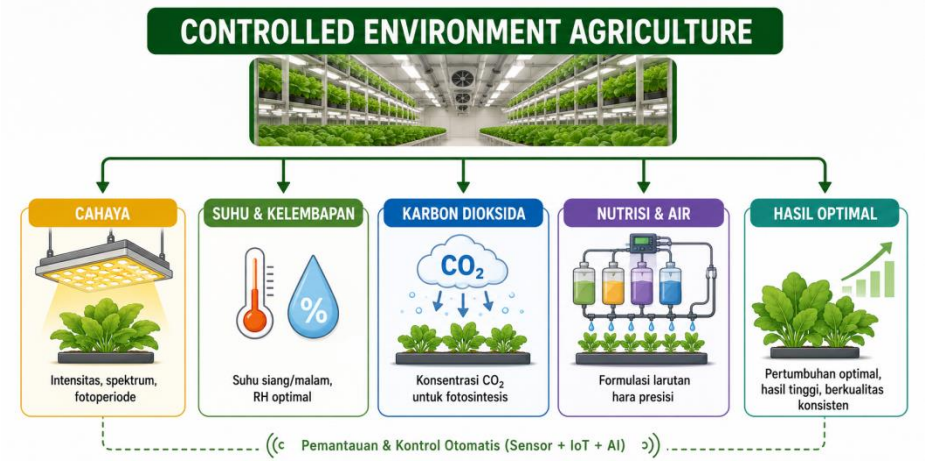
Integrasi teknologi sensor dan kecerdasan buatan dalam sistem CEA modern memungkinkan optimalisasi otomatis berbagai parameter lingkungan berdasarkan data real-time mengenai kondisi tanaman dan lingkungan tumbuh, menciptakan sistem yang mampu belajar dan menyesuaikan diri secara adaptif guna memaksimalkan hasil dan efisiensi penggunaan sumber daya. Pendekatan berbasis data ini sejalan dengan konsep pertanian presisi yang telah dibahas pada bab-bab sebelumnya, menunjukkan konvergensi antara berbagai inovasi teknologi pertanian modern dalam mendukung sistem produksi pangan yang lebih efisien dan berkelanjutan secara keseluruhan.

Kozai (2019) menekankan pentingnya optimalisasi resep lingkungan (*environmental recipe*) yang spesifik untuk setiap jenis tanaman dalam sistem CEA, mencakup kombinasi optimal antara

intensitas cahaya, fotoperiode, suhu siang dan malam, konsentrasi karbon dioksida, serta kecepatan aliran udara, yang secara kolektif memengaruhi laju fotosintesis, morfologi tanaman, dan kualitas hasil akhir yang diperoleh. Pengembangan resep lingkungan yang optimal memerlukan riset ekstensif dan data empiris yang mendalam mengenai respons fisiologis setiap jenis tanaman terhadap berbagai kombinasi parameter lingkungan, mengingat setiap spesies dan bahkan varietas tanaman dapat menunjukkan respons yang berbeda terhadap kondisi lingkungan yang sama.

Tantangan utama pengembangan CEA di Indonesia meliputi biaya investasi infrastruktur dan operasional energi yang tinggi, terutama untuk sistem pendinginan yang diperlukan mengingat suhu tropis Indonesia yang cenderung tinggi sepanjang tahun, berbeda dengan aplikasi CEA di negara empat musim yang lebih memerlukan sistem pemanasan pada musim dingin. Adaptasi teknologi CEA yang sesuai dengan kondisi iklim tropis Indonesia, termasuk optimalisasi sistem pendinginan evaporatif yang lebih hemat energi dibandingkan sistem pendingin udara konvensional, menjadi arah pengembangan penting untuk meningkatkan kelayakan ekonomi penerapan CEA di Indonesia secara lebih luas.

Gambar 9.8 Variabel Lingkungan yang Dikendalikan dalam Sistem CEA



Gambar tersebut menggambarkan bahwa CEA melibatkan pengendalian simultan berbagai variabel lingkungan yang saling berinteraksi memengaruhi pertumbuhan tanaman. Optimalisasi salah

satu variabel tanpa mempertimbangkan interaksinya dengan variabel lain berpotensi menghasilkan kondisi pertumbuhan yang suboptimal, sehingga pendekatan holistik yang mempertimbangkan interaksi kompleks antarvariabel lingkungan menjadi kunci keberhasilan pengelolaan sistem CEA secara menyeluruh.

1. Perbandingan Efisiensi Sumber Daya Rumah Kaca dan *Plant Factory*

Perbandingan efisiensi penggunaan sumber daya antara rumah kaca konvensional yang memanfaatkan cahaya matahari alami dengan *plant factory* yang sepenuhnya mengandalkan pencahayaan buatan menunjukkan trade-off yang perlu dipertimbangkan secara cermat oleh pelaku usaha CEA. Graamans, Baeza, van den Dobbelsteen, Tsafaras, dan Stanghellini (2018) menemukan bahwa rumah kaca umumnya lebih efisien dalam penggunaan energi karena memanfaatkan cahaya matahari gratis, namun plant factory menawarkan kontrol lingkungan yang jauh lebih presisi dan tidak bergantung pada lokasi geografis maupun musim, memungkinkan produksi yang konsisten sepanjang tahun terlepas dari kondisi iklim eksternal yang dapat sangat bervariasi antarwilayah dan antarmusim.

Pemilihan antara pendekatan rumah kaca dan plant factory perlu mempertimbangkan konteks lokasi geografis, ketersediaan lahan, biaya energi, serta karakteristik komoditas yang akan dibudidayakan. Wilayah dengan intensitas cahaya matahari tinggi sepanjang tahun, seperti kondisi tropis Indonesia, cenderung lebih diuntungkan oleh pendekatan rumah kaca atau CEA semi-terkendali yang tetap memanfaatkan cahaya matahari alami, dibandingkan investasi penuh pada plant factory yang memerlukan biaya energi pencahayaan buatan yang signifikan dan mungkin kurang kompetitif secara ekonomi dibandingkan pemanfaatan sumber cahaya alami yang melimpah di wilayah tropis.

2. Adaptasi CEA untuk Kondisi Iklim Tropis Lembap

Pengembangan CEA di wilayah tropis lembap seperti Indonesia menghadapi tantangan teknis yang berbeda dibandingkan aplikasi di wilayah subtropis atau empat musim, terutama terkait kebutuhan pengendalian kelembapan berlebih yang dapat memicu perkembangan penyakit jamur dan mendorong kebutuhan ventilasi serta dehumidifikasi yang lebih intensif. Adaptasi desain fasilitas CEA untuk kondisi tropis

perlu mempertimbangkan sistem ventilasi yang optimal, penggunaan material atap dan dinding yang dapat mengurangi akumulasi panas, serta sistem pendinginan evaporatif yang lebih hemat energi dibandingkan sistem pendingin udara konvensional yang memerlukan konsumsi listrik lebih besar.

Riset mengenai desain CEA yang dioptimalkan untuk kondisi tropis Indonesia masih tergolong terbatas, mengingat sebagian besar riset dan teknologi CEA yang tersedia dikembangkan untuk konteks iklim negara empat musim dengan tantangan utama berupa suhu dingin dan intensitas cahaya matahari yang rendah pada musim tertentu, berbeda dengan tantangan utama di Indonesia yang lebih terkait dengan suhu tinggi dan kelembapan berlebih sepanjang tahun. Investasi riset lokal untuk mengembangkan solusi CEA yang sesuai dengan karakteristik iklim tropis Indonesia menjadi kebutuhan strategis untuk meningkatkan kelayakan ekonomi dan teknis penerapan CEA secara lebih luas di berbagai kota Indonesia.

3. Optimalisasi Spektrum Cahaya LED untuk Berbagai Fase Pertumbuhan

Optimalisasi spektrum cahaya LED menjadi salah satu area riset paling aktif dalam pengembangan CEA, mengingat setiap panjang gelombang cahaya memberikan efek fisiologis yang berbeda terhadap tanaman, seperti cahaya biru yang mendukung pertumbuhan vegetatif kompak dan cahaya merah yang mendukung perpanjangan batang dan pembungaan. Kozai (2019) menjelaskan bahwa kemampuan mengatur rasio spektrum cahaya secara dinamis sepanjang siklus pertumbuhan tanaman, disesuaikan dengan kebutuhan fisiologis pada setiap fase, menjadi keunggulan signifikan CEA dibandingkan budi daya konvensional yang bergantung pada spektrum cahaya matahari alami yang tidak dapat dimodifikasi sesuai kebutuhan spesifik tanaman pada setiap tahapan pertumbuhannya.

