BUKU REFERENSI

AGROTEKNOLOGI MODERN
INOVASI DAN APLIKASI UNTUK PERTANIAN BERKELANJUTAN

Dr. Bayu Pratomo, S.S.T., M.P.
Nurul Istiqomah, S.P., M.P.
I Putu Parmila, S.P., M.Si.
Retmono Agung Winarno, S.TP., M.Sc.

AGROTEKNOLOGI MODERN

INOVASI DAN APLIKASI UNTUK PERTANIAN BERKELANJUTAN

Dr. Bayu Pratomo, S.S.T., M.P.
Nurul Istiqomah, S.P., M.P.
I Putu Parmila, S.P., M.Si.
Retmono Agung Winarno, S.TP., M.Sc.

PT MEDIA PENERBIT INDONESIA

AGROTEKNOLOGI MODERN

INOVASI DAN APLIKASI UNTUK PERTANIAN BERKELANJUTAN

Ditulis oleh:

Dr. Bayu Pratomo, S.S.T., M.P.
Nurul Istiqomah, S.P., M.P.
I Putu Parmila, S.P., M.Si.
Retmono Agung Winarno, S.TP., 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: 978-634-7305-02-2
IV + 215 hlm; 18,2 x 25,7cm.
Cetakan I, Juli 2025

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 berperan yang sangat penting dalam kehidupan manusia, tidak hanya sebagai sumber utama pangan, tetapi juga sebagai penggerak perekonomian di berbagai belahan dunia. Namun, seiring meningkatnya jumlah populasi dan tekanan terhadap sumber daya alam, sektor pertanian menghadapi tantangan yang semakin kompleks. Perubahan iklim, degradasi lahan, serta ketergantungan pada metode konvensional menuntut adanya pendekatan baru yang lebih efisien dan berkelanjutan.

Buku referensi ini membahas perkembangan agroteknologi modern dan penerapannya dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Buku referensi ini membahas teknologi seperti IoT, AI, drone, bioteknologi, serta pertanian presisi dan vertikal. Selain itu, buku referensi ini juga membahas energi terbarukan, digitalisasi pertanian, dan studi kasus implementasi teknologi di lapangan, serta prospek masa depan pertanian berbasis inovasi.

Semoga buku referensi ini dapat memberi kontribusi positif dalam mewujudkan pertanian Indonesia yang lebih mandiri, tangguh, dan berkelanjutan.

Salam Hangat,

Tim Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR ..... **i**
DAFTAR ISI ..... **ii**
BAB I PENDAHULUAN **1**
A. Definisi Agroteknologi 1
B. Pentingnya Teknologi dalam Mendukung Pertanian Berkelanjutan 7
C. Tantangan Global dalam Sektor Pertanian 12
D. Tujuan dan Manfaat Buku 18
BAB II DASAR-DASAR AGROTEKNOLOGI **21**
A. Sejarah Perkembangan Teknologi Pertanian 21
B. Konsep Pertanian Berkelanjutan 29
C. Prinsip Ekologi dan Efisiensi dalam Agroteknologi 32
D. Teknologi Konvensional vs. Modern 38
BAB III INOVASI TEKNOLOGI DALAM PERTANIAN **43**
A. Pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) untuk Monitoring dan Manajemen 43
B. *Artificial Intelligence* (AI) dalam Analisis Data Pertanian 47
C. Automasi dan Robotika dalam Produksi Pertanian 51
D. Pengembangan Drone untuk Pemantauan dan Penyemprotan 55
BAB IV TEKNOLOGI PANGAN DAN KETAHANAN PANGAN **59**
A. Inovasi dalam Penyimpanan dan Distribusi Pangan 59
B. Teknologi Pascapanen untuk Mengurangi Limbah 64
C. Bioteknologi dalam Produksi Pangan 70
D. Sistem Pertanian Vertikal dan Hidroponik 75
BAB V TRANSFORMASI PERTANIAN BERBASIS ENERGI RAMAH LINGKUNGAN **81**
A. Pemanfaatan Energi Terbarukan dalam Pertanian 81
B. Teknologi untuk Pengelolaan Limbah Pertanian 84
C. *Circular Economy* dalam Sistem Pertanian 88
D. Studi Kasus: Implementasi Energi Surya dan Biogas di Sektor Pertanian 92
BAB VI DIGITALISASI PERTANIAN **99**
A. Penggunaan *Big Data* dalam Optimalisasi Produksi 99

B. Blockchain untuk Transparansi dalam Rantai Pasok Pertanian 103
C. Aplikasi Mobile untuk Petani: Manfaat dan Tantangan 107
D. Platform Digital untuk Pasar dan Distribusi Hasil Pertanian 113
BAB VII INOVASI GENETIKA DAN BIOTEKNOLOGI PERTANIAN 119
A. Rekayasa Genetika untuk Tanaman Tahan Iklim Ekstrem .. 119
B. Mikroorganisme sebagai Solusi Ramah Lingkungan 125
C. Teknologi CRISPR dalam Pemuliaan Tanaman 131
D. Etika dan Isu Keamanan dalam Bioteknologi 135
BAB VIII KEBERLANJUTAN DALAM AGROTEKNOLOGI 141
A. Indikator Keberlanjutan dalam Teknologi Pertanian 141
B. Peran Kebijakan dan Regulasi dalam Mendukung Inovasi .. 147
C. Edukasi dan Kesadaran Masyarakat tentang Agroteknologi 154
D. Studi Kasus: Implementasi Agroteknologi Berkelanjutan di Indonesia 158
BAB IX PROSPEK MASA DEPAN AGROTEKNOLOGI 163
A. Tren Teknologi Pertanian di Era Society 5.0 163
B. Tantangan dan Peluang di Sektor Pertanian Modern 168
C. Kolaborasi Antar Stakeholder untuk Pertanian Berkelanjutan 175
D. Visi Pertanian Berbasis Teknologi di Masa Depan 181
BAB X KESIMPULAN 189
DAFTAR PUSTAKA 191
GLOSARIUM 207
INDEKS 211
BIOGRAFI PENULIS 213
SINOPSIS 215

BAB I

PENDAHULUAN

Pertanian memiliki peranan yang sangat vital dalam kehidupan manusia, tidak hanya sebagai sumber pangan, tetapi juga sebagai penopang utama ekonomi global. Seiring dengan meningkatnya jumlah populasi dunia dan beragam tantangan yang muncul akibat perubahan iklim, kebutuhan akan inovasi dalam sektor pertanian menjadi semakin mendesak. Teknologi pertanian yang modern, yang dikenal sebagai agroteknologi, menawarkan solusi untuk meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan keberlanjutan dalam sektor ini. Buku ini berfokus pada berbagai inovasi dalam agroteknologi, serta aplikasinya dalam mewujudkan pertanian yang lebih cerdas dan berkelanjutan.

Seiring berjalannya waktu, sektor pertanian menghadapi tantangan yang semakin kompleks, seperti penurunan kualitas tanah, kekurangan sumber daya air, dan ketergantungan pada metode pertanian tradisional yang sering kali tidak efisien. Di sisi lain, perkembangan teknologi yang pesat memberikan peluang untuk mengatasi masalah-masalah tersebut. Berbagai teknologi baru, mulai dari bioteknologi, rekayasa genetika, hingga penggunaan data besar dan kecerdasan buatan, memungkinkan sektor pertanian untuk bertransformasi menuju sistem yang lebih modern dan ramah lingkungan.

A. Definisi Agroteknologi

Agroteknologi merupakan salah satu bidang penting yang mengalami perkembangan pesat di tengah tantangan global seperti krisis pangan, degradasi lingkungan, perubahan iklim, dan pertumbuhan populasi dunia. Dalam konteks ini, kebutuhan akan sistem pertanian yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan menjadi semakin mendesak. Pertanian tradisional yang mengandalkan metode konvensional terbukti tidak lagi cukup untuk menjawab kompleksitas

tantangan masa kini dan masa depan. Maka dari itu, munculnya agroteknologi sebagai suatu cabang ilmu yang mengintegrasikan teknologi, biologi, dan manajemen sumber daya alam menawarkan solusi inovatif dan transformasional.

Agroteknologi menjadi tumpuan utama dalam mengembangkan praktik pertanian yang berkelanjutan, efisien, dan berorientasi pada teknologi modern. Integrasi antara teknologi informasi, bioteknologi, sistem pertanian presisi, dan mekanisasi merupakan bagian dari evolusi pertanian menuju era industri 4.0 bahkan 5.0. Perkembangan ini mengubah paradigma petani dari sekadar pelaksana budidaya menjadi manajer sistem agribisnis berbasis data dan teknologi. Secara etimologis, istilah "agroteknologi" berasal dari dua kata, yaitu agro (berarti pertanian) dan teknologi (ilmu dan penerapan alat atau sistem untuk memecahkan masalah). Maka secara sederhana, agroteknologi berarti penerapan teknologi dalam bidang pertanian.

Secara konseptual, agroteknologi dapat didefinisikan sebagai ilmu yang mempelajari dan mengembangkan teknik, metode, serta penerapan teknologi dalam bidang pertanian untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, serta keberlanjutan sistem pertanian secara keseluruhan (Wiradinata & Malik, 2024). Menurut Agrios (2012), agroteknologi mencakup seluruh upaya ilmiah dan teknologi dalam pengelolaan tanaman, tanah, air, serta pengendalian organisme pengganggu tanaman, dengan pendekatan sistem dan berbasis penelitian. Pendekatan ini mencakup praktik-praktik budidaya tanaman, pengelolaan kesuburan tanah, pengairan, perlindungan tanaman, serta penggunaan teknologi presisi dan otomasi dalam proses produksi.

Organisasi Pangan dan Pertanian Dunia (FAO) mendefinisikan agroteknologi sebagai "*a set of modern agricultural practices involving the integration of biological, technological, and engineering systems to optimize crop production, ensure food security, and maintain environmental sustainability*" (FAO, 2020). Definisi ini menekankan pentingnya sinergi antara aspek produksi, keberlanjutan, dan adaptasi teknologi. Sementara itu, menurut *Indonesian Agricultural Technology Assessment Institute* (BPTP-Balitbangtan), agroteknologi mencakup pemanfaatan inovasi teknologi seperti benih unggul, rekayasa genetika, teknik budidaya cerdas, dan sistem digitalisasi pertanian untuk meningkatkan nilai tambah dan efisiensi usaha tani.

Agroteknologi tidak hanya terbatas pada penerapan alat mekanis dalam pertanian, tetapi mencakup berbagai bidang yang saling terkait. Beberapa komponen utama dalam agroteknologi modern meliputi:

1. Bioteknologi

Bioteknologi merupakan bidang ilmu terapan yang memanfaatkan prinsip-prinsip biologi, terutama genetika dan mikrobiologi, untuk menciptakan produk dan teknologi yang bermanfaat di berbagai sektor, termasuk pertanian. Dalam konteks pertanian, bioteknologi digunakan untuk meningkatkan efisiensi produksi, memperbaiki ketahanan tanaman terhadap penyakit dan stres lingkungan, serta mempercepat proses pemuliaan tanaman. Pendekatan ini menjadi solusi ilmiah dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, kelangkaan air, dan peningkatan kebutuhan pangan akibat pertumbuhan populasi dunia yang pesat.