Pengembangan resep pencahayaan (*light recipe*) yang optimal untuk berbagai komoditas tropis Indonesia masih memerlukan riset lebih lanjut, mengingat sebagian besar penelitian mengenai spektrum cahaya optimal telah dilakukan untuk komoditas yang umum dibudidayakan di negara empat musim. Kolaborasi antara produsen LED hortikultura dengan lembaga riset pertanian Indonesia dalam mengembangkan resep

pencahayaan yang dioptimalkan untuk komoditas tropis lokal, seperti berbagai jenis sayuran indigenous dan tanaman obat tradisional, menjadi peluang riset yang dapat meningkatkan daya saing dan keunikan produk CEA Indonesia di pasar domestik maupun internasional.

4. Pengendalian Hama dan Penyakit dalam Sistem CEA

Meskipun sistem CEA menawarkan lingkungan yang lebih terisolasi dari sumber hama dan penyakit eksternal dibandingkan budi daya lapangan konvensional, risiko kontaminasi tetap dapat terjadi melalui berbagai jalur, termasuk bibit yang terkontaminasi, personel yang keluar masuk fasilitas, maupun sistem ventilasi yang tidak sepenuhnya steril. Sekali suatu patogen atau hama berhasil masuk ke dalam fasilitas CEA yang tertutup, penyebarannya dapat berlangsung sangat cepat akibat kondisi lingkungan yang seragam dan kepadatan tanaman yang tinggi, sehingga protokol biosekuriti yang ketat menjadi elemen manajemen risiko yang sangat penting dalam operasional fasilitas CEA komersial.

Penerapan protokol biosekuriti dalam fasilitas CEA mencakup prosedur dekontaminasi bagi personel dan peralatan yang memasuki area produksi, karantina bibit sebelum ditanam pada area produksi utama, serta pemantauan rutin menggunakan perangkap dan inspeksi visual untuk deteksi dini keberadaan hama atau gejala penyakit. Pendekatan pengendalian hayati menggunakan predator alami atau agen biopestisida yang telah dibahas pada bab sebelumnya juga dapat diadaptasi untuk konteks CEA, meskipun memerlukan penyesuaian khusus mengingat kondisi lingkungan terkendali yang berbeda signifikan dari kondisi lapangan terbuka tempat agen pengendalian hayati tersebut biasa diaplikasikan secara konvensional.

5. Investasi dan Model Bisnis *Plant Factory* di Indonesia

Investasi pada fasilitas *plant factory* skala komersial di Indonesia memerlukan analisis kelayakan yang cermat mengingat biaya investasi awal yang sangat tinggi dibandingkan bentuk pertanian perkotaan lainnya, sehingga model bisnis perlu dirancang dengan target pasar yang jelas pada segmen premium yang bersedia membayar harga lebih tinggi untuk produk dengan jaminan kualitas, keamanan, dan konsistensi pasokan yang unggul. Kozai dan Niu (2020) mencatat bahwa

keberhasilan bisnis plant factory di berbagai negara umumnya ditopang oleh kemitraan strategis dengan segmen pasar khusus, seperti rumah sakit yang memerlukan sayuran dengan jaminan keamanan mikrobiologis tinggi bagi pasien dengan sistem imun lemah, atau restoran kelas atas yang mengutamakan kualitas dan konsistensi produk sepanjang tahun.

Pengembangan model bisnis plant factory di Indonesia perlu mempertimbangkan strategi diferensiasi yang jelas untuk membenarkan struktur biaya operasional yang lebih tinggi dibandingkan produk sayuran konvensional, termasuk sertifikasi keamanan pangan khusus, jaminan bebas pestisida sepenuhnya, atau kandungan nutrisi yang dioptimalkan melalui pengendalian lingkungan tumbuh secara presisi. Tanpa diferensiasi nilai yang jelas dan dikomunikasikan secara efektif kepada konsumen target, investasi besar pada teknologi plant factory berisiko tidak memperoleh pengembalian investasi yang memadai mengingat harga jual produk perlu mencerminkan struktur biaya produksi yang signifikan lebih tinggi dibandingkan alternatif produk konvensional yang tersedia di pasaran.

6. Skema Insentif Energi Terbarukan bagi Fasilitas CEA

Mengingat signifikannya komponen biaya energi dalam operasional CEA, pengembangan skema insentif yang mendorong pemanfaatan energi terbarukan bagi fasilitas CEA menjadi instrumen kebijakan penting yang dapat meningkatkan kelayakan ekonomi sekaligus keberlanjutan lingkungan sektor ini. Insentif tarif khusus untuk fasilitas CEA yang menggunakan sumber energi terbarukan, kemudahan perizinan instalasi panel surya atap, atau skema pembiayaan khusus untuk investasi infrastruktur energi bersih dapat mendorong transisi industri CEA Indonesia menuju operasional yang lebih rendah emisi karbon dibandingkan mengandalkan sepenuhnya listrik dari jaringan konvensional yang masih didominasi pembangkit berbahan bakar fosil.

Pengembangan model bisnis CEA yang terintegrasi dengan pembangkit energi terbarukan skala kecil, seperti kombinasi fasilitas produksi dengan instalasi panel surya atap yang mencukupi kebutuhan energi operasional secara mandiri, menjadi arah pengembangan yang semakin dipertimbangkan pelaku usaha CEA yang berorientasi keberlanjutan jangka panjang. Studi kelayakan mengenai kombinasi

optimal antara kapasitas produksi CEA dengan kapasitas pembangkit energi terbarukan yang dibutuhkan menjadi pertimbangan teknis penting dalam perencanaan investasi fasilitas CEA yang berkelanjutan secara ekonomi dan lingkungan di Indonesia.

7. Standardisasi Kualitas Produk CEA untuk Pasar Premium

Pengembangan standar kualitas khusus bagi produk yang dihasilkan dari sistem CEA menjadi kebutuhan penting untuk membangun kepercayaan pasar premium yang menjadi target utama produk-produk ini, mencakup parameter seperti konsistensi ukuran, kandungan nutrisi, serta jaminan bebas residu pestisida yang dapat diverifikasi melalui pengujian laboratorium independen. Sertifikasi kualitas yang kredibel dan diakui secara luas menjadi instrumen penting bagi produsen CEA dalam mengomunikasikan nilai tambah produk mereka kepada konsumen yang bersedia membayar harga premium, sekaligus membedakan produk mereka dari produk konvensional yang mungkin tidak memiliki jaminan kualitas yang setara.

8. CEA untuk Produksi Tanaman Obat dan Farmasi

Aplikasi CEA untuk produksi tanaman obat dan bahan baku farmasi menawarkan peluang bernilai ekonomi tinggi, mengingat kontrol lingkungan yang presisi memungkinkan optimalisasi kandungan senyawa aktif farmakologis yang menjadi nilai utama tanaman obat, berbeda dengan tanaman pangan yang lebih mengutamakan hasil panen dalam bentuk biomassa. Konsistensi kandungan senyawa aktif yang dihasilkan melalui CEA menjadi keunggulan penting bagi industri farmasi dan nutrasetikal yang menuntut standar kualitas bahan baku yang tinggi dan konsisten antarbatch produksi, berbeda dengan variabilitas kandungan senyawa aktif yang lazim terjadi pada tanaman obat yang dibudidayakan secara konvensional di lapangan terbuka dengan kondisi lingkungan yang bervariasi.

Pengembangan CEA untuk tanaman obat asli Indonesia yang memiliki nilai farmakologis tinggi, seperti berbagai jenis tanaman dari kekayaan biodiversitas nusantara, membuka peluang hilirisasi industri jamu dan obat tradisional Indonesia menuju standar kualitas yang lebih tinggi dan dapat bersaing di pasar internasional. Kolaborasi antara

industri farmasi, lembaga riset, dan pengembang teknologi CEA menjadi kunci penting untuk mewujudkan potensi ini secara optimal, mengingat diperlukan riset mendalam mengenai kondisi lingkungan optimal bagi setiap jenis tanaman obat yang akan dibudidayakan menggunakan pendekatan CEA.

9. CEA dan Ketahanan terhadap Kegagalan Panen Akibat Anomali Cuaca

Meningkatnya frekuensi anomali cuaca ekstrem akibat perubahan iklim, termasuk kekeringan berkepanjangan dan curah hujan yang tidak menentu, menjadikan CEA sebagai instrumen strategis dalam membangun ketahanan produksi pangan yang tidak lagi bergantung sepenuhnya pada kondisi cuaca eksternal yang semakin sulit diprediksi. Kapasitas CEA untuk menjamin kontinuitas produksi terlepas dari kondisi cuaca ekstrem menjadikannya komponen penting dalam strategi diversifikasi sistem pangan nasional yang lebih tangguh terhadap guncangan iklim yang semakin sering terjadi di berbagai wilayah Indonesia dalam beberapa tahun terakhir.