Salah satu contoh penting penerapan bioteknologi dalam pertanian adalah pengembangan tanaman hasil rekayasa genetika (*genetically modified organisms*/GMO). Tanaman GMO dirancang agar memiliki sifat unggul, seperti toleransi terhadap herbisida, resistensi terhadap hama, dan kemampuan adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem seperti kekeringan atau tanah salin. Tanaman jagung, kedelai, dan kapas transgenik telah banyak digunakan di berbagai negara dan terbukti meningkatkan produktivitas serta mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia (Briefs, 2017). Selain itu, teknologi kultur jaringan juga memungkinkan perbanyakan tanaman secara massal dengan kualitas genetik yang seragam dan bebas penyakit. Pemanfaatan bioteknologi modern juga mencakup teknik pemuliaan tanaman berbasis marker (*marker-assisted selection*), serta pemanfaatan teknologi CRISPR untuk penyuntingan gen secara presisi. Semua pendekatan ini membuka peluang besar dalam menciptakan sistem pertanian yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

2. Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK)

Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) telah menjadi pilar utama dalam transformasi sektor pertanian menuju sistem yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan. Dengan menggabungkan sensor canggih, jaringan komunikasi, dan perangkat lunak analitik, TIK memungkinkan petani untuk mengakses informasi secara real-time dan

mengambil keputusan berbasis data. Pendekatan ini menjadi dasar dari konsep pertanian presisi (*precision agriculture*), di mana seluruh proses produksi, mulai dari penanaman, pemupukan, hingga panen, dioptimalkan untuk mencapai hasil terbaik dengan penggunaan sumber daya minimal (Wolfert et al., 2017).

Internet of Things (IoT) merupakan salah satu teknologi kunci dalam penerapan TIK di bidang pertanian. Melalui penggunaan sensor yang tertanam di lahan, sistem irigasi, atau bahkan drone, data mengenai suhu tanah, kelembaban udara, intensitas cahaya, dan kondisi tanaman dapat dikumpulkan secara kontinu. Informasi ini kemudian diolah menggunakan teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*/AI) untuk mendeteksi pola, memprediksi penyakit tanaman, dan memberikan rekomendasi tindakan secara otomatis. Dengan demikian, petani tidak hanya mengandalkan intuisi, tetapi memiliki dasar ilmiah dalam setiap keputusan yang diambil di lapangan.

Gambar 1. *Big Data*

Sumber: *Dqlab*

Penggunaan *big data* juga memperkuat efisiensi manajemen pertanian modern. Dengan menggabungkan data historis, kondisi cuaca, dan informasi pasar, sistem berbasis *big data* dapat membantu merencanakan waktu tanam, menentukan varietas unggul, dan memprediksi harga hasil panen. Kolaborasi antar stakeholder, seperti pemerintah, penyedia teknologi, dan pelaku pasar juga difasilitasi

melalui platform digital berbasis TIK. Semua ini menjadikan TIK sebagai motor penggerak utama dalam mewujudkan pertanian cerdas yang adaptif terhadap tantangan masa kini dan masa depan.

3. Teknik Mekanisasi

Teknik mekanisasi dalam pertanian merupakan salah satu tonggak penting dalam modernisasi sektor agrikultur. Mekanisasi mencakup penerapan berbagai alat dan mesin pertanian, seperti traktor, alat tanam otomatis (*automatic planters*), pemanen mekanis, dan sistem irigasi berbasis mesin, yang menggantikan atau mengurangi ketergantungan terhadap tenaga kerja manual. Penerapan teknologi ini tidak hanya mempercepat proses kerja di lapangan, tetapi juga meningkatkan efisiensi dan konsistensi dalam produksi pertanian. Dalam konteks pertanian skala besar, mekanisasi menjadi solusi yang efektif untuk memenuhi permintaan pangan yang terus meningkat (Klerkx et al., 2019).

Kemajuan terbaru dalam mekanisasi juga mencakup penggunaan drone untuk pemetaan lahan dan pemantauan pertumbuhan tanaman. Drone dapat mengambil citra udara resolusi tinggi untuk mendeteksi area yang kekurangan nutrisi, terkena hama, atau mengalami kekeringan. Selain itu, robot pertanian telah mulai digunakan untuk tugas-tugas spesifik seperti penyemprotan pestisida secara presisi, penyiangan otomatis, dan bahkan pemanenan buah. Teknologi ini tidak hanya mempercepat pekerjaan, tetapi juga mengurangi limbah dan dampak lingkungan akibat penggunaan input secara berlebihan.

Penerapan teknik mekanisasi juga menjadi solusi atas kelangkaan tenaga kerja di sektor pertanian, terutama di daerah yang mengalami urbanisasi tinggi. Selain itu, mekanisasi mendorong peningkatan produktivitas lahan dan memperluas skala usaha tani. Namun, tantangan utama dalam implementasinya adalah biaya investasi awal yang tinggi serta perlunya pelatihan bagi petani dalam pengoperasian dan perawatan alat.

4. Sistem Pertanian Presisi

Sistem pertanian presisi merupakan pendekatan revolusioner dalam manajemen agrikultur yang didasarkan pada prinsip efisiensi dan ketepatan penggunaan sumber daya. Melalui pengumpulan dan analisis data secara real-time, pertanian presisi memungkinkan petani mengelola

lahan, tanaman, dan input seperti pupuk serta air secara lebih akurat. Teknologi yang digunakan meliputi sensor tanah untuk mendeteksi kelembapan dan kandungan nutrien, sistem GPS untuk pemetaan lokasi spesifik dalam lahan, serta teknologi drone yang menyediakan citra udara guna mengidentifikasi variasi kondisi tanaman dalam satu petak lahan (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Dengan pendekatan ini, pertanian tidak lagi dipandang sebagai proses homogen, melainkan sebagai sistem yang sangat variatif tergantung kondisi mikro lingkungan. Misalnya, beberapa bagian lahan mungkin memerlukan lebih banyak air atau nutrisi dibanding bagian lainnya. Melalui data yang diperoleh dari sensor dan penginderaan jauh, input dapat diaplikasikan hanya pada lokasi yang membutuhkan, sehingga mengurangi pemborosan dan biaya produksi. Selain itu, penggunaan pestisida dapat dikurangi karena area yang terindikasi terserang hama saja yang ditargetkan, bukan seluruh lahan secara merata. Keuntungan dari pertanian presisi sangat signifikan, mulai dari peningkatan hasil panen, pengurangan biaya input, hingga dampak lingkungan yang lebih rendah. Namun, penerapannya membutuhkan investasi awal pada perangkat keras dan perangkat lunak, serta peningkatan kapasitas petani dalam penggunaan data dan teknologi.

5. Pengelolaan Lingkungan dan Sumber Daya Alam

Pengelolaan lingkungan dan sumber daya alam merupakan aspek fundamental dalam penerapan agroteknologi modern yang berkelanjutan. Seiring dengan meningkatnya tekanan terhadap lahan pertanian akibat perubahan iklim, pertumbuhan penduduk, dan eksploitasi berlebihan, kebutuhan akan pendekatan yang menjaga keseimbangan ekosistem semakin mendesak. Agroteknologi hadir sebagai solusi melalui integrasi metode ramah lingkungan dalam praktik pertanian, seperti teknologi irigasi hemat air (*drip irrigation*), teknik konservasi tanah, dan manajemen limbah pertanian secara terpadu (Pretty, 2018). Tujuannya adalah meningkatkan produktivitas tanpa merusak ekosistem alami yang menopang keberlangsungan pertanian itu sendiri.

Salah satu praktik penting adalah penggunaan irigasi tetes dan sensor kelembapan tanah untuk meminimalkan pemborosan air. Sistem ini memungkinkan distribusi air secara efisien langsung ke akar tanaman, sehingga mengurangi penguapan dan limpasan. Di sisi lain, praktik

pengomposan organik menjadi alternatif pengelolaan limbah pertanian yang berkelanjutan. Limbah tanaman dan kotoran hewan dikonversi menjadi kompos yang kaya nutrisi, menggantikan pupuk kimia dan memperbaiki struktur serta kesuburan tanah. Ini berkontribusi terhadap peningkatan kapasitas tanah dalam menahan air dan nutrien, sekaligus menjaga biodiversitas mikroorganisme tanah yang esensial.

Teknologi ini juga mendukung sistem penanaman berkelanjutan melalui rotasi tanaman, tumpangsari, dan agroforestri yang menjaga keseimbangan ekosistem dan mengurangi ketergantungan pada input sintetis. Kombinasi antara teknologi dan pendekatan ekologis ini tidak hanya meningkatkan hasil panen, tetapi juga memperkuat daya tahan lingkungan terhadap dampak perubahan iklim.

B. Pentingnya Teknologi dalam Mendukung Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan didefinisikan sebagai sistem produksi pertanian yang mampu memenuhi kebutuhan pangan dan ekonomi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhannya sendiri (Pretty, 2018). Sistem ini menekankan keseimbangan antara tiga pilar: produktivitas, konservasi lingkungan, dan keberlanjutan sosial.

1. Teknologi Presisi

Teknologi presisi dalam bidang pertanian atau precision agriculture merupakan pendekatan inovatif yang menggabungkan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan dalam sistem produksi pangan. Konsep ini berfokus pada pengelolaan lahan secara spesifik dengan menggunakan data spasial dan temporal untuk menyesuaikan input seperti air, pupuk, dan pestisida sesuai kebutuhan spesifik tanaman di lokasi tertentu. Alat-alat seperti sensor tanah, drone, sistem GPS, dan perangkat lunak berbasis sistem informasi geografis (GIS) berperan penting dalam mengumpulkan, menganalisis, dan mengelola data lapangan secara real-time (Gebbers & Adamchuk, 2010). Dengan demikian, petani dapat mengambil keputusan yang lebih tepat, responsif, dan berbasis bukti dalam manajemen lahan dan tanaman.

Gambar 2. Sistem Informasi Geografis

Sumber: *Stratoflow*

Implementasi pertanian presisi telah terbukti mampu meningkatkan produktivitas dan efisiensi. Gebbers dan Adamchuk (2010) mencatat bahwa pendekatan ini dapat meningkatkan hasil panen hingga 15–20% sekaligus mengurangi penggunaan input kimia seperti pupuk dan pestisida sebesar 10–30%. Ini tidak hanya berarti keuntungan ekonomi bagi petani, tetapi juga menciptakan dampak lingkungan yang positif. Penggunaan input secara efisien mengurangi risiko pencemaran tanah dan air akibat residu kimia, menjaga kualitas ekosistem sekitar lahan pertanian. Selain itu, pengurangan input juga berarti penurunan emisi gas rumah kaca yang berasal dari produksi dan penggunaan pupuk kimia.

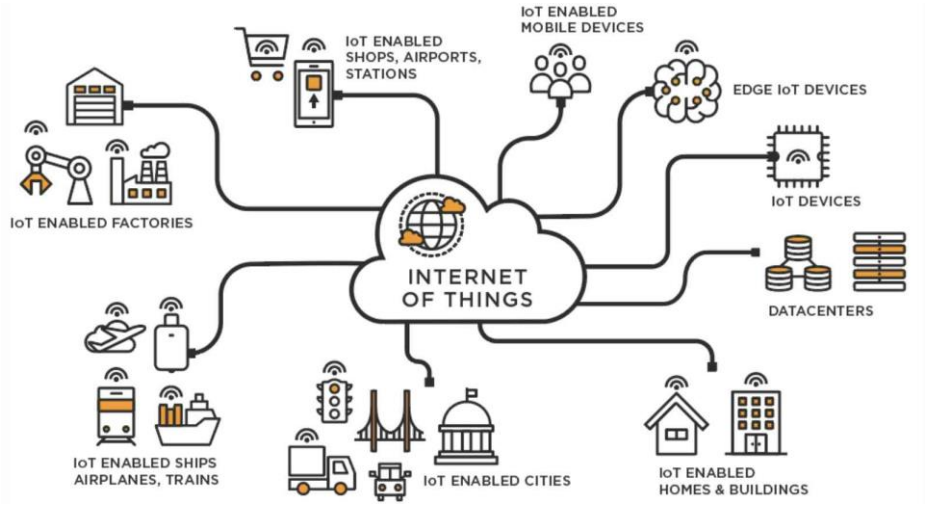
Teknologi presisi memberikan landasan kuat bagi sistem pertanian masa depan yang cerdas dan berkelanjutan. Dengan kemajuan dalam kecerdasan buatan (AI), pemrosesan citra drone, dan integrasi *big data*, sistem pertanian kini dapat dipantau dan disesuaikan dari jarak jauh, bahkan secara otomatis. Ini menjadikan pertanian presisi sebagai bagian integral dari transformasi digital di sektor agrikultur dan sejalan dengan visi pertanian di era Society 5.0, yang mengutamakan efisiensi teknologi untuk menjawab tantangan global seperti perubahan iklim, kelangkaan sumber daya, dan ketahanan pangan jangka panjang.

2. *Internet of Things* (IoT) dan *Big Data*

Penerapan *Internet of Things* (IoT) dan *big data* dalam sektor pertanian telah merevolusi cara petani mengelola lahan, tanaman, dan sumber daya alam. IoT memungkinkan integrasi berbagai sensor dan perangkat pintar yang terhubung melalui jaringan internet untuk

memantau variabel agrikultur seperti kelembaban tanah, suhu udara, curah hujan, serta aktivitas serangan hama secara real-time. Informasi ini kemudian dikumpulkan dan dianalisis secara komprehensif menggunakan sistem *big data* yang didukung kecerdasan buatan (AI). Kombinasi ini menghasilkan pendekatan pertanian yang responsif dan presisi, memungkinkan petani mengambil tindakan yang lebih cepat dan tepat berdasarkan data lapangan yang aktual.

Gambar 3. *Internet of Things*



Sumber: *Btech*

Manfaat utama dari penggabungan IoT dan *big data* adalah efisiensi yang lebih tinggi dalam pengelolaan sumber daya dan peningkatan produktivitas pertanian. Studi oleh Wolfert et al. (2017) menunjukkan bahwa teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi lahan hingga 25% dan menurunkan konsumsi air sampai 30%. Hal ini sangat signifikan terutama di wilayah yang rentan terhadap kelangkaan air atau degradasi lahan. Selain itu, sistem ini memungkinkan deteksi dini terhadap serangan hama dan penyakit tanaman, yang sering kali menjadi faktor utama penurunan hasil panen. Dengan sistem peringatan dini, petani dapat mengambil langkah preventif lebih cepat sehingga risiko kerugian dapat diminimalkan.

Penggunaan IoT dan *big data* juga mendorong munculnya praktik *evidence-based farming*, yaitu pengambilan keputusan berbasis data nyata. Ini menggeser paradigma pertanian tradisional yang kerap bergantung pada intuisi atau kebiasaan, menuju sistem pertanian berbasis analisis ilmiah dan teknologi. Pendekatan ini menjadikan pertanian lebih

adaptif terhadap perubahan iklim, fluktuasi pasar, dan kondisi lingkungan, sekaligus mendukung keberlanjutan dalam jangka panjang.

3. Bioteknologi dan Rekayasa Genetik

Bioteknologi dan rekayasa genetika telah menjadi ujung tombak inovasi dalam sektor pertanian modern, terutama dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan degradasi lingkungan. Kemajuan bioteknologi tidak hanya memudahkan dalam proses inokulasi dan penyusunan formulasi pupuk hayati, tetapi juga memudahkan dalam identifikasi dan karakterisasi jenis-jenis mikroorganisme yang menunjukkan efektivitas tinggi sebagai pupuk hayati. Kumpulan mikroorganisme terpilih meningkatkan efektivitas penambatan hara tertentu dan memfasilitasi penyediaannya bagi tanaman (Sriwahyuni & Parmila, 2019).

Dengan pendekatan ini, para ilmuwan dapat menciptakan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap tekanan lingkungan seperti kekeringan, suhu ekstrem, dan salinitas tinggi. Selain itu, tanaman hasil rekayasa genetika atau *Genetically Modified Organisms* (GMO) juga dapat dirancang untuk memiliki ketahanan terhadap serangan hama dan penyakit, sehingga mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia yang merusak lingkungan. Teknologi ini secara langsung berkontribusi pada peningkatan produktivitas pertanian tanpa memperluas lahan atau merusak ekosistem yang ada.

Menurut laporan *International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications* (ISAAA, 2018), pada tahun 2018 terdapat sekitar 191,7 juta hektare lahan pertanian di seluruh dunia yang telah mengadopsi tanaman hasil bioteknologi. Penerapan tanaman biotek ini menghasilkan pengurangan signifikan dalam penggunaan pestisida dan berkontribusi terhadap konservasi lahan serta penghematan energi. Misalnya, tanaman jagung atau kapas transgenik yang tahan hama mengurangi kebutuhan akan penyemprotan pestisida, yang secara tidak langsung juga menurunkan emisi karbon dan polusi air. Selain itu, peningkatan hasil panen dari benih unggul membantu memenuhi kebutuhan pangan global tanpa memperluas konversi lahan hutan atau padang rumput menjadi area pertanian.

4. Teknologi Energi Terbarukan di Pertanian

Teknologi energi terbarukan telah menjadi bagian penting dalam transformasi pertanian menuju keberlanjutan. Penggunaan energi fosil yang dominan selama beberapa dekade dalam praktik pertanian telah menyebabkan peningkatan emisi karbon dan ketergantungan pada sumber daya yang tidak dapat diperbarui. Oleh karena itu, integrasi sumber energi bersih seperti panel surya, turbin angin, dan bioenergi menjadi langkah strategis untuk mendukung efisiensi energi sekaligus menurunkan dampak lingkungan. Salah satu penerapan yang paling menonjol adalah penggunaan sistem irigasi tenaga surya, yang memungkinkan petani untuk memompa air tanpa bergantung pada bahan bakar diesel atau listrik konvensional.

Sistem ini juga berperan besar dalam mengurangi emisi karbon, karena tidak menghasilkan polutan selama proses operasionalnya. Hal ini sangat relevan di negara-negara berkembang, di mana akses terhadap listrik atau bahan bakar dapat menjadi kendala utama bagi petani kecil. Dengan memanfaatkan energi matahari yang melimpah, teknologi ini mendukung pertanian yang mandiri secara energi dan lebih ramah lingkungan.

Penerapan teknologi energi terbarukan juga dapat dikombinasikan dengan praktik pertanian cerdas lainnya, seperti irigasi presisi atau pengeringan hasil panen berbasis surya. Ini tidak hanya meningkatkan efisiensi sumber daya, tetapi juga meningkatkan kualitas hasil produksi. Dalam jangka panjang, pengembangan dan investasi pada infrastruktur energi terbarukan di sektor pertanian dapat menjadi katalisator untuk menciptakan sistem pertanian yang lebih resilien, hemat biaya, dan berkontribusi terhadap pencapaian target emisi karbon nasional serta ketahanan energi pedesaan.

5. Teknologi Pascapanen dan Rantai Dingin (*Cold Chain*)

Teknologi pascapanen dan rantai dingin (*cold chain*) berperan krusial dalam menjaga kualitas dan nilai gizi hasil pertanian setelah masa panen. Salah satu tantangan utama dalam sistem pertanian di negara berkembang adalah tingginya tingkat kehilangan hasil (*postharvest loss*) akibat buruknya penanganan pascapanen dan keterbatasan infrastruktur penyimpanan. Sayur dan buah-buahan, sebagai komoditas mudah rusak, sangat rentan terhadap kerusakan apabila tidak disimpan pada suhu yang sesuai. Teknologi rantai dingin, seperti penyimpanan bersuhu rendah,

pengemasan berbasis atmosfer termodifikasi (*modified atmosphere packaging*), dan distribusi berbasis suhu terkendali, menjadi solusi vital untuk memperpanjang umur simpan produk pertanian.

Menurut laporan FAO (2020), sebanyak 30–40% hasil pertanian di negara-negara berkembang hilang sebelum mencapai konsumen karena kurangnya teknologi pascapanen dan *cold chain*. Ini mencerminkan kebutuhan mendesak akan investasi dalam fasilitas pendingin portabel, sensor suhu, dan sistem pengawasan logistik berbasis teknologi informasi. Selain menjaga kesegaran dan keamanan pangan, *cold chain* juga mendukung petani kecil agar mampu mengakses pasar yang lebih luas, termasuk pasar ekspor yang memiliki standar kualitas tinggi. Dengan demikian, teknologi ini tidak hanya mengurangi food loss, tetapi juga memperbaiki kesejahteraan ekonomi petani dan keamanan pangan nasional.

Implementasi teknologi pascapanen yang efektif harus melibatkan kolaborasi antara sektor publik dan swasta, serta dukungan pelatihan bagi petani dalam pengelolaan hasil panen dan logistik. Teknologi seperti pengemasan vakum dan lemari pendingin bertenaga surya kini mulai digunakan di beberapa daerah terpencil untuk menjaga kualitas produk tanpa tergantung listrik konvensional. Keberhasilan sistem ini menunjukkan bahwa dengan inovasi dan investasi yang tepat, kerugian hasil pertanian dapat ditekan secara signifikan, menjadikan rantai pasok pertanian lebih efisien dan berkelanjutan.

C. Tantangan Global dalam Sektor Pertanian

Sektor pertanian berperan fundamental dalam kehidupan manusia, tidak hanya sebagai penyedia kebutuhan pangan tetapi juga sebagai penyokong utama perekonomian di berbagai negara, terutama negara berkembang. Namun, dalam dua dekade terakhir, sektor ini menghadapi tantangan besar yang saling terkait secara kompleks, termasuk perubahan iklim, pertumbuhan populasi, degradasi sumber daya alam, volatilitas pasar, ketimpangan distribusi pangan, serta perubahan sosial dan teknologi yang cepat.

Banyak negara sedang berpacu untuk menyesuaikan sistem pertaniannya agar lebih tangguh, berkelanjutan, dan adaptif terhadap tantangan global ini. Menurut FAO (2020), jika dunia tidak segera melakukan transformasi sistem pangan dan pertanian, maka target

ketahanan pangan global akan sulit dicapai, bahkan semakin banyak orang akan jatuh ke dalam kelaparan ekstrem.

1. Pertumbuhan Populasi dan Tekanan terhadap Produksi Pangan

Pertumbuhan populasi yang pesat menjadi salah satu tantangan terbesar dalam memastikan kecukupan pangan global. Proyeksi dari Perserikatan Bangsa-Bangsa (UN, 2022) menunjukkan bahwa pada tahun 2050, populasi dunia diperkirakan akan mencapai lebih dari 9,7 miliar jiwa, yang berarti ada peningkatan permintaan pangan sekitar 60% dibandingkan dengan tahun 2005. Hal ini memberikan tekanan besar pada sistem pertanian yang sudah terhimpit oleh masalah lingkungan dan keterbatasan sumber daya alam. Di sisi lain, perubahan pola konsumsi dan preferensi masyarakat semakin memperburuk tantangan dalam menyediakan pangan yang cukup dan bergizi untuk semua orang.