Investasi dalam CEA sebagai bagian dari strategi adaptasi perubahan iklim sektor pertanian perlu dipertimbangkan secara serius oleh pemerintah, khususnya untuk komoditas strategis yang rentan terhadap fluktuasi harga akibat gangguan produksi akibat cuaca ekstrem. Diversifikasi sumber produksi antara pertanian konvensional yang rentan cuaca dengan CEA yang lebih tahan terhadap gangguan iklim eksternal dapat menjadi strategi mitigasi risiko yang efektif bagi stabilitas pasokan dan harga pangan nasional dalam menghadapi ketidakpastian iklim yang semakin meningkat di masa mendatang.

G. Peluang Ketahanan Pangan Perkotaan

Konvergensi berbagai inovasi produksi pangan perkotaan yang telah dibahas, mulai dari *urban farming*, hidroponik, aeroponik, akuaponik, *vertical farming*, hingga CEA, membuka peluang strategis bagi penguatan ketahanan pangan perkotaan yang selama ini sangat bergantung pada pasokan dari wilayah pedesaan yang jauh dan rentan terhadap gangguan rantai pasok. Langemeyer, Madrid-Lopez, Beltran, dan Mendez (2021) menegaskan bahwa diversifikasi sumber pangan melalui produksi lokal perkotaan berkontribusi terhadap peningkatan

resiliensi sistem pangan kota secara keseluruhan, mengurangi kerentanan terhadap gangguan eksternal seperti bencana alam, konflik, atau krisis kesehatan global yang dapat mengganggu kelancaran distribusi pangan dari wilayah produksi konvensional ke pusat-pusat konsumsi perkotaan.

Pengurangan jarak tempuh distribusi pangan (*food miles*) yang dihasilkan dari produksi pangan perkotaan berkontribusi signifikan terhadap penurunan emisi karbon dari sektor transportasi pangan, sekaligus mengurangi kehilangan pangan pascapanen yang umumnya terjadi akibat waktu tempuh distribusi yang panjang dari wilayah produksi ke pusat konsumsi. Produk pangan yang dipanen dan dikonsumsi dalam waktu dekat dari lokasi produksi umumnya memiliki kualitas nutrisi dan kesegaran yang lebih baik dibandingkan produk yang harus menempuh perjalanan jauh dan waktu penyimpanan yang lama sebelum sampai ke tangan konsumen akhir di kawasan perkotaan.

Integrasi produksi pangan perkotaan ke dalam perencanaan tata ruang kota menjadi strategi penting yang perlu dipertimbangkan pemerintah daerah, termasuk alokasi ruang khusus untuk pertanian perkotaan dalam rencana induk pembangunan kota, insentif bagi pengembang properti yang mengintegrasikan fasilitas pertanian perkotaan dalam desain bangunan mereka, serta dukungan infrastruktur seperti akses air dan listrik yang memadai bagi kegiatan produksi pangan perkotaan yang membutuhkan sumber daya tersebut secara konsisten sepanjang siklus produksi.

Siegner, Sowerwine, dan Acey (2018) mengingatkan bahwa meskipun pertanian perkotaan menawarkan potensi besar bagi ketahanan pangan, kontribusinya terhadap pemenuhan kebutuhan kalori total penduduk perkotaan masih relatif terbatas dibandingkan pasokan dari sistem pangan konvensional, sehingga pertanian perkotaan sebaiknya dipandang sebagai komplemen yang memperkuat, bukan pengganti sepenuhnya, sistem pangan pedesaan-perkotaan yang telah mapan. Pandangan yang realistis mengenai peran dan keterbatasan pertanian perkotaan penting untuk menghindari ekspektasi berlebihan yang dapat mengalihkan perhatian dari kebutuhan investasi berkelanjutan pada sistem pertanian pedesaan konvensional yang tetap menjadi tulang punggung utama pemenuhan kebutuhan pangan nasional.

Potensi integrasi teknologi produksi pangan perkotaan dengan prinsip ekonomi sirkular yang telah dibahas pada bab sebelumnya turut membuka peluang menarik, seperti pemanfaatan limbah organik perkotaan sebagai sumber nutrisi bagi sistem hidroponik atau akuaponik, serta pemanfaatan air hujan dan air daur ulang untuk memenuhi kebutuhan air sistem produksi pangan perkotaan, menciptakan sinergi antara pengelolaan limbah kota dan produksi pangan yang saling menguntungkan dan mendukung keberlanjutan lingkungan perkotaan secara menyeluruh dalam jangka panjang.

Ke depan, pengembangan ekosistem inovasi pertanian perkotaan yang melibatkan kolaborasi antara pemerintah kota, akademisi, sektor swasta, dan komunitas masyarakat menjadi kunci penting bagi terwujudnya potensi penuh pertanian perkotaan sebagai pilar ketahanan pangan masa depan. Investasi dalam riset dan pengembangan teknologi yang disesuaikan dengan kondisi iklim tropis dan karakteristik perkotaan Indonesia, dukungan kebijakan yang kondusif, serta penguatan kapasitas sumber daya manusia menjadi elemen penting yang perlu terus diperkuat untuk mengoptimalkan kontribusi pertanian perkotaan terhadap ketahanan pangan nasional Indonesia di masa mendatang.

Tabel 9.3 Kontribusi Berbagai Teknologi Pertanian Perkotaan terhadap Dimensi Ketahanan Pangan

Dimensi Ketahanan Pangan	**Kontribusi Teknologi Perkotaan**
Ketersediaan (*Availability*)	Peningkatan pasokan pangan segar lokal sepanjang tahun tanpa bergantung musim
Akses (*Access*)	Pengurangan jarak dan biaya distribusi, harga lebih stabil bagi konsumen perkotaan
Pemanfaatan (Utilization)	Produk lebih segar dengan kandungan nutrisi lebih terjaga karena waktu distribusi singkat
Stabilitas (*Stability*)	Diversifikasi sumber pasokan mengurangi kerentanan terhadap gangguan rantai pasok eksternal

Kerangka empat dimensi ketahanan pangan tersebut menunjukkan bahwa teknologi pertanian perkotaan memberikan kontribusi yang saling melengkapi terhadap seluruh aspek ketahanan pangan, tidak hanya terbatas pada peningkatan volume produksi semata. Pemahaman terhadap kontribusi multidimensi ini penting bagi perumus kebijakan dalam merancang strategi pengembangan pertanian perkotaan yang komprehensif dan berdampak luas bagi ketahanan pangan kota secara keseluruhan.

1. Pengembangan *Urban Farming* sebagai Sumber Produksi Pangan Lokal

Urban farming atau pertanian perkotaan menjadi salah satu peluang strategis untuk memperkuat ketahanan pangan di wilayah perkotaan yang memiliki keterbatasan lahan. Pemanfaatan pekarangan, atap bangunan (*rooftop farming*), dinding hijau (*vertical farming*), hingga lahan tidur dapat meningkatkan produksi sayuran, buah-buahan, dan tanaman pangan skala rumah tangga maupun komunitas. Dengan memanfaatkan ruang yang tersedia secara optimal, masyarakat perkotaan dapat menghasilkan pangan segar yang mudah diakses sekaligus mengurangi ketergantungan pada pasokan dari luar daerah.

Selain meningkatkan ketersediaan pangan, *urban farming* juga memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan. Produksi pangan yang lebih dekat dengan konsumen dapat menekan biaya distribusi, mengurangi kehilangan hasil selama transportasi, serta menurunkan emisi karbon akibat rantai pasok yang lebih pendek. Di sisi lain, keberadaan ruang hijau produktif mampu meningkatkan kualitas lingkungan perkotaan melalui penyerapan karbon, pengurangan suhu udara, serta peningkatan keanekaragaman hayati di kawasan urban.

2. Pemanfaatan Teknologi Pertanian Modern di Wilayah Perkotaan

Keterbatasan lahan di perkotaan mendorong berkembangnya berbagai inovasi teknologi pertanian, seperti hidroponik, akuaponik, aeroponik, *controlled environment agriculture* (CEA), dan *vertical farming*. Teknologi tersebut memungkinkan produksi pangan dilakukan secara intensif pada lahan sempit dengan penggunaan air, nutrisi, dan energi yang lebih efisien dibandingkan sistem budidaya konvensional.

Selain itu, pemanfaatan sensor, *Internet of Things* (IoT), dan sistem otomatisasi membantu petani mengendalikan kondisi lingkungan tumbuh secara presisi sehingga produktivitas dan kualitas hasil panen dapat ditingkatkan.

Perkembangan teknologi digital juga membuka peluang penerapan pertanian cerdas (*smart farming*) di kawasan perkotaan. Sistem pemantauan berbasis aplikasi, analisis data, serta kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*/AI) dapat membantu mengoptimalkan penggunaan sumber daya sekaligus mengurangi risiko kegagalan produksi. Dengan demikian, teknologi menjadi faktor penting dalam mendukung keberlanjutan produksi pangan di lingkungan urban yang memiliki keterbatasan ruang dan sumber daya.