Peningkatan permintaan pangan tersebut harus diimbangi dengan upaya untuk menjaga keberlanjutan ekosistem. Degradasi tanah, perubahan iklim, dan penurunan kesuburan tanah menjadi hambatan besar yang memengaruhi produktivitas pertanian. Menurut FAO (2020), penggunaan lahan yang semakin intensif serta pengabaian praktik pertanian ramah lingkungan dapat menyebabkan penurunan hasil pertanian dalam jangka panjang. Selain itu, peralihan dari lahan pertanian ke penggunaan lain, seperti pembangunan perumahan dan industri, semakin memperparah keterbatasan lahan subur yang tersedia untuk produksi pangan.

Sistem pertanian perlu bertransformasi agar dapat mencapainya tujuan tersebut tanpa merusak lingkungan. Transformasi ini mencakup peningkatan efisiensi penggunaan lahan dan air, serta adopsi teknologi pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. FAO (2020) menekankan pentingnya pengembangan teknik pertanian yang lebih efisien, seperti pertanian presisi, serta peningkatan praktik pertanian yang mengutamakan konservasi sumber daya alam dan mitigasi perubahan iklim. Hanya dengan pendekatan yang holistik dan inovatif, kita dapat memenuhi kebutuhan pangan masa depan tanpa merusak planet ini.

2. Perubahan Iklim dan Dampaknya terhadap Pertanian

Perubahan iklim telah menjadi ancaman serius bagi ketahanan pangan global, dengan dampak yang semakin dirasakan oleh sektor

pertanian. Kenaikan suhu global, perubahan pola hujan, dan meningkatnya frekuensi bencana alam seperti kekeringan, banjir, dan badai telah mengganggu sistem pertanian yang bergantung pada kondisi iklim yang stabil. Sebagai contoh, peningkatan suhu yang drastis di berbagai wilayah mengarah pada penurunan hasil panen tanaman pangan penting seperti gandum dan jagung. Masson-Delmotte et al. (2021) melaporkan bahwa perubahan ini dapat memperburuk kerawanan pangan, terutama di daerah yang sudah rentan terhadap perubahan iklim.

Penurunan hasil panen akibat perubahan iklim telah diprediksi oleh beberapa studi, termasuk penelitian yang dilakukan oleh Lobell et al. (2011), yang menunjukkan bahwa produksi gandum dan jagung dapat berkurang secara signifikan di banyak wilayah dunia. Di Afrika Sub-Sahara, misalnya, tanpa adanya adaptasi yang tepat, produksi biji-bijian utama diperkirakan dapat turun hingga 20% pada tahun 2050. Penurunan ini akan sangat mempengaruhi ketersediaan pangan global dan meningkatkan ketidakstabilan harga pangan. Oleh karena itu, diperlukan strategi yang efektif untuk mengurangi dampak perubahan iklim dan mempertahankan kapasitas produksi pertanian.

Sektor peternakan juga menghadapi tantangan besar akibat perubahan iklim. Suhu yang ekstrem dapat menyebabkan stres termal pada hewan ternak, yang pada gilirannya mengurangi efisiensi reproduksi dan meningkatkan kerentanannya terhadap penyakit zoonosis, yang dapat menular ke manusia. Thornton et al. (2015) mengungkapkan bahwa perubahan iklim dapat mempengaruhi kesehatan dan produktivitas ternak, yang berisiko mengancam pasokan protein hewani di masa depan.

3. Degradasi Lahan dan Sumber Daya Alam

Degradasi lahan menjadi salah satu tantangan terbesar yang dihadapi oleh pertanian global saat ini. Berbagai faktor, termasuk intensifikasi pertanian tanpa kontrol yang memadai, deforestasi, serta penggunaan pupuk dan pestisida kimia yang berlebihan, telah menyebabkan kerusakan parah pada lebih dari 33% lahan pertanian dunia. Praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, seperti monokultur, penggembalaan yang berlebihan, dan penanaman tanaman yang tidak sesuai dengan jenis tanah, turut memperburuk kondisi ini. Akibatnya, banyak tanah yang kehilangan kesuburannya, mengurangi kemampuan

untuk mendukung produksi pangan yang cukup untuk populasi yang terus berkembang.

Degradasi tanah tidak hanya berdampak pada penurunan produktivitas pertanian, tetapi juga menyebabkan hilangnya keanekaragaman hayati yang sangat penting bagi keseimbangan ekosistem. Kehilangan keanekaragaman hayati ini berpotensi mengurangi kemampuan alam untuk menyediakan jasa ekosistem yang mendukung pertanian, seperti penyerbukan dan pengendalian hama alami. Selain itu, degradasi tanah juga mengganggu siklus air, yang mempengaruhi kualitas dan kuantitas sumber daya air yang tersedia untuk pertanian dan kebutuhan manusia lainnya.

Krisis air yang terkait dengan degradasi lahan menjadi isu global yang semakin mendesak. Pertanian menyumbang sekitar 70% konsumsi air tawar dunia, namun jumlah sumber daya air yang tersedia semakin terbatas akibat eksploitasi yang berlebihan, polusi, dan dampak perubahan iklim. Wilayah-wilayah seperti Asia Selatan dan Timur Tengah diperkirakan akan menghadapi krisis air yang parah dalam dekade mendatang, yang dapat menghambat produksi pangan secara signifikan. Mengingat ketergantungan besar pertanian pada air, keberlanjutan produksi pangan akan sangat dipengaruhi oleh upaya untuk mengatasi masalah degradasi lahan dan pengelolaan sumber daya air yang lebih efisien.

4. Ketergantungan terhadap Input Eksternal dan Volatilitas Pasar

Modernisasi pertanian melalui Revolusi Hijau telah membawa perubahan besar dalam cara pertanian dijalankan. Salah satu dampaknya adalah meningkatnya ketergantungan terhadap input eksternal seperti pupuk kimia, pestisida, dan benih hibrida yang dirancang untuk meningkatkan hasil panen secara signifikan. Meskipun peningkatan hasil pertanian tercapai, ketergantungan ini juga menyebabkan biaya produksi yang tinggi, membuat sektor pertanian rentan terhadap volatilitas harga input tersebut di pasar global. Dalam jangka panjang, ketergantungan ini berisiko memperburuk ketahanan pangan, terutama di negara-negara berkembang yang memiliki keterbatasan dalam mengakses sumber daya ini.

Fluktuasi harga pasar global, seperti yang terjadi pada krisis pangan 2007–2008 dan 2010–2011, telah menunjukkan betapa rentannya ketahanan pangan nasional terhadap sistem pasar

internasional. Kenaikan harga pangan yang tajam selama periode tersebut menyebabkan kelangkaan pangan, memperburuk kemiskinan, dan meningkatkan ketegangan sosial di banyak negara. Ketergantungan pada input pertanian eksternal juga memperburuk situasi, karena perubahan harga pupuk dan bahan baku lainnya mempengaruhi biaya produksi dan stabilitas harga pangan domestik.

Ketergantungan terhadap pasar global semakin diperparah oleh ketegangan geopolitik, seperti yang terlihat dalam konflik Rusia–Ukraina pada 2022. Perang ini menyebabkan gangguan besar dalam pasokan gandum, pupuk, dan energi yang penting bagi sektor pertanian di seluruh dunia. Gangguan tersebut mengarah pada lonjakan harga pangan global dan kesulitan bagi negara-negara yang bergantung pada impor.

5. Ketimpangan Distribusi dan Akses terhadap Pangan

Meskipun produksi pangan global saat ini cukup untuk memenuhi kebutuhan seluruh populasi dunia, ketimpangan distribusi dan akses terhadap pangan tetap menjadi masalah besar yang menghambat upaya pengentasan kelaparan. Laporan *Global Hunger Index* (GHI, 2022) mencatat bahwa lebih dari 828 juta orang di dunia masih mengalami kelaparan kronis, sementara 1,9 miliar orang lainnya menderita kelebihan berat badan atau obesitas. Fenomena ini menggambarkan paradoks pangan global, di mana di satu sisi terdapat kelebihan pangan, namun di sisi lain, masih ada banyak individu yang tidak memiliki akses terhadap pangan yang cukup dan bergizi. Ketimpangan ini disebabkan oleh berbagai faktor, termasuk inefisiensi sistem distribusi pangan dan hambatan dalam akses terhadap sumber daya yang diperlukan untuk produksi dan konsumsi pangan.

Salah satu penyebab utama ketimpangan distribusi adalah ketidakmerataan infrastruktur logistik yang ada. Negara-negara berkembang seringkali menghadapi tantangan besar dalam hal infrastruktur transportasi, penyimpanan, dan pengolahan pangan yang efisien. Hal ini mengakibatkan tingginya tingkat pemborosan pangan, terutama di kawasan pedesaan, sementara daerah perkotaan mengalami kelangkaan pangan berkualitas. Di banyak daerah, jaringan distribusi yang buruk dan tidak adanya sistem yang memadai untuk menghubungkan produsen dengan konsumen semakin memperburuk

kesenjangan akses terhadap pangan, sehingga memengaruhi ketahanan pangan di tingkat rumah tangga.

Faktor sosial-ekonomi juga berperan penting dalam memperburuk ketimpangan distribusi pangan. Di negara-negara berkembang, petani kecil sering kali terhambat oleh keterbatasan dalam akses terhadap teknologi pertanian modern, informasi pasar, dan modal untuk investasi dalam peningkatan produktivitas. Kurangnya pengetahuan tentang praktik pertanian berkelanjutan dan keterbatasan dalam akses terhadap pasar membuatnya terperangkap dalam kemiskinan dan kerentanannya terhadap fluktuasi harga pangan global.

6. Kurangnya Regenerasi Petani dan Krisis Tenaga Kerja

Sektor pertanian saat ini tengah menghadapi krisis regenerasi petani, yang mengancam kelangsungan produksi pangan di masa depan. Salah satu masalah utama adalah kurangnya minat dari generasi muda untuk terlibat dalam pertanian. Sektor ini sering dipandang sebagai pekerjaan yang tidak menguntungkan secara ekonomi dan sosial, dengan penghasilan yang rendah dan kondisi kerja yang berat. Data dari International Labour Organization (ILO, 2021) menunjukkan bahwa jumlah tenaga kerja muda di sektor pertanian terus menurun secara signifikan, terutama di kawasan Asia dan Afrika. Keengganan generasi muda untuk bekerja di pertanian ini semakin memperburuk masalah ketahanan pangan global, karena sektor pertanian membutuhkan keberlanjutan tenaga kerja yang kompeten dan terampil.

Fenomena urbanisasi yang cepat juga menjadi faktor yang memperburuk krisis regenerasi petani. Dengan semakin banyaknya orang muda yang memilih untuk bekerja di kota, sektor pertanian kehilangan potensi sumber daya manusia yang dapat meningkatkan produktivitas dan inovasi di lapangan. Perubahan struktur ekonomi nasional, dengan fokus yang lebih besar pada sektor industri dan jasa, juga berkontribusi pada penurunan minat terhadap pertanian. Tanpa adanya kebijakan yang mendorong pertanian sebagai sektor yang menarik dan menguntungkan bagi generasi muda, diperkirakan dalam dua dekade mendatang, dunia akan menghadapi kekurangan petani yang produktif dan terampil.

7. Ketahanan Terhadap Risiko Bencana dan Pandemi

Pandemi COVID-19 telah memberikan gambaran jelas tentang kerentanannya sistem pangan global terhadap berbagai jenis guncangan. Pembatasan pergerakan tenaga kerja, gangguan rantai pasokan, serta penurunan daya beli konsumen telah menyebabkan kerugian besar bagi petani dan nelayan di seluruh dunia. Jutaan petani kehilangan pendapatannya karena kesulitan distribusi dan ketidakmampuan untuk memasarkan produknya, sementara harga pangan meroket di banyak negara. FAO (2020) melaporkan bahwa dampak dari pandemi ini sangat mendalam, tidak hanya pada ketahanan pangan tetapi juga pada ketahanan ekonomi masyarakat pedesaan yang bergantung pada pertanian dan perikanan sebagai sumber utama mata pencaharian.

Krisis yang diakibatkan oleh pandemi ini menunjukkan betapa pentingnya membangun sistem pertanian yang tidak hanya fokus pada produktivitas, tetapi juga pada ketahanan dan daya tangkal terhadap guncangan eksternal. Dalam menghadapi risiko seperti pandemi, perubahan iklim, dan konflik geopolitik, sektor pertanian harus memiliki fleksibilitas dan adaptasi yang tinggi. Sistem pertanian yang tangguh perlu mengadopsi teknologi yang dapat mengatasi tantangan semacam ini, seperti digitalisasi dalam rantai pasok, serta pengembangan kebijakan yang memperkuat sistem distribusi pangan lokal dan global.

D. Tujuan dan Manfaat Buku

Perubahan global yang cepat dalam bidang teknologi, lingkungan, dan sosial-ekonomi telah menempatkan sektor pertanian di titik transisi penting. Sektor ini dituntut tidak hanya untuk memenuhi kebutuhan pangan dunia yang terus meningkat, tetapi juga untuk menjaga kelestarian lingkungan dan meningkatkan kesejahteraan petani. Dalam konteks ini, buku "Agroteknologi Modern: Inovasi dan Aplikasi untuk Pertanian Berkelanjutan" disusun untuk menjawab kebutuhan akan referensi akademik dan praktis terkait penerapan teknologi terkini dalam pertanian berkelanjutan.

1. Tujuan Penulisan Buku

Tujuan penulisan buku ini dibagi ke dalam dua kategori besar, yaitu tujuan umum dan tujuan khusus.

a. Tujuan Umum

Secara umum, buku ini bertujuan untuk:

1) Menyediakan sumber referensi ilmiah dan praktis bagi akademisi, peneliti, mahasiswa, pembuat kebijakan, serta praktisi pertanian terkait pemanfaatan agroteknologi untuk mendukung sistem pertanian berkelanjutan.
2) Menawarkan kerangka konseptual dan aplikatif mengenai integrasi antara inovasi teknologi dan prinsip-prinsip keberlanjutan dalam bidang pertanian.
3) Menstimulasi transformasi pertanian tradisional menjadi pertanian berbasis sains dan teknologi yang efisien, tangguh, dan inklusif.

b. Tujuan Khusus

Sementara itu, tujuan khusus dari buku ini meliputi:

1) Menyajikan definisi dan ruang lingkup agroteknologi modern, termasuk klasifikasi teknologi dan aplikasinya dalam budidaya pertanian, peternakan, perikanan, dan kehutanan.
2) Menggambarkan tantangan global dan lokal dalam sektor pertanian, seperti degradasi lahan, perubahan iklim, dan keterbatasan akses petani kecil terhadap teknologi.
3) Menguraikan berbagai inovasi teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), sistem pertanian presisi, dan bioteknologi dalam mendukung pertanian cerdas (*smart farming*).
4) Menjelaskan kebijakan, sistem pendukung, dan infrastruktur kelembagaan yang diperlukan untuk adopsi agroteknologi secara luas di negara berkembang.
5) Memberikan studi kasus dan praktik baik (*best practices*) dari penerapan agroteknologi di berbagai wilayah, baik lokal maupun global.
6) Menawarkan rekomendasi strategis untuk pengembangan pertanian berkelanjutan berbasis teknologi, termasuk dalam konteks pembelajaran, riset, dan advokasi.

2. Manfaat Buku

Buku ini diharapkan memberikan manfaat dalam tiga lingkup utama: akademik, praktis, dan kebijakan.

a. Manfaat Akademik
   1) Sumber literatur ilmiah terbaru yang relevan dengan perkembangan teknologi pertanian modern dan pembangunan berkelanjutan.
   2) Mendukung kegiatan pembelajaran di perguruan tinggi dalam program studi pertanian, teknologi pangan, agroekoteknologi, agribisnis, dan lingkungan hidup.
   3) Mendorong pengembangan penelitian interdisipliner yang mengkaji keterkaitan antara teknologi, ekologi, dan kesejahteraan petani.

b. Manfaat Praktis
   1) Memberikan panduan teknis bagi petani, penyuluh, dan pelaku usaha tani tentang bagaimana mengimplementasikan teknologi pertanian modern sesuai dengan karakteristik lokal.
   2) Menyediakan wawasan mengenai efisiensi produksi, manajemen input, serta peningkatan kualitas dan kuantitas hasil panen.
   3) Meningkatkan kesadaran pelaku sektor pertanian terhadap pentingnya adaptasi teknologi sebagai strategi menghadapi risiko iklim dan volatilitas pasar.

c. Manfaat Kebijakan
   1) Memberikan masukan bagi pengambil kebijakan dalam merancang strategi pertanian nasional yang berbasis inovasi dan digitalisasi.
   2) Menyediakan argumen ilmiah untuk mendukung subsidi teknologi bagi petani kecil, penguatan infrastruktur digital desa, dan pengembangan riset agroteknologi.
   3) Membantu penyusunan kebijakan pembangunan pertanian berkelanjutan yang sejalan dengan SDGs dan Paris Agreement terkait adaptasi perubahan iklim.

BAB II
DASAR-DASAR AGROTEKNOLOGI

Agroteknologi merupakan cabang ilmu yang menggabungkan pengetahuan tentang teknologi dan ilmu pertanian untuk mengoptimalkan produksi pertanian secara efisien dan berkelanjutan. Pada Bab II ini, akan dibahas secara mendalam tentang dasar-dasar agroteknologi, yang meliputi perkembangan sejarahnya, konsep pertanian berkelanjutan, serta prinsip-prinsip ekologi dan efisiensi dalam penerapannya. Dasar-dasar ini sangat penting untuk memahami bagaimana teknologi diterapkan dalam sistem pertanian modern untuk menghadapi tantangan global dalam sektor pertanian.

Seiring dengan berkembangnya teknologi, sektor pertanian mengalami transformasi yang signifikan. Salah satu aspek utama yang dibahas adalah perbedaan antara teknologi konvensional dan teknologi modern yang kini diterapkan di lapangan. Teknologi modern memungkinkan peningkatan hasil pertanian dengan cara yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Agroteknologi modern memanfaatkan inovasi-inovasi seperti sensor cerdas, sistem irigasi otomatis, dan teknologi pengolahan pascapanen yang lebih efisien untuk mengurangi pemborosan dan meningkatkan produktivitas.

A. Sejarah Perkembangan Teknologi Pertanian

Teknologi pertanian telah menjadi tulang punggung peradaban manusia sejak era prasejarah hingga revolusi industri dan transformasi digital saat ini. Perjalanan sejarah teknologi pertanian mencerminkan proses panjang adaptasi manusia terhadap lingkungan serta upaya peningkatan efisiensi dan produktivitas pangan. Setiap fase sejarah memperlihatkan bagaimana teknologi berperan penting dalam menciptakan sistem pertanian yang lebih berdaya guna dan berkelanjutan (Pingali, 2012). Dalam konteks ini, memahami sejarah

perkembangan teknologi pertanian adalah fondasi penting untuk mengidentifikasi arah inovasi ke depan. Penguasaan sejarah ini membantu kita memahami keberhasilan dan kegagalan masa lalu serta memproyeksikan strategi terbaik untuk masa depan pertanian global.

1. Era Prasejarah dan Revolusi Neolitik

Era prasejarah dan Revolusi Neolitik menandai salah satu tonggak penting dalam sejarah perkembangan teknologi pertanian. Sekitar 10.000 tahun yang lalu, manusia mulai beralih dari kehidupan nomaden ke pola hidup menetap yang bergantung pada pertanian. Perubahan besar ini terjadi di wilayah yang dikenal sebagai Bulan Sabit Subur, yang mencakup bagian dari Timur Tengah, di mana domestikasi tanaman seperti gandum, barley, dan legum pertama kali dilakukan. Proses domestikasi ini memudahkan manusia untuk memperoleh sumber pangan secara lebih teratur dan stabil, yang menjadi dasar bagi perkembangan peradaban berikutnya (Fuller et al., 2014).

Pada tahap awal ini, teknologi pertanian yang digunakan sangat sederhana. Alat pertanian dibuat dari batu dan kayu, seperti cangkul dan bajak primitif, yang digunakan untuk membajak tanah dan menanam benih. Meskipun alat ini tidak sekompleks yang ada saat ini, penggunaannya sudah mulai menunjukkan pemahaman manusia terhadap pentingnya pengolahan tanah untuk meningkatkan hasil pertanian. Sumber daya alam yang ada di sekitar, seperti batu, kayu, dan tulang hewan, menjadi bahan dasar pembuatan alat yang digunakan dalam berbagai tahap produksi pangan.

Pengembangan sistem irigasi juga menjadi inovasi penting pada masa ini, terutama di wilayah Mesopotamia dan Mesir Kuno. Sistem irigasi primitif, seperti saluran air yang menggali atau menyalurkan air dari sungai ke lahan pertanian, membantu mengatasi tantangan cuaca dan keterbatasan air di daerah kering. Di Mesopotamia, teknologi irigasi ini mendukung pertanian yang berkelanjutan dengan memastikan bahwa tanaman mendapatkan pasokan air yang cukup, meskipun curah hujan tidak teratur.

Dengan perkembangan teknologi pertanian pada masa Revolusi Neolitik, manusia mulai mampu menghasilkan pangan secara berlebihan, yang memungkinkan untuk mendukung populasi yang lebih besar dan membentuk masyarakat yang lebih kompleks. Keberhasilan dalam domestikasi tanaman dan pengelolaan air memberi manusia

kapasitas untuk mengembangkan peradaban yang lebih maju, membuka jalan bagi inovasi lebih lanjut dalam bidang pertanian dan teknologi yang terus berkembang sepanjang sejarah.

2. Era Klasik hingga Pertengahan

Pada masa peradaban Yunani dan Romawi, teknologi pertanian mengalami kemajuan signifikan dengan diterapkannya alat dan sistem baru yang meningkatkan efisiensi produksi pangan. Salah satu inovasi utama adalah penggunaan bajak logam, yang menggantikan bajak kayu. Bajak logam memiliki kemampuan untuk menggemburkan tanah lebih dalam dan lebih cepat, memungkinkan petani untuk mengolah tanah dengan lebih efisien. Selain itu, rotasi tanaman mulai diterapkan, suatu metode yang membantu menjaga kesuburan tanah dan mengurangi ketergantungan pada satu jenis tanaman. Sistem irigasi yang lebih kompleks juga dikembangkan, seperti kanal-kanal yang dibangun untuk mengalirkan air dari sungai ke ladang pertanian, yang meningkatkan hasil pertanian di daerah yang lebih kering (Bray, 2023).