3. Penguatan Ekonomi Lokal dan Kemandirian Pangan Masyarakat

Ketahanan pangan perkotaan tidak hanya berkaitan dengan produksi pangan, tetapi juga dengan kemampuan masyarakat dalam memperoleh pangan yang cukup, aman, dan bergizi. Pengembangan pertanian perkotaan mampu menciptakan peluang usaha baru, meningkatkan pendapatan rumah tangga, serta mendorong tumbuhnya usaha mikro di bidang produksi, pengolahan, dan pemasaran hasil pertanian. Kegiatan ini juga memperkuat ekonomi lokal melalui terbentuknya rantai pasok pangan yang lebih pendek dan efisien.

Selain memberikan manfaat ekonomi, pertanian perkotaan meningkatkan kemandirian masyarakat dalam memenuhi sebagian kebutuhan pangan sehari-hari. Rumah tangga maupun komunitas dapat memproduksi sayuran dan tanaman pangan sendiri sehingga mengurangi ketergantungan terhadap fluktuasi harga dan gangguan pasokan. Kondisi tersebut menjadi semakin penting ketika terjadi krisis ekonomi, bencana alam, atau gangguan distribusi pangan yang dapat memengaruhi stabilitas pasokan di wilayah perkotaan.

4. Kolaborasi Multipihak dalam Mewujudkan Kota Tahan Pangan

Pengembangan ketahanan pangan perkotaan memerlukan dukungan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, sektor swasta, perguruan tinggi, komunitas, dan masyarakat. Pemerintah dapat

menyediakan regulasi, insentif, serta perencanaan tata ruang yang mendukung pengembangan kawasan pertanian perkotaan. Perguruan tinggi dan lembaga penelitian berperan dalam menghasilkan inovasi teknologi dan memberikan pendampingan kepada masyarakat, sedangkan sektor swasta dapat berkontribusi melalui investasi, penyediaan teknologi, dan pengembangan pasar.

Kolaborasi tersebut juga mendorong terbentuknya ekosistem pangan perkotaan yang lebih tangguh melalui edukasi masyarakat, penguatan kelembagaan, serta pengembangan jaringan distribusi pangan lokal. Integrasi antara produksi pangan, pengelolaan limbah organik, konservasi lingkungan, dan pemanfaatan teknologi digital akan menciptakan sistem pangan perkotaan yang lebih efisien, berkelanjutan, dan adaptif terhadap tantangan perubahan iklim, urbanisasi, serta peningkatan kebutuhan pangan di masa depan.

5. Pertanian Perkotaan dan Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan

Kontribusi pertanian perkotaan terhadap pencapaian berbagai Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) bersifat multidimensi, mencakup tujuan kedua mengenai tanpa kelaparan melalui peningkatan akses pangan lokal, tujuan kesebelas mengenai kota dan komunitas berkelanjutan melalui optimalisasi ruang hijau perkotaan, tujuan kedua belas mengenai konsumsi dan produksi bertanggung jawab melalui pengurangan jejak karbon distribusi pangan, serta tujuan ketiga belas mengenai penanganan perubahan iklim melalui kontribusi pertanian perkotaan terhadap adaptasi dan mitigasi iklim kota. Pemetaan kontribusi multidimensi ini penting bagi advokasi kebijakan yang mendukung pengembangan pertanian perkotaan sebagai instrumen strategis pencapaian agenda pembangunan berkelanjutan Indonesia secara lebih luas.

Pelaporan kontribusi pertanian perkotaan terhadap pencapaian SDGs secara sistematis oleh pemerintah daerah dapat memperkuat justifikasi alokasi anggaran dan dukungan kebijakan bagi sektor ini, sekaligus memenuhi kewajiban pelaporan pencapaian SDGs yang perlu disampaikan pemerintah Indonesia kepada komunitas internasional. Integrasi indikator pertanian perkotaan ke dalam kerangka pemantauan SDGs nasional menjadi langkah teknis yang perlu terus dikembangkan

guna memastikan kontribusi sektor ini terdokumentasi dengan baik dan dapat menjadi basis pembelajaran bagi perbaikan kebijakan pengembangan pertanian perkotaan di masa mendatang.



DAFTAR PUSTAKA

Aggarwal, P. K., Jarvis, A., Campbell, B. M., Zougmoré, R. B., Khatri-Chhetri, A., Vermeulen, S. J., & Loboguerrero, A. M. (2021). The climate-smart village approach: Framework of an integrative strategy for scaling up adaptation options in agriculture. *Ecology and Society*, 26(1), 45–58.

Ahmed, N., Zhang, B., Bunting, S. W., Diana, J. S., Rana, K. S., & Alam, M. R. (2021). Rice-fish farming systems: A pathway towards sustainable food production in Southeast Asia. Aquaculture Reports, 21, 100816.

Alfarizi, M., & Ngatindriatun. (2023). Analisis dampak penerapan pertanian berkelanjutan terhadap ketahanan pangan rumah tangga tani. Jurnal Kolaboratif Sains, 8(2), 1231–1238.

Al-Kodmany, K. (2018). The vertical farm: A review of developments and implications for the vertical city. Buildings, 8(2), 24.

Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). *Agroecology: Principles for the conversion and redesign of farming systems*. Springer.

Amelia, R., Saputra, D., & Handoyo, T. (2023). Efisiensi pemupukan nitrogen berbasis uji tanah dalam menurunkan emisi dinitrogen oksida pada tanaman jagung. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 25(2), 88–99.

Anantama, F., Rahmi, S., & Utomo, B. (2021). Evaluasi program Asuransi Usaha Tani Padi (AUTP) di Indonesia: Tinjauan partisipasi dan efektivitas klaim. *Jurnal Kebijakan Pertanian*, 9(1), 33–47.

Anggraeni, D., Kusnadi, J., & Ramli, A. (2023). Adopsi varietas padi toleran genangan sebagai strategi adaptasi pada kawasan rawan banjir. *Jurnal Agronomi Tropika*, 51(1), 12–24.

Anindita, M., Sasongko, P., & Herawati, N. (2023). Pemanfaatan Internet of Things dalam pemantauan kelembapan tanah untuk irigasi presisi. *Jurnal Teknik Pertanian*, 12(3), 145–156.

Artmann, M., & Sartison, K. (2018). The role of urban agriculture as a nature-based solution: A review for developing a systemic assessment framework. Sustainability, 10(6), 1937.

Astuti, W., Rahman, F., & Yulianto, S. (2021). Interaksi komponen biotik dan abiotik dalam ekosistem pertanian dataran rendah. *Jurnal Agroekosistem Indonesia*, 8(2), 55–67.

Ayaz, M., Ammad-Uddin, M., Sharif, Z., Mansour, A., & Aggoune, E. H. M. (2020). Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: Toward making the fields talk. IEEE Access, 7, 129551–129583.

Bacco, M., Barsocchi, P., Ferro, E., Gotta, A., & Ruggeri, M. (2019). The digitisation of agriculture: A survey of research activities on *smart farming*. Array, 3–4, 100009.

Badan Pangan Nasional. (2023). Peta ketahanan pangan dan kerentanan pangan Indonesia (FSVA) 2023. Jakarta: Badan Pangan Nasional Republik Indonesia.

Badan Pusat Statistik (BPS). (2023). Statistik Indonesia 2023. Jakarta: Badan Pusat Statistik.

Badan Pusat Statistik. (2024). Statistik lahan pertanian dan struktur agraria Indonesia 2023/2024. Jakarta: BPS RI.

Balaska, V., Adamidou, Z., Vryzas, Z., & Gasteratos, A. (2023). Sustainable crop protection management: A robotics and artificial intelligence perspective. Sustainability, 15(5), 4517.

Basche, A. D., & DeLonge, M. S. (2021). The impact of continuous living cover cropping and reduced tillage on soil hydrological function: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 310, 107301.

Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. Nature Sustainability, 3(4), 254–256.

Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). *Vertical farming*: A summary of approaches to growing skywards. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 94(3), 277–283.

Bunga, T., Salam, A., & Hasanuddin, M. (2022). Dinamika bahan organik tanah pada lahan sawah intensif dan implikasinya terhadap hasil panen. *Jurnal Tanah Tropika*, 27(1), 21–33.

De Boer, I. J. M., & Van Ittersum, M. K. (2018). Circularity in agricultural production. Wageningen University & Research.

Dewi, N. K., Ariyanti, S., & Saputro, H. (2022). Integrasi informasi iklim ilmiah dan pengetahuan lokal dalam manajemen risiko iklim pertanian. *Jurnal Sosial Ekonomi Pertanian*, 18(2), 101–115.

Dinas Pertanian. (2022). Pengertian dan konsep pertanian berkelanjutan. Buleleng: Dinas Pertanian Kabupaten Buleleng.

Djibran, M. A. (2023). Kebijakan dan penerapan teknologi pertanian berkelanjutan bagi petani kecil di perdesaan. Jurnal Kolaboratif Sains, 8(2), 1231–1238.

Duan, Y., Sun, X., Che, H., Cao, C., Li, Z., Yang, X., & Wang, Q. (2021). Application of *blockchain* technology in food traceability and supply chain management: A review. Journal of Cleaner Production, 322, 129065.

Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Cortés-García, F. J., & Camacho-Ferre, F. (2020). Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. Global Ecology and Conservation, 22, e00902.

Eldridge, B. M., Manzoni, L. R., Graham, C. A., Rodgers, B., Farmer, J. R., & Dodd, A. N. (2020). Getting to the roots of aeroponic indoor farming. New Phytologist, 228(6), 1183–1192.

Eriksson, D., Custers, R., Bohanec, B., Ahman, I., Weyens, N., Ritala, A., Hofvander, P., Nielsen, K. M., Fladung, M., Rasmussen, S. K., Schulman, A. H., & Poertner, K. (2020). Options to reform the European Union legislation on GMOs: Post-authorization and beyond. Trends in Biotechnology, 38(3), 231–234.

Etesami, H., & Adl, S. M. (2020). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) and their action mechanisms in availability of nutrients to plants. In Phyto-Microbiome in Stress Regulation (pp. 147–162). Springer.

FAO. (2022). *The state of land and water resources for food and agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2023). *Climate-smart agriculture sourcebook* (2nd ed.). Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://www.fao.org/climate-smart-agriculture-sourcebook/en/

Fenibo, E. O., Ijoma, G. N., & Matambo, T. (2021). Biopesticides in sustainable agriculture: A critical sustainable development driver governed by green chemistry principles. Frontiers in Sustainable Food Systems, 5, 619058.

Fernandez, A. L., Sheaffer, C. C., Tautges, N. E., Putnam, D. H., & Hunter, M. C. (2021). Multispecies cover crop effects on soil

microbial biomass in tropical and subtropical cropping systems. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(3), 245–256.

Fitriani, L., Nugroho, A., & Wibowo, S. (2023). Efektivitas pupuk hayati konsorsium mikroba indigenus terhadap efisiensi serapan hara pada tanaman padi. *Jurnal Mikrobiologi Pertanian*, 15(1), 40–52.

Franzluebbers, A. J., Chappell, J. C., Shi, W., & Cubbage, F. W. (2021). Application of an ecosystem services framework to integrated crop-livestock systems. Renewable Agriculture and Food Systems, 36(5), 436–442.

Fraser, E. D. G., & Campbell, M. (2019). Agriculture 5.0: Reconciling production with planetary health. One Earth, 1(3), 278–280.

Friedrichs, S., Takasu, Y., Kearns, P., Dagallier, B., Oshima, R., Schofield, J., & Moreddu, C. (2019). An overview of regulatory approaches to genome editing in agriculture. Biotechnology Research and Innovation, 3(2), 208–220.

Friha, O., Ferrag, M. A., Shu, L., Maglaras, L., & Wang, X. (2021). Internet of Things for the future of smart agriculture: A comprehensive review of emerging technologies. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 8(4), 718–752.

Gao, C. (2021). Genome engineering for crop improvement and future agriculture. Cell, 184(6), 1621–1635.

Gliessman, S. R. (2020). *Agroecology: The ecology of sustainable food systems* (4th ed.). CRC Press.

Goddek, S., Joyce, A., Kotzen, B., & Burnell, G. M. (Eds.). (2019). Aquaponics food production systems: Combined aquaculture and hydroponic production technologies for the future. Springer.

Grebitus, C., Chenarides, L., Muenich, R., & Mahalov, A. (2020). Consumers' perception of urban farming—An exploratory study. Frontiers in Sustainable Food Systems, 4, 79.

Handayani, R., Setiadi, Y., & Kusumo, B. (2022). Intensitas emisi sebagai indikator produksi pangan rendah karbon di negara berkembang. *Jurnal Lingkungan dan Pembangunan*, 14(2), 77–90.

Handoko, W., Prasetiawan, D., & Yuliani, R. (2023). Sertifikasi kopi berkelanjutan dan implikasinya terhadap pendapatan petani kopi

agroforestri. *Jurnal Ekonomi Pertanian dan Agribisnis*, 7(1), 58–70.

Hartono, B., Suminar, E., & Wahyudi, A. (2022). Penurunan emisi metana melalui teknik Alternate Wetting and Drying pada budidaya padi sawah. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 27(3), 210–221.

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. (2019). Breeding crops to feed 10 billion. Nature Biotechnology, 37(7), 744–754.

Hidayat, F., Kusumaningtyas, R., & Amri, S. (2023). Resiliensi agroekosistem pada kawasan rentan kekeringan: Perspektif jasa ekosistem. *Jurnal Ekologi dan Pembangunan Wilayah*, 6(1), 15–29.

Hidayati, N., Firmansyah, I., & Kurnia, D. (2022). Analisis usaha tani mina padi terhadap pendapatan dan efisiensi pupuk di Kabupaten Boyolali. *Jurnal Agribisnis Perikanan*, 15(2), 99–110.

IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

IPCC. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Ismail, R., Nugroho, W., & Sutanto, A. (2022). Kohesi sosial kelompok tani dan kapasitas pemulihan pascakejadian iklim ekstrem. *Jurnal Penyuluhan Pertanian*, 17(1), 1–13.

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). Understanding the potential applications of artificial intelligence in agriculture sector. Advanced Agrochem, 1(1), 15–30.

Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Sharma, R. (2020). Modeling the *blockchain* enabled traceability in agriculture supply chain. International Journal of Information Management, 52, 101967.

Kartika, D., & Ramadhan, F. (2021). Pergeseran distribusi hama penggerek batang jagung akibat perubahan suhu di dataran tinggi. *Jurnal Perlindungan Tanaman Indonesia*, 25(2), 130–140.

Kementerian Pertanian RI. (2022). Grand design digitalisasi pertanian Indonesia 2022–2024. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Kementerian Pertanian RI. (2023). Laporan kinerja dan capaian program Kostratani. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Kementerian Pertanian. (2023). Laporan inventarisasi dan mitigasi gas rumah kaca sektor pertanian 2022. Jakarta: Kementerian Pertanian Republik Indonesia.

Kim, D. G., Kirschbaum, M. U. F., & Beedy, T. L. (2022). Carbon sequestration potential of agroforestry systems in the tropics: A meta-analysis. *Agricultural Systems*, 196, 103349.

Klerkx, L., & Rose, D. (2020). Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? Global Food Security, 24, 100347.

Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. P. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. Environmental Research, 206, 112285.

Kozai, T. (2019). Towards sustainable plant factories with artificial lighting (PFALs) for achieving SDGs. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 12(5), 28–37.

Kozai, T., & Niu, G. (2020). Role of the plant factory with artificial lighting (PFAL) in urban areas. In Plant Factory (2nd ed., pp. 7–34). Academic Press.

Kristiana, R., & Sitanggang, N. H. D. (2018). Tuntunan ekologi berkelanjutan dan implementasi pertanian organik nasional. Seminar Nasional Edusains, 1(1), 22–30.

Kurniasari, R., Bakri, S., & Handoko, T. (2022). Kapasitas adaptif petani lahan kering terhadap variabilitas iklim di Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Studi Pembangunan Pertanian*, 10(2), 66–80.

Kurniawan, E., Santosa, H., & Prabowo, A. (2021). Efisiensi penggunaan air pada berbagai sistem irigasi hortikultura dataran rendah. *Jurnal Irigasi dan Sumber Daya Air*, 16(1), 22–34.

Lagiman. (2023). Pertanian berkelanjutan untuk kedaulatan pangan. Jurnal Analis Kebijakan, 8(1), 45–58.

Lal, R. (2020). Home gardening and urban agriculture for advancing food and nutritional security in response to the COVID-19 pandemic. Food Security, 12(4), 871–876.

Langemeyer, J., Madrid-Lopez, C., Beltran, A. M., & Mendez, G. V. (2021). Urban agriculture — A necessary pathway towards urban resilience and global sustainability? Landscape and Urban Planning, 210, 104055.

Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I., & Rillig, M. C. (2020). The concept and future prospects of soil health. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(10), 544–553.

Louwaars, N. P. (2018). Seed systems and seed policies to support innovation in African agriculture. In Agricultural Innovation Systems (pp. 155–178). CTA/CDI.

Mahanty, T., Bhattacharjee, S., Goswami, M., Bhattacharyya, P., Das, B., Ghosh, A., & Tribedi, P. (2020). Biofertilizers: A potential approach for sustainable agriculture development. Environmental Science and Pollution Research, 27(4), 3315–3335.

Meemken, E. M., & Qaim, M. (2018). Organic agriculture, food security, and the environment. Annual Review of Resource Economics, 10, 39–63.