Di Asia, terutama di Tiongkok dan India, teknologi pertanian berkembang dengan sangat pesat. Tiongkok, misalnya, mengembangkan sistem pertanian sawah terasering, yang memungkinkan pengelolaan air secara efisien di wilayah yang berbukit. Selain itu, penggunaan pupuk alami seperti kotoran hewan untuk memperbaiki kualitas tanah juga menjadi praktik umum di wilayah ini. Di India, sistem irigasi dengan saluran terbuka digunakan untuk mendistribusikan air dari sungai ke ladang pertanian, yang mendukung produksi pangan secara berkelanjutan. Tenaga hewan, seperti sapi dan kerbau, juga digunakan untuk membajak tanah, yang meningkatkan efisiensi pengolahan lahan.

Di Eropa Abad Pertengahan, sistem pertanian mengalami peningkatan berkat penerapan sistem tiga lapangan (*three-field system*). Metode ini membagi lahan pertanian menjadi tiga bagian: satu bagian untuk tanaman musim semi, satu bagian untuk tanaman musim gugur, dan satu bagian dibiarkan tidak ditanam untuk memungkinkan pemulihan kesuburan tanah. Penggunaan bajak berat, yang lebih efektif dalam menggemburkan tanah keras di Eropa Utara, juga menjadi inovasi penting pada masa ini, yang secara langsung meningkatkan hasil pertanian.

Di Indonesia, sistem pertanian tradisional seperti subak di Bali merupakan contoh integrasi antara budaya, agama, dan pertanian. Sistem

subak mengatur pengelolaan air irigasi dengan prinsip gotong royong, di mana komunitas bekerja bersama untuk memastikan distribusi air yang adil dan efisien ke seluruh ladang sawah. Hal ini bukan hanya menunjukkan keterampilan teknis dalam pengelolaan sumber daya alam, tetapi juga mencerminkan nilai sosial dan budaya yang mendalam dalam kehidupan pertanian masyarakat Bali (Lansing, 2012). Integrasi ini menjadi kunci keberlanjutan pertanian di Bali yang telah bertahan selama berabad-abad.

3. Revolusi Industri dan Pertanian Modern Awal (Abad ke-18–19)

Revolusi Industri yang terjadi pada abad ke-18 membawa dampak besar terhadap sektor pertanian di Eropa. Sebelum revolusi ini, pertanian masih bergantung pada tenaga manusia dan hewan, dengan metode yang relatif sederhana dan terbatas. Namun, dengan diperkenalkannya mesin-mesin baru, sektor pertanian mulai mengalami perubahan besar. Salah satu inovasi penting adalah pengenalan bajak besi oleh John Deere pada tahun 1837, yang menggantikan bajak kayu tradisional. Bajak besi ini memungkinkan petani untuk mengolah tanah yang lebih keras dan luas dengan lebih efisien. Selain itu, Jethro Tull mengembangkan seed drill, alat untuk menanam benih secara lebih teratur dan dengan kedalaman yang tepat, sehingga meningkatkan keberhasilan tanaman dan hasil panen.

Dengan semakin banyaknya penggunaan mesin, sistem pertanian pun mengalami transformasi besar. Pengenalan traktor uap pada abad ke-19, misalnya, menggantikan tenaga manusia dan hewan dalam mengolah tanah dan memanen. Traktor uap memungkinkan petani untuk mengerjakan lahan yang lebih luas dalam waktu yang lebih singkat dan dengan biaya yang lebih rendah. Sistem pertanian yang sebelumnya sangat bergantung pada musim dan cuaca mulai lebih terorganisir berkat penggunaan mesin-mesin ini, yang membantu meningkatkan efisiensi produksi pertanian secara signifikan.

Pada masa yang sama, Revolusi Pertanian Kedua mulai berlangsung. Dalam periode ini, petani mulai mengintegrasikan teknologi mekanisasi yang lebih canggih, seperti traktor, alat pemanen mekanis, dan mesin penggilingan. Selain itu, teknik pemupukan dengan bahan kimia buatan juga mulai diperkenalkan untuk meningkatkan hasil panen. Penggunaan pupuk kimia, yang mengandung unsur-unsur penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium, membantu meningkatkan kesuburan

tanah dan hasil tanaman secara signifikan, sekaligus mengurangi ketergantungan pada pupuk organik (Pingali, 2012).

Revolusi ini juga memicu perubahan dalam struktur pertanian secara keseluruhan. Dengan semakin efisiennya produksi, lahan pertanian yang lebih luas dapat dikelola dengan lebih baik, dan hasil panen meningkat pesat. Ini mengarah pada perkembangan sistem pertanian berbasis industri, yang tidak hanya mengandalkan kerja manual, tetapi juga teknologi dan mekanisasi dalam proses produksi. Meskipun ini membawa banyak keuntungan, seperti peningkatan hasil pangan dan efisiensi biaya, dampaknya terhadap tenaga kerja dan keberlanjutan pertanian juga mulai dipertanyakan, terutama karena mekanisasi menggantikan banyak pekerjaan manusia di sektor pertanian.

4. Revolusi Hijau (*Green Revolution*) – Pertengahan Abad ke-20

Revolusi Hijau, yang dimulai pada 1940-an hingga 1970-an, merupakan perubahan besar dalam sektor pertanian dunia. Dengan dukungan dari lembaga-lembaga internasional seperti *International Rice Research Institute* (IRRI) dan *Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo* (CIMMYT), pengembangan varietas unggul (*High Yielding Varieties*, HYV) yang tahan terhadap penyakit dan lebih produktif menjadi kunci utama. Program ini berhasil meningkatkan produksi pangan secara signifikan di banyak negara berkembang, termasuk Indonesia, India, dan Meksiko. Penerapan teknologi pertanian modern, seperti penggunaan pupuk kimia, pestisida, dan sistem irigasi yang lebih efisien, memungkinkan petani untuk meningkatkan hasil panen secara drastis, mengatasi kelangkaan pangan, dan memperbaiki ketahanan pangan global (Evenson & Gollin, 2003).

Di Indonesia, Revolusi Hijau tercermin dalam program Bimbingan Massal (Bimas) dan Intensifikasi Masal (Inmas) yang diluncurkan oleh pemerintah Orde Baru. Program ini, yang dimulai pada 1960-an, bertujuan untuk meningkatkan produksi padi melalui pemanfaatan varietas unggul, pupuk kimia, dan teknik irigasi modern. Hasilnya, produksi padi Indonesia meningkat pesat, dan negara ini bahkan mencapai swasembada pangan pada 1984. Masyarakat petani mendapatkan akses lebih besar terhadap teknologi pertanian, yang meningkatkan kesejahteraan dalam jangka pendek.

Meskipun Revolusi Hijau membawa keberhasilan dalam hal peningkatan produksi pangan, penggunaan input kimia yang berlebihan

membawa dampak negatif terhadap lingkungan. Pencemaran air akibat penggunaan pupuk kimia yang tidak terkontrol menjadi masalah besar, yang berujung pada penurunan kualitas sumber daya air. Selain itu, pestisida yang digunakan secara intensif menyebabkan munculnya resistensi hama, yang justru memperburuk ketergantungan terhadap bahan kimia. Degradasi tanah akibat pemakaian pupuk kimia yang berlebihan juga semakin memperburuk keadaan, mengurangi kesuburan tanah yang esensial untuk pertanian jangka panjang (Tilman et al., 2011).

Keberhasilan Revolusi Hijau juga mengungkap ketergantungan yang besar terhadap teknologi dan input eksternal dalam sektor pertanian. Meskipun produksi pangan meningkat, masalah ketimpangan sosial dan ketergantungan pada pasar global menjadi tantangan baru. Petani kecil dan miskin seringkali kesulitan mengakses teknologi dan sumber daya yang diperlukan, sementara pemanfaatan varietas unggul yang lebih mahal tidak selalu menguntungkan baginya. Sehingga, meskipun produksi pangan mengalami lonjakan yang signifikan, ketahanan pangan yang berkelanjutan dan ramah lingkungan menjadi tantangan yang harus dihadapi pada masa mendatang.

5. Era Bioteknologi dan Pertanian Presisi (1980–2000)

Pada dekade 1980-an, perkembangan bioteknologi di bidang pertanian membawa perubahan signifikan melalui pengenalan tanaman transgenik atau *Genetically Modified Organisms* (GMO). Teknologi ini memungkinkan tanaman untuk dimodifikasi secara genetik untuk memperoleh sifat-sifat tertentu yang menguntungkan, seperti ketahanan terhadap hama, penyakit, dan herbisida. Tanaman seperti jagung, kedelai, dan kapas yang telah dimodifikasi genetiknya mulai banyak ditanam, terutama di Amerika Serikat, yang merupakan pionir dalam penerapan teknologi ini. GMO menawarkan potensi peningkatan hasil pertanian dan pengurangan penggunaan pestisida serta herbisida, meskipun kontroversi mengenai dampak jangka panjang terhadap kesehatan dan lingkungan masih berlanjut (Briefs, 2017).

Salah satu manfaat utama dari tanaman GMO adalah peningkatan ketahanan terhadap hama dan penyakit, yang memungkinkan petani untuk mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia. Misalnya, jagung yang dimodifikasi untuk mengandung racun alami terhadap hama tertentu, seperti jagung Bt, membantu menurunkan kerugian akibat serangan hama. Selain itu, tanaman transgenik yang tahan terhadap

herbisida memungkinkan petani untuk mengelola gulma dengan lebih efektif, tanpa merusak tanaman utama. Meskipun demikian, pertanyaan mengenai dampak ekologis dan risiko terhadap keanekaragaman hayati masih menjadi perdebatan di kalangan ilmuwan dan masyarakat.

Pada akhir abad ke-20, konsep pertanian presisi (precision agriculture) mulai muncul sebagai metode yang lebih efisien dan berbasis teknologi dalam mengelola lahan pertanian. Teknologi ini menggunakan data spasial, sensor, dan perangkat berbasis GPS untuk memantau kondisi tanaman dan lahan secara real-time. Dengan bantuan perangkat lunak pemetaan dan sensor, petani dapat mengoptimalkan penggunaan air, pupuk, dan pestisida, sehingga mengurangi pemborosan dan meningkatkan hasil panen. Pertanian presisi juga memungkinkan pengelolaan lahan yang lebih berkelanjutan dengan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

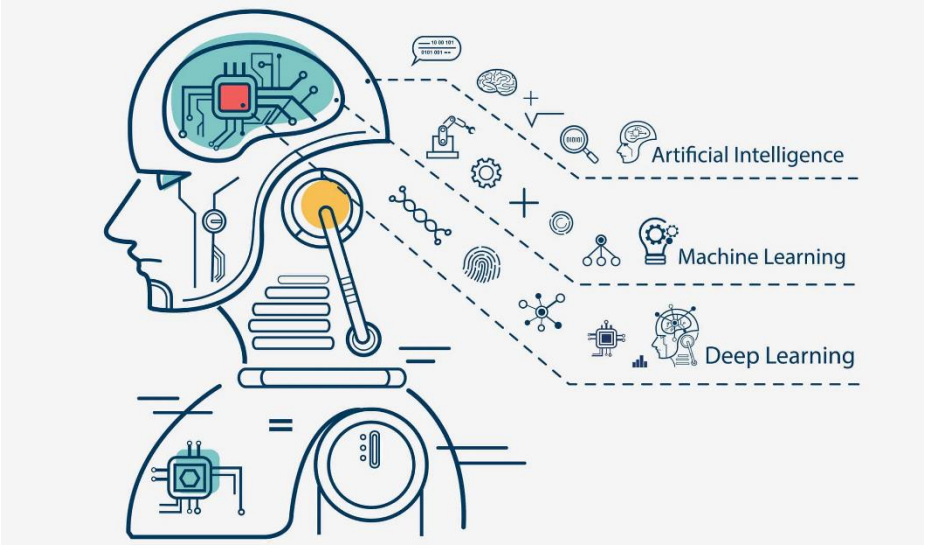
Penerapan teknologi pertanian presisi memungkinkan petani untuk mengelola lahan dengan cara yang lebih cerdas dan efisien. Misalnya, sensor yang dipasang di lapangan dapat mengukur kelembaban tanah, suhu, dan kondisi lainnya, memberi petani informasi yang diperlukan untuk mengatur penggunaan air dan pupuk sesuai dengan kebutuhan spesifik tanaman di setiap area. Hal ini tidak hanya menghemat biaya dan sumber daya, tetapi juga membantu menjaga keseimbangan ekosistem pertanian. Meskipun awalnya teknologi ini lebih banyak diterapkan di negara-negara maju, kemajuan dalam teknologi dan penurunan biaya perangkat membuat pertanian presisi semakin dapat diakses oleh petani di negara berkembang, yang pada gilirannya memperkenalkan pendekatan pertanian yang lebih berbasis data dan berkelanjutan.

6. Pertanian Digital dan Revolusi Industri 4.0 (2010–Sekarang)

Masuknya era digital dan Revolusi Industri 4.0 menandai perubahan besar dalam sektor pertanian yang kini dikenal dengan istilah Agriculture 4.0. Pertanian modern saat ini semakin mengandalkan teknologi canggih seperti kecerdasan buatan (AI), *Internet of Things* (IoT), dan *big data* untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Teknologi-teknologi ini memungkinkan pengumpulan dan analisis data secara real-time, yang membantu petani dalam pengambilan keputusan yang lebih tepat dan berbasis data. Penggunaan drone, sensor tanah, dan satelit telah mengubah cara petani memonitor dan mengelola lahannya.

Dengan alat ini, petani dapat memperoleh informasi terkait kondisi tanah, kelembapan, suhu, dan kebutuhan tanaman secara lebih efisien, yang pada gilirannya meningkatkan hasil pertanian dan mengurangi kerugian (Wolfert et al., 2017).

Gambar 4. Kecerdasan Buatan



Sumber: *Course Net*

Salah satu contoh penerapan teknologi canggih adalah sistem smart irrigation berbasis IoT yang memungkinkan penyiraman tanaman dilakukan secara otomatis berdasarkan kelembapan tanah yang terukur secara real-time. Dengan teknologi ini, penggunaan air dapat lebih efisien, mengurangi pemborosan, dan membantu petani mengelola sumber daya alam yang semakin terbatas. Selain itu, perkembangan alat pertanian otonom seperti traktor tanpa pengemudi dan robot pemanen juga mulai diterapkan di negara-negara maju. Teknologi ini menggantikan sebagian besar pekerjaan manual, meningkatkan produktivitas, dan mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manusia yang semakin terbatas (Klerkx et al., 2019).

Di negara berkembang seperti Indonesia, adopsi teknologi digital di sektor pertanian menghadapi berbagai tantangan. Salah satu hambatan utama adalah rendahnya literasi digital di kalangan petani, yang membuatnya kesulitan untuk mengoptimalkan potensi teknologi canggih ini. Selain itu, keterbatasan infrastruktur internet di daerah pedesaan dan tingginya biaya investasi awal menjadi penghalang bagi banyak petani untuk mengakses teknologi digital. Meskipun demikian, beberapa inovasi lokal berbasis teknologi mulai berkembang pesat di Indonesia,

dengan hadirnya startup agritech seperti TaniHub dan eFishery yang membantu petani meningkatkan efisiensi melalui platform digital yang menawarkan solusi dalam distribusi, pemasaran, dan pengelolaan hasil pertanian.

Keberhasilan startup agritech ini menunjukkan potensi besar yang dimiliki teknologi digital dalam sektor pertanian Indonesia. Dengan adanya dukungan dari berbagai pihak, termasuk pemerintah dan lembaga keuangan, semakin banyak petani yang mendapatkan akses ke teknologi yang dapat membantunya meningkatkan produktivitas dan pendapatan. Ke depan, penting untuk meningkatkan literasi digital di kalangan petani dan mengembangkan infrastruktur yang memadai agar potensi besar yang ditawarkan oleh Agriculture 4.0 dapat dioptimalkan di seluruh pelosok Indonesia.

B. Konsep Pertanian Berkelanjutan

Menurut *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2014), pertanian berkelanjutan adalah pengelolaan dan konservasi sumber daya alam serta orientasi teknologi dan kelembagaan yang menjamin tercapainya dan dipertahankannya kebutuhan manusia, secara terus menerus bagi generasi sekarang dan mendatang. Meskipun praktik berkelanjutan telah lama dikenal dalam tradisi agrikultur lokal, istilah sustainable agriculture mulai digunakan secara luas sejak tahun 1980-an, terutama sebagai respons terhadap dampak negatif Revolusi Hijau yang memperkenalkan penggunaan besar-besaran pupuk kimia dan pestisida (Conway & Barbie, 1988). Dampak lingkungan seperti pencemaran air, degradasi tanah, dan kehilangan keanekaragaman hayati mendorong munculnya pendekatan pertanian yang lebih berwawasan lingkungan.

Pada tahun 2015, Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) menetapkan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) yang menekankan pentingnya sistem pangan dan pertanian yang berkelanjutan, khususnya dalam Tujuan 2 (*Zero Hunger*) dan Tujuan 12 (*Responsible Consumption and Production*) (UN, 2015). Teknologi berperan penting dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Inovasi seperti pertanian presisi, *Internet of Things* (IoT), dan pemanfaatan *big data* memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data yang meningkatkan efisiensi input dan hasil panen (Wolfert et al., 2017). Contoh penerapan teknologi dalam pertanian berkelanjutan:

1. Sistem Irigasi Tetes dan Irigasi Pintar

Sistem irigasi tetes (*drip irrigation*) adalah teknologi irigasi yang memungkinkan air disalurkan langsung ke akar tanaman dengan cara perlahan melalui pipa atau selang berlubang kecil. Teknologi ini sangat efisien dalam menghemat air karena mengurangi evaporasi dan limpasan, serta mengarahkan air tepat ke titik yang membutuhkan, yaitu akar tanaman. Dengan demikian, irigasi tetes memungkinkan penggunaan air yang lebih hemat dan mengurangi pemborosan. Keunggulan lainnya adalah mengurangi jumlah air yang diperlukan untuk mencapai hasil pertanian yang optimal, sehingga cocok digunakan di wilayah dengan sumber daya air terbatas.

Irigasi pintar (*smart irrigation*) merupakan penerapan teknologi berbasis sensor dan *Internet of Things* (IoT) untuk mengoptimalkan penyiraman tanaman. Sistem ini memanfaatkan sensor kelembapan tanah yang terhubung dengan perangkat lunak untuk menilai kebutuhan air tanaman secara real-time. Berdasarkan data ini, sistem dapat menyesuaikan waktu dan volume air yang diperlukan untuk penyiraman, memastikan bahwa tanaman mendapat pasokan air yang cukup tanpa berlebihan. Hal ini mengarah pada penghematan air yang signifikan dan efisiensi energi, serta mencegah penggunaan air yang tidak perlu (Pernapati, 2018).

2. Pemantauan Tanah dan Cuaca

Pemantauan tanah dan cuaca merupakan elemen penting dalam pertanian modern yang berbasis teknologi. Sensor digital berperan krusial dalam membantu petani untuk memantau kondisi tanah dan cuaca secara real-time. Sensor tanah, seperti sensor kelembapan dan suhu, memberikan data yang akurat mengenai kebutuhan air tanaman dan kondisi fisik tanah. Dengan informasi ini, petani dapat mengatur pola irigasi yang lebih efisien dan menghindari penyiraman berlebihan, yang tidak hanya menghemat air, tetapi juga mengurangi pemborosan energi (Zhang & Kovacs, 2012). Selain itu, sensor pH tanah dan tingkat salinitas juga memungkinkan pemantauan kualitas tanah yang dapat mempengaruhi kesehatan tanaman.

Sensor cuaca seperti stasiun cuaca otomatis, yang mengukur suhu, kelembapan, curah hujan, dan kecepatan angin, memberikan informasi penting mengenai pola cuaca yang dapat mempengaruhi pertumbuhan tanaman. Dengan data cuaca yang terkini, petani dapat

membuat keputusan yang lebih tepat mengenai waktu tanam dan waktu pemanenan, serta memprediksi kemungkinan terjadinya cuaca ekstrem, seperti hujan deras atau kekeringan. Hal ini mengurangi risiko kerugian akibat bencana alam dan meningkatkan ketahanan pangan.

3. Pertanian Vertikal dan Hidroponik

Pertanian vertikal dan hidroponik muncul sebagai solusi inovatif untuk mengatasi keterbatasan lahan, terutama di kawasan perkotaan yang semakin padat penduduknya. Dalam pertanian vertikal, tanaman ditanam dalam lapisan bertingkat, memungkinkan penggunaan ruang vertikal yang terbatas untuk memaksimalkan produksi pangan. Sistem ini dapat diterapkan di area terbatas seperti atap gedung, gudang, atau bahkan ruang dalam ruangan, yang sangat cocok untuk lingkungan perkotaan yang memiliki keterbatasan luas tanah. Melalui penggunaan rak atau sistem bertingkat, pertanian vertikal memungkinkan produksi pangan dalam jumlah besar meski dengan ruang terbatas.

Hidroponik adalah metode bertani tanpa menggunakan tanah, di mana tanaman tumbuh dengan akar yang langsung terendam dalam larutan nutrisi. Sistem ini sangat ideal untuk lahan perkotaan yang tidak memiliki tanah subur, serta dapat diintegrasikan dengan pertanian vertikal untuk meningkatkan efisiensi penggunaan ruang. Tanaman yang tumbuh dalam sistem hidroponik memiliki akses langsung ke nutrisi yang dibutuhkan, yang memungkinkan pertumbuhan yang lebih cepat dan hasil yang lebih optimal dibandingkan dengan pertanian tradisional (Resh, 2022).

4. Pemanfaatan Drone dan Citra Satelit

Pemanfaatan drone dan citra satelit dalam pertanian telah membawa perubahan besar dalam cara petani memantau kesehatan tanaman dan mengelola distribusi pupuk serta pestisida. Drone dilengkapi dengan sensor dan kamera beresolusi tinggi yang memungkinkan pemantauan tanaman secara real-time dengan tingkat presisi yang lebih tinggi. Dengan menggunakan teknologi ini, petani dapat mendeteksi masalah seperti serangan hama, penyakit, atau kekurangan air pada tanaman lebih cepat, bahkan sebelum gejalanya terlihat secara kasat mata. Penggunaan drone juga dapat mencakup pemantauan lahan secara keseluruhan, sehingga memberikan data yang

lebih lengkap untuk membuat keputusan yang lebih baik dalam pengelolaan pertanian (Zhang & Kovacs, 2012).