Muscat, A., de Olde, E. M., de Boer, I. J. M., & Ripoll-Bosch, R. (2020). The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. Global Food Security, 25, 100330.

Nair, P. K. R., & Toth, G. G. (2020). *Agroforestry: An introduction to principles and practices*. Springer.

Nastiti, C., & Firmansyah, R. (2023). Efektivitas sistem peringatan dini kekeringan berbasis aplikasi seluler bagi petani lahan kering. *Jurnal Teknologi Informasi Pertanian*, 9(1), 45–58.

Nayak, P. K., Nayak, A. K., Panda, B. B., Lal, B., Gautam, P., Poonam, A., Shahid, M., Tripathi, R., Kumar, U., Mohapatra, S. D., & Jambhulkar, N. N. (2020). Ecological mechanism and diversity in rice-fish integrated farming system. Aquaculture, 522, 735100.

Newton, P., Civita, N., Frankel-Goldwater, L., Bartel, K., & Johns, C. (2020). What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 577723.

Nugraha, A., & Wicaksana, R. (2021). Perbaikan kualitas pakan ternak sapi potong sebagai strategi mitigasi emisi metana. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Peternakan*, 11(2), 90–101.

Nugroho, S., & Santoso, B. (2021). Indikator multi-dimensi dalam penilaian kesehatan tanah pada lahan pertanian intensif. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 15(1), 1–14.

Nurhayati, S., & Kusuma, W. (2023). Kontribusi jasa penyerbukan dan predator alami terhadap produktivitas hortikultura. *Jurnal Entomologi Indonesia*, 20(1), 33–45.

Perry, K. B., Rowntree, J. E., & Grandy, A. S. (2021). Diversifying agricultural systems to enhance functional biodiversity: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 36(4), 371–384.

Praharsini, N., Wulandari, A., & Kusumawati, D. (2022). Produktivitas biomassa hijauan pada sistem penggembalaan rotasi intensif. *Jurnal Ilmu Peternakan Tropis*, 9(2), 61–72.

Prasetya, B., & Wibowo, A. (2023). Analisis jejak air (water footprint) pada budidaya padi konvensional dan hemat air. *Jurnal Sumber Daya Air*, 19(2), 88–100.

Pratama, D., Suryana, A., & Hartati, Y. (2021). Estimasi laju erosi lahan pertanian berlereng menggunakan pendekatan USLE termodifikasi. *Jurnal Konservasi Tanah dan Air*, 13(1), 10–22.

Pratiwi, S., Ardiansyah, F., & Mulyani, R. (2023). Paket teknologi rendah karbon pada budidaya padi sawah: Studi kasus Sumatera Selatan. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, 28(1), 1–12.

Prayoga, W., Santika, T., & Herawati, D. (2021). Restorasi tata air mikro dan pertanian tanpa bakar pada lahan gambut sebagai strategi mitigasi emisi karbon. *Jurnal Pengelolaan Lahan Gambut*, 5(1), 14–27.

Purnomo, H., Ekadinata, A., & Vincent, G. (2021). Integrasi data spasial dan pengetahuan lokal dalam perencanaan lanskap pertanian berkelanjutan. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 27(2), 95–108.

Rachmawatie, S. J., Sutrisno, J., Rahayu, W. S., & Widiastuti, L. (2020). Mewujudkan ketahanan pangan melalui implementasi sistem pertanian terpadu berkelanjutan. Yogyakarta: Plantaxia.

Radoglou-Grammatikis, P., Sarigiannidis, P., Lagkas, T., & Moscholios, I. (2020). A compilation of UAV applications for precision agriculture. Computer Networks, 172, 107148.

Rahayu, S., Wibowo, T., & Utami, D. (2021). Pengelolaan tanah terpadu sebagai strategi pemulihan kesuburan lahan pertanian di Indonesia. *Jurnal Ilmu Tanah dan Agroklimatologi*, 18(1), 5–18.

Rahmawati, I., & Susilo, B. (2021). Interpretasi informasi iklim probabilistik oleh petani padi sawah: Studi kasus Jawa Tengah. *Jurnal Klimatologi Pertanian*, 6(2), 55–66.

Ramadhani, A., Kurniawan, F., & Setiadi, D. (2023). Konektivitas ekologis koridor riparian dalam lanskap perkebunan sawit di Kalimantan. *Jurnal Ekologi Lanskap Tropis*, 4(1), 22–35.

Reed, J., Van Vianen, J., Deakin, E. L., Barlow, J., & Sunderland, T. (2020). Integrated landscape approaches to managing social and environmental issues: A review. *Global Change Biology*, 26(3), 1195–1209.

Rejeb, A., Rejeb, K., Zailani, S., Keogh, J. G., & Appolloni, A. (2022). Examining the interplay between artificial intelligence and the agri-food industry. Artificial Intelligence in Agriculture, 6, 111–128.

Rivai, R. S., & Anugrah, I. S. (2011). Konsep dan implementasi pembangunan pertanian berkelanjutan di Indonesia. Forum Penelitian Agro Ekonomi, 29(1), 13–25.

Sadh, P. K., Duhan, S., & Duhan, J. S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: A review. Bioresources and Bioprocessing, 5(1), 1–15.

Sari, M., & Kartika, D. (2022). Tata kelola multi-pihak dalam forum lanskap: Tinjauan mandat dan representasi kelompok rentan. *Jurnal Tata Kelola Sumber Daya Alam*, 11(1), 40–53.

Sekaran, U., Lai, L., Ussiri, D. A. N., Kumar, S., & Clay, S. (2021). Role of integrated crop-livestock systems in improving agriculture production and addressing food security: A review. Journal of Agriculture and Food Research, 5, 100190.

Setiawan, A., Wahyudi, T., & Prasetyo, B. (2022). Erosi genetik varietas padi lokal di Pulau Jawa: Tinjauan historis dan implikasi konservasi. *Jurnal Sumberdaya Genetik Pertanian*, 8(2), 66–78.

Setiawan, R., & Purnama, D. (2023). Kombinasi teras bangku dan rumput vetiver dalam pengendalian erosi lahan berlereng. *Jurnal Konservasi Tanah dan Air*, 15(1), 33–44.

Setiawan, R., Handayani, N., & Kurniadi, A. (2023). Perubahan karbon organik tanah pada sistem tanpa olah tanah jangka panjang di lahan jagung. *Jurnal Ilmu Tanah Tropika*, 29(1), 12–25.

SharathKumar, M., Heuvelink, E., & Marcelis, L. F. M. (2020). *Vertical farming*: Moving from genetic to environmental modification. Trends in Plant Science, 25(8), 724–727.

Sharma, A., Jain, A., Gupta, P., & Chowdary, V. (2021). Machine learning applications for precision agriculture: A comprehensive review. IEEE Access, 9, 4843–4873.

Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., & Chaurasia, O. P. (2019). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. Journal of Soil and Water Conservation, 17(4), 364–371.

Shepherd, M., Turner, J. A., Small, B., & Wheeler, D. (2020). Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the 'digital agriculture' revolution. Journal of the Science of Food and Agriculture, 100(14), 5083–5092.

Siegner, A., Sowerwine, J., & Acey, C. (2018). Does urban agriculture improve food security? Examining the nexus of food access and distribution of urban produced foods in the United States: A systematic review. Sustainability, 10(9), 2988.

Sott, M. K., Furstenau, L. B., Kipper, L. M., Giraldo, F. D., López-Robles, J. R., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Precision techniques and Agriculture 4.0 technologies to promote sustainability in the coffee sector: State of the art, challenges, and future trends. IEEE Access, 8, 149854–149867.

Sperling, L., Boettiger, S., & Barker, I. (2020). Integrating seed systems: Bridging formal and farmer seed systems for greater impact. Global Food Security, 26, 100438.

Sulistyowati, E., Nugraha, A., & Prabandari, S. (2022). Evaluasi program Kalender Tanam Terpadu terhadap risiko gagal panen padi di Jawa Tengah. *Jurnal Kebijakan Pertanian Iklim*, 4(1), 18–30.

Suryanto, B., Widiyanto, A., & Rahmadani, F. (2021). Stabilitas hasil kopi pada sistem agroforestri kopi-naungan di dataran tinggi Jawa Timur. *Jurnal Agroforestri Indonesia*, 6(2), 77–89.

Susanti, D., Handoko, R., & Wibisono, A. (2022). Konsumsi air sektoral dan tantangan efisiensi penggunaan air pertanian global. *Jurnal Sumber Daya Air dan Lingkungan*, 10(1), 1–13.

United Nations. (2023). The sustainable development goals report 2023: Special edition. New York: United Nations Publications.

Van Gerrewey, T., Boon, N., & Geelen, D. (2022). *Vertical farming*: The only way is up? Agronomy, 12(1), 2.

Van Zanten, H. H. E., Van Ittersum, M. K., & De Boer, I. J. M. (2019). The role of farm animals in a circular food system. Global Food Security, 21, 18–22.

Varshney, R. K., Bohra, A., Yu, J., Graner, A., Zhang, Q., & Sorrells, M. E. (2021). Designing future crops: Genomics-assisted breeding comes of age. Trends in Plant Science, 26(6), 631–649.

Velazquez-Gonzalez, R. S., Garcia-Garcia, A. L., Ventura-Zapata, E., Barceinas-Sanchez, J. D. O., & Sosa-Savedra, J. C. (2022). A review on hydroponics and the technologies associated for medium- and small-scale operations. Agriculture, 12(5), 646.

Voss-Fels, K. P., Cooper, M., & Hayes, B. J. (2019). Accelerating crop genetic gains with genomic selection. Theoretical and Applied Genetics, 132(3), 669–686.

Wardhani, S., Kurniawan, B., & Amalia, R. (2022). Skema insentif jasa lingkungan sebagai instrumen kebijakan konservasi biodiversitas pertanian. *Jurnal Kebijakan Lingkungan*, 13(2), 101–114.

Weidner, T., Yang, A., & Hamm, M. W. (2019). Consolidating the current knowledge on urban agriculture in productive urban food systems: Learnings, gaps and outlook. Journal of Cleaner Production, 209, 1637–1655.

Wibisono, A., Handayani, R., & Kartawijaya, T. (2022). Simulasi dampak peningkatan suhu terhadap hasil panen padi di Pulau Jawa. *Jurnal Agroklimatologi Indonesia*, 9(1), 20–33.

Wicaksono, D., Prasetyo, H., & Rahman, A. (2023). Penerapan variable rate application pada pemupukan tebu berbasis peta variabilitas kesuburan lahan. *Jurnal Teknologi Pertanian Presisi*, 5(1), 15–27.

Wijayanti, R., Santoso, A., & Herlambang, T. (2022). Sebaran lahan kritis dan degradasi lahan pertanian di kawasan perbukitan Indonesia. *Jurnal Konservasi Sumber Daya Lahan*, 8(2), 45–58.

Wirawan, I. K., Suarjana, I. M., & Astuti, N. K. (2022). Pengelolaan air irigasi berbasis kearifan lokal subak di Bali. *Jurnal Antropologi Ekologi*, 7(1), 33–47.

World Bank. (2022). Food security update: Rising food insecurity amid global shocks. Washington, DC: World Bank Group.

Wulandari, T., & Prasetyo, D. (2022). Diversitas jasa ekosistem pada lanskap pertanian sawah-pekarangan-tegalan di Jawa Tengah. *Jurnal Ekologi Pertanian Nusantara*, 9(2), 88–101.

Yang, X., Shu, L., Chen, J., Ferrag, M. A., Wu, J., Nurellari, E., & Huang, K. (2021). A survey on smart agriculture: Development modes, technologies, and security and privacy challenges. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 8(2), 273–302.

Yep, B., & Zheng, Y. (2019). Aquaponic trends and challenges – A review. Journal of Cleaner Production, 228, 1586–1599.

Yuliana, R., Santoso, B., & Wijaya, K. (2023). Dampak sosial-ekonomi perubahan iklim terhadap rumah tangga petani di kawasan rentan kekeringan Jawa Tengah. *Jurnal Sosiologi Pedesaan*, 17(1), 12–26.



GLOSARIUM

Aeroponik	Metode budidaya tanaman tanpa tanah dengan menyemprotkan larutan nutrisi langsung ke akar tanaman.
Agrifood System	Keseluruhan rangkaian kegiatan yang mencakup produksi, pengolahan, distribusi, konsumsi, hingga pengelolaan limbah pangan.
Agrikultur Presisi	Sistem budidaya yang memanfaatkan teknologi digital untuk mengelola lahan secara tepat sesuai kebutuhan spesifik tanaman.
Agroekologi	Pendekatan pertanian yang menerapkan prinsip-prinsip ekologi dalam pengelolaan sistem produksi pangan secara berkelanjutan.
Agroforestri	Sistem penggunaan lahan yang mengintegrasikan tanaman pertanian dengan pepohonan untuk meningkatkan produktivitas dan menjaga kelestarian lingkungan.
Akuaponik	Sistem budidaya terpadu yang menggabungkan akuakultur dan hidroponik dalam satu ekosistem yang saling mendukung.
Artificial Intelligence	Teknologi kecerdasan buatan yang digunakan untuk mendukung analisis data, prediksi, dan pengambilan keputusan di bidang pertanian.
Benih	Bahan tanam yang memiliki mutu genetik, daya tumbuh tinggi, dan digunakan sebagai awal proses budidaya.

Bibit	Tanaman muda yang telah siap dipindahkan ke lahan untuk mendukung pertumbuhan dan produksi optimal.
Biodiversitas	Keragaman organisme hidup yang berperan menjaga keseimbangan ekosistem pertanian.
Biofertilizer	Pupuk yang mengandung mikroorganisme hidup untuk meningkatkan kesuburan tanah dan ketersediaan unsur hara.
Biopestisida	Pestisida yang berasal dari mikroorganisme, tumbuhan, atau bahan alami untuk mengendalikan organisme pengganggu tanaman.
Blockchain	Teknologi pencatatan digital terdistribusi yang digunakan untuk menjamin transparansi dan ketertelusuran produk pangan.
Circular Agriculture	Sistem pertanian yang mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya melalui prinsip penggunaan kembali dan daur ulang.
Degradasi Lahan	Penurunan kualitas lahan akibat erosi, pencemaran, atau penggunaan yang tidak berkelanjutan.
Green Technology	Teknologi yang dirancang untuk meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.
Gulma	Tumbuhan liar yang bersaing dengan tanaman budidaya dalam memperoleh air, cahaya, dan unsur hara.
Hama	Organisme pengganggu yang menyerang tanaman sehingga menurunkan produktivitas, kualitas, dan hasil panen secara keseluruhan.

Hidroponik	Teknik budidaya tanaman tanpa tanah dengan menggunakan larutan nutrisi sebagai media tumbuh.
Ketahanan Pangan	Kondisi ketika seluruh masyarakat memiliki akses terhadap pangan yang cukup, aman, bergizi, dan berkelanjutan.
Konservasi Air	Pengelolaan sumber daya air secara efisien untuk mendukung keberlanjutan pertanian.
Mina Padi	Sistem budidaya terpadu yang mengombinasikan penanaman padi dengan pemeliharaan ikan dalam satu lahan.
Semai	Tahapan menumbuhkan benih pada media tertentu sebelum dipindahkan ke lahan budidaya yang lebih luas.
Smart Farming	Sistem pertanian modern yang memanfaatkan teknologi digital, IoT, AI, sensor, dan otomatisasi untuk meningkatkan efisiensi produksi.
Soil Health	Kondisi tanah yang mampu mendukung pertumbuhan tanaman, menjaga fungsi ekosistem, dan mempertahankan produktivitas secara berkelanjutan.
Urban Farming	Kegiatan budidaya tanaman dan ternak di kawasan perkotaan untuk mendukung ketahanan pangan lokal.
Vertical Farming	Sistem budidaya tanaman secara bertingkat untuk mengoptimalkan pemanfaatan ruang yang terbatas.



INDEKS

A

akademik, 246
aksesibilitas, 17, 118, 139, 140, 150, 151, 185, 263
asimetri, 106
audit, 116, 117, 118, 188

B

big data, 20, 91, 109, 110, 111, 114, 126, 129, 162
blockchain, 20, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 126, 129, 162, 221, 295, 297

C

cloud, 91, 109, 111

D

diferensiasi, 245, 267, 276, 284
digitalisasi, 90, 92, 93, 94, 95, 107, 118, 158, 174, 298
disparitas, 90
distribusi, 2, 15, 17, 18, 19, 20, 39, 62, 78, 89, 95, 103, 106, 114, 115, 117, 176, 179, 190, 191, 194, 195, 245, 252, 262, 275, 287, 288, 291, 297
domestik, 12, 16, 22, 24, 25, 39, 42, 76, 140, 181, 182, 186, 187, 221, 231, 255, 257, 258, 283

E

ekonomi, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 15, 16, 17, 18, 24, 30, 33, 34, 38, 44, 49, 50, 51, 60, 62, 63, 69, 70, 76, 83, 85, 86, 87, 90, 94, 100, 102, 103, 109, 113, 118, 122, 123, 124, 125, 127, 130, 134, 135, 136, 138, 143, 150, 155, 156, 158, 160, 161, 168, 179, 191, 192, 193, 197, 198, 200, 202, 204, 207, 208, 211, 212, 213, 214, 215, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 235, 236, 237, 240, 241, 242, 245, 246, 252, 253, 254, 256, 257, 260, 261, 263, 265, 268, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 278, 280, 281, 282, 284, 285, 288, 304
ekspansi, 44, 143, 168
emisi, 10, 12, 21, 63, 65, 66, 67, 68, 69, 73, 74, 76, 77, 87, 100, 132, 137, 138, 155, 157, 158, 206, 208, 222, 227, 236, 237, 274, 284, 287, 293, 296, 297, 300
empiris, 41, 51, 55, 64, 79, 94, 132, 155, 188, 207, 239, 246, 280
entitas, 30

F

finansial, 8, 67, 79, 83, 87, 116, 124, 241
fintech, 92
fiskal, 10, 50, 76, 126, 226
fleksibilitas, 207, 241, 247, 253

fluktuasi, 17, 22, 32, 41, 49, 62, 106, 109, 121, 138, 161, 202, 207, 208, 215, 255, 257, 268, 286
fundamental, 80, 89, 137, 190

G

genetika, 165, 166, 168, 187, 196, 197
geografis, 16, 58, 63, 74, 99, 142, 145, 161, 193, 212, 223, 236, 281

I

implikasi, 32, 43, 197, 301
infrastruktur, 14, 16, 18, 19, 40, 42, 72, 90, 94, 96, 104, 105, 109, 111, 113, 115, 118, 119, 121, 126, 128, 129, 145, 149, 150, 159, 160, 169, 172, 189, 192, 203, 208, 209, 212, 214, 218, 224, 234, 236, 247, 250, 255, 256, 273, 276, 278, 280, 284, 287
inklusif, 7, 11, 19, 58, 67, 68, 92, 94, 95, 127, 130, 162, 163, 192, 244, 248
inovatif, 11, 26, 85, 86, 159, 162
integrasi, 6, 49, 58, 59, 64, 70, 71, 72, 75, 89, 100, 103, 106, 110, 118, 121, 134, 142, 144, 150, 188, 201, 202, 204, 205, 206, 211, 213, 218, 233, 235, 240, 247, 248, 288
integritas, 97
interaktif, 143
investasi, 9, 14, 19, 24, 33, 38, 41, 50, 55, 64, 71, 75, 86, 90, 97, 108, 118, 119, 121, 122, 124, 125, 126, 128, 134, 135, 136, 141, 147, 150, 157, 159, 160, 161, 162, 166, 167, 171, 174, 176, 180, 187, 203, 209, 215, 221, 223, 224, 225, 226, 228, 229, 230, 232, 234, 247, 248, 250, 251, 252, 253, 256, 260, 261, 262, 263, 267, 268, 269, 273, 275, 276, 278, 280, 281, 283, 284, 285, 287
investor, 92, 119, 256, 276

K

kolaborasi, 34, 107, 108, 127, 140, 176, 180, 219, 221, 224, 227, 230, 243, 288
komoditas, 6, 13, 20, 22, 23, 24, 30, 40, 46, 49, 50, 51, 52, 63, 64, 70, 73, 83, 84, 94, 100, 102, 104, 105, 106, 108, 109, 112, 113, 115, 116, 117, 118, 121, 122, 123, 135, 138, 140, 142, 143, 152, 154, 161, 166, 168, 174, 176, 181, 191, 202, 207, 211, 213, 214, 215, 216, 221, 222, 223, 226, 227, 232, 233, 234, 235, 252, 253, 261, 274, 275, 281, 282, 286
komparatif, 51, 78, 181, 263
komprehensif, 4, 16, 24, 35, 45, 72, 75, 76, 78, 81, 83, 87, 93, 103, 110, 113, 131, 142, 144, 149, 159, 161, 174, 176, 181, 186, 198, 214, 215, 216, 217, 225, 236, 239, 246, 256, 289
komputasi, 97, 101, 107, 109, 111, 149, 169
konkret, 48, 49, 61, 70, 85, 120
konsistensi, 17, 36, 85, 112, 121, 176, 177, 180, 187, 231, 250, 253, 258, 270, 283, 285
kredit, 50, 92, 162

M

manajerial, 202, 203, 214, 215
manifestasi, 61

manipulasi, 29, 116, 117, 222
manufaktur, 123
metodologi, 113, 158, 219, 225, 226, 246, 274
mikroorganisme, 29, 35, 44, 52, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 191, 193, 195, 204, 208, 228
Monokultur, 3, 52

N

negosiasi, 57, 106, 276
neraca, 41, 42, 43, 156
Nutrisi, 204, 251, 257

O

otoritas, 114, 119

P

payback period, 124
politik, 59
proyeksi, 64, 83, 135

R

real-time, 24, 58, 89, 96, 98, 100, 107, 109, 113, 114, 121, 137, 144, 150, 156, 222, 253, 279
regulasi, 3, 113, 115, 117, 119, 124, 147, 154, 166, 168, 181, 182, 197, 243, 254, 276
robotika, 104, 107, 121, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 162

S

siber, 97, 100, 101
stabilitas, 2, 10, 16, 22, 32, 36, 45, 47, 61, 79, 190, 207, 215, 286
stakeholder, 57
sustainability, 9, 77, 298, 299, 302

T

tarif, 284
teoretis, 120, 217, 239
transformasi, 5, 11, 18, 19, 20, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 129, 162, 163, 171, 223, 278
transparansi, 20, 56, 107, 113, 114, 115, 117, 118, 120, 245

V

varietas, 3, 4, 26, 40, 44, 46, 47, 69, 71, 73, 84, 91, 123, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 179, 193, 194, 196, 210, 211, 252, 255, 272, 280, 293, 301

BIOGRAFI PENULIS



Elfin Efendi, S.TP., M.P.

Lahir di Binjai Serbangan, 7 Juli 1970. Lulus S2 di Program Studi Teknologi Hasil Perkebunan Universitas Gadjah Mada Tahun 2000. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Asahan Program Studi Agroteknologi. Beberapa buku yang sudah diterbitkan diantaranya: *Teknik Pemuliaan Tanaman untuk Pertanian Berkelanjutan*; *Statistik dalam Penelitian Kuantitatif, Teori, Metode dan Aplikasi; Pertanian Digital, Menerapkan Teknologi Terkini dalam Produksi Tanaman dan Peternakan; Keberlanjutan Pertanian, Tantangan dan Solusi; Inovasi dan Kemajuan dalam Agroteknologi, Mendukung Ketahanan Pangan di Era Modern; Sistem Pertanian Berkelanjutan; dan Biokimia*



Wikka Sasvita, M.Agr.

Lahir di Binjai, 10 Februari 1991. Lulus S2 di Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara tahun 2018. Saat ini sebagai Dosen di Politeknik Pembangunan Pertanian (Polbangtan) Medan pada Jurusan Pertanian.



Maya Sari, S.TP., M.Sc.

Lahir di Medan, 09 Maret 1989 Lulus S2 di Program Studi Teknik Pertanian Universitas Gadjah Mada tahun 2015. Saat ini sebagai Dosen di Politeknik Pembangunan Pertanian Medan pada Program Studi Penyuluhan Pertanian Berkelanjutan.



Lanny Wattimena, S.P., M.Sc.

Lahir di Ambon, 12 Mei 1983. Lulus S2 – Program Pasca Sarjana pada Minat Ekonomi Pertanian di Universitas Gadjah Mada pada tahun 2009. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Victory Sorong pada Program Studi Kehutanan, Fakultas Ilmu Pertanian dan Lingkungan.

SISTEM PERTANIAN BERKELANJUTAN

Integrasi Ilmu, Teknologi, dan
Inovasi untuk Ketahanan Pangan

Buku referensi "Sistem Pertanian Berkelanjutan: Integrasi Ilmu, Teknologi, dan Inovasi untuk Ketahanan Pangan" membahas konsep, prinsip, dan implementasi pertanian berkelanjutan sebagai upaya menjawab berbagai tantangan pembangunan pertanian modern, seperti perubahan iklim, degradasi sumber daya alam, dan meningkatnya kebutuhan pangan. Buku ini mengintegrasikan aspek ekologi, ekonomi, sosial, serta pemanfaatan teknologi dan inovasi untuk mendukung terwujudnya sistem pertanian yang produktif, tangguh, dan berkelanjutan. Pembahasan mencakup konsep dasar pertanian berkelanjutan, ketahanan pangan, ekologi pertanian, Climate Smart Agriculture, pertanian presisi, bioteknologi, sistem produksi terintegrasi, hingga pertanian perkotaan sebagai bagian dari sistem agrifood modern. Materi disajikan secara sistematis dengan menggabungkan landasan teori, perkembangan teknologi, dan contoh penerapan yang relevan. Diharapkan buku ini dapat menjadi referensi yang bermanfaat dalam memahami dan mengembangkan sistem pertanian yang inovatif, berdaya saing, dan berkelanjutan.

PT MEDIA PENERBIT INDONESIA

mediapenerbitindonesia.com
+6281362150605
Penerbit Idn
@pt.mediapenerbitidn

ISBN 978-634-316-096-0
9 786343 160960