Citra satelit juga berperan penting dalam pemetaan dan pemantauan kesehatan tanaman dalam skala yang lebih besar. Satelit dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi tanah, kelembapan, serta perubahan suhu di seluruh wilayah pertanian. Dengan analisis citra satelit, petani dapat memperoleh data yang akurat tentang distribusi kelembapan tanah, tingkat vegetasi, dan potensi hasil panen di area yang luas, yang sangat berguna untuk mengoptimalkan penggunaan pupuk dan air. Citra satelit juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi area yang membutuhkan perhatian khusus, seperti daerah yang terkena kekeringan atau hama, dan memberi petani informasi yang relevan untuk bertindak secara tepat.

C. Prinsip Ekologi dan Efisiensi dalam Agroteknologi

Agroteknologi modern bukan hanya tentang penggunaan teknologi canggih dalam sistem pertanian, tetapi juga mencerminkan prinsip dasar ekologi dan efisiensi dalam setiap aspek produksi pertanian. Pendekatan ini menekankan pentingnya integrasi antara sains lingkungan dengan sistem pertanian untuk mencapai keberlanjutan, efisiensi penggunaan sumber daya, dan peningkatan hasil pertanian secara berkelanjutan. Prinsip-prinsip ekologi dalam agroteknologi membantu menjaga keseimbangan alam, sementara efisiensi mengarahkan pada pengelolaan input pertanian (air, energi, pupuk, tenaga kerja) yang optimal (Gliessman, 2021).

1. Prinsip Ekologi dalam Agroteknologi

a. Konsep Ekologi dalam Pertanian

Ekologi dalam pertanian berfokus pada hubungan timbal balik antara organisme yang terlibat dalam sistem pertanian dan lingkungan tempatnya tumbuh. Pendekatan ini melibatkan pemahaman tentang interaksi antara tanaman, hewan, mikroorganisme, dan faktor abiotik seperti tanah, air, dan cuaca. Konsep agroekosistem menekankan pentingnya mempertimbangkan keseluruhan ekosistem dalam merancang sistem pertanian yang berkelanjutan, dengan mengutamakan keseimbangan ekologis. Pendekatan ini juga melibatkan

penerapan prinsip-prinsip ekologis seperti rotasi tanaman, penggunaan pestisida alami, dan konservasi tanah untuk meminimalkan kerusakan pada lingkungan dan menjaga kesuburan tanah dalam jangka panjang (Altieri & Nicholls, 2020).Dengan menerapkan prinsip ekologi, pertanian dapat berkembang menjadi sistem yang tidak hanya produktif tetapi juga mendukung kelestarian lingkungan. Salah satu tujuan utama adalah menciptakan sistem yang mampu mengoptimalkan penggunaan sumber daya alam secara efisien, tanpa merusak struktur ekologis yang mendukungnya.

b. Keanekaragaman Hayati (*Biodiversity*)

Keanekaragaman hayati dalam pertanian berperan penting dalam menciptakan sistem pertanian yang berkelanjutan dan resilien. Dengan mendiversifikasi tanaman dan hewan dalam suatu agroekosistem, pertanian tidak hanya mengurangi ketergantungan pada satu spesies, tetapi juga meningkatkan keragaman genetik yang penting untuk ketahanan terhadap perubahan lingkungan dan penyakit. Selain itu, keberagaman spesies juga memperkaya tanah melalui pengaruh tanaman yang berbeda terhadap struktur dan komposisi mikroorganisme tanah (Gurr et al., 2017).

Sistem pertanian monokultur, yang hanya menanam satu jenis tanaman dalam luas lahan yang besar, sangat rentan terhadap serangan hama dan penyakit, yang dapat merusak hasil panen secara drastis. Sebaliknya, sistem polikultur yang menggabungkan berbagai tanaman dalam satu area lebih mampu bertahan karena memiliki lebih banyak bentuk pertahanan alami, termasuk adanya hubungan simbiotik antara tanaman dan predator alami hama.

c. Siklus Hara Alami

Siklus hara alami adalah proses yang terjadi di alam untuk mengembalikan unsur hara ke dalam tanah tanpa memerlukan input eksternal yang berlebihan. Dalam pertanian, pemanfaatan siklus hara alami dapat mengurangi ketergantungan terhadap pupuk sintetis yang sering kali mahal dan dapat merusak lingkungan. Salah satu cara utama adalah dengan penggunaan pupuk organik dan kompos, yang tidak hanya menyediakan unsur

hara tetapi juga memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air dan udara.

Penanaman tanaman leguminosa, seperti kacang-kacangan, juga sangat penting dalam siklus hara alami. Tanaman ini memiliki kemampuan untuk mengikat nitrogen dari udara melalui simbiosis dengan bakteri pengikat nitrogen yang ada di akar tanaman. Proses ini secara alami meningkatkan kandungan nitrogen dalam tanah, yang merupakan unsur penting untuk pertumbuhan tanaman.

d. Konservasi Tanah dan Air

Konservasi tanah dan air merupakan elemen penting dalam pertanian berbasis ekologi untuk menjaga keberlanjutan produktivitas lahan. Teknik konservasi seperti terasering, penutupan tanah dengan tanaman penutup, dan penggunaan mulsa dapat membantu mengurangi erosi tanah yang sering terjadi pada lahan miring. Teknik-teknik ini juga meningkatkan penyerapan air ke dalam tanah, mengurangi hilangnya unsur hara, serta menjaga kesuburan tanah. Dengan demikian, tanah tetap produktif dalam jangka panjang tanpa mengorbankan kualitas lingkungan.

Efisiensi pengelolaan air juga sangat penting, terutama di daerah yang mengalami kekurangan air. Penggunaan sistem irigasi tetes (*drip irrigation*) memungkinkan distribusi air secara tepat dan efisien ke tanaman, mengurangi pemborosan air dan meningkatkan hasil pertanian. Pengumpulan air hujan juga menjadi solusi alternatif yang efektif untuk mengatasi kekurangan air di musim kering, memungkinkan petani untuk memanfaatkan sumber daya air yang ada secara maksimal.

e. Pengelolaan Hama Terpadu (*Integrated Pest Management*/IPM)

Pengelolaan Hama Terpadu (*Integrated Pest Management*/IPM) adalah pendekatan yang memanfaatkan prinsip ekologi untuk mengendalikan populasi hama dalam agroekosistem. Dalam IPM, pengendalian hama tidak hanya bergantung pada pestisida sintetis, melainkan juga mengintegrasikan berbagai teknik seperti pemanfaatan musuh alami (seperti predator atau parasit hama), rotasi tanaman, dan penggunaan varietas tanaman yang tahan terhadap hama. Pendekatan ini bertujuan untuk menjaga keseimbangan alam di dalam sistem pertanian, mengurangi

ketergantungan pada bahan kimia, dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan.

IPM juga mendorong pengelolaan hama yang lebih ramah lingkungan dengan mengutamakan pencegahan daripada pengendalian setelah serangan terjadi. Dengan meminimalkan penggunaan pestisida sintetis, teknik-teknik ini membantu mengurangi polusi tanah, air, dan udara, serta melindungi keberagaman hayati di dalam agroekosistem. Penggunaan IPM memperkuat konservasi ekosistem pertanian, meningkatkan ketahanan tanaman, dan mendukung keberlanjutan pertanian dalam jangka panjang.

2. Efisiensi dalam Agroteknologi

Efisiensi dalam agroteknologi berkaitan dengan penggunaan optimal input pertanian untuk memperoleh hasil maksimal dengan biaya lingkungan dan sosial yang minimal. Dalam konteks modern, efisiensi tidak hanya diukur dari hasil panen, tetapi juga dari efisiensi energi, air, waktu, tenaga kerja, dan pemanfaatan lahan (Basso & Antle, 2020).

a. Efisiensi Energi

Efisiensi energi dalam agroteknologi berfokus pada pengurangan ketergantungan pada sumber energi fosil yang umumnya digunakan dalam pertanian konvensional. Dalam hal ini, mekanisasi cerdas dan otomatisasi berbasis teknologi digital memungkinkan petani untuk mengoptimalkan penggunaan energi dalam berbagai aktivitas pertanian. Misalnya, traktor dan mesin pemanen yang efisien mengurangi konsumsi bahan bakar, sementara teknologi sensor dan sistem manajemen berbasis data memungkinkan pengaturan penggunaan energi yang lebih tepat sesuai kebutuhan.

Penggunaan energi terbarukan, seperti panel surya untuk pompa irigasi atau pembangkit listrik mikrohidro, memberikan alternatif yang ramah lingkungan dan mengurangi biaya operasional jangka panjang. Dengan menerapkan teknologi ini, agroteknologi tidak hanya mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga membantu meningkatkan keberlanjutan ekonomi bagi petani dengan efisiensi biaya operasional.

b. Efisiensi Air

Efisiensi air dalam pertanian sangat penting mengingat sektor ini merupakan pengguna terbesar sumber daya air di dunia. Teknologi seperti irigasi tetes memungkinkan distribusi air yang lebih tepat dan efisien langsung ke akar tanaman, mengurangi pemborosan yang sering terjadi pada sistem irigasi tradisional. Selain itu, sensor kelembaban tanah yang terintegrasi dengan sistem irigasi otomatis dapat memantau tingkat kelembaban tanah secara real-time, memastikan tanaman menerima jumlah air yang sesuai dengan kebutuhannya (Wolfert et al., 2017).

Beberapa sistem modern kini memanfaatkan *Internet of Things* (IoT) untuk lebih meningkatkan efisiensi air. Dengan IoT, data kelembaban tanah, cuaca, dan kebutuhan air tanaman dapat dipantau secara terus-menerus melalui aplikasi berbasis cloud, memungkinkan petani untuk menyesuaikan penggunaan air secara dinamis. Hal ini tidak hanya mengurangi pemborosan, tetapi juga memastikan ketersediaan air yang cukup bagi tanaman, terutama di daerah yang mengalami kekeringan atau memiliki sumber daya air terbatas.

c. Efisiensi Input Kimia

Efisiensi input kimia dalam pertanian menjadi sangat penting untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Penggunaan pupuk dan pestisida yang berlebihan dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air, serta degradasi ekosistem. Teknologi pertanian presisi, seperti sistem berbasis GPS, sensor tanah, dan drone, memungkinkan petani untuk mengaplikasikan pupuk dan pestisida dengan lebih efisien. Teknologi ini dapat memetakan kebutuhan tanaman secara spesifik, memastikan bahwa input kimia hanya digunakan pada lokasi dan jumlah yang tepat, sesuai dengan kondisi tanah dan tanaman (Mulla, 2013).

Dengan penerapan teknologi pertanian presisi, petani tidak hanya dapat menghemat biaya pengeluaran untuk input kimia, tetapi juga mengurangi dampak lingkungan yang sering terjadi akibat penggunaan bahan kimia secara berlebihan. Hal ini membantu menjaga kesuburan tanah dan kualitas air, serta mencegah resistensi hama terhadap pestisida. Selain itu, efisiensi

penggunaan pupuk juga dapat meningkatkan hasil pertanian, menjadikannya lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

d. Efisiensi Lahan dan Produktivitas

Efisiensi lahan menjadi tantangan utama dalam menghadapi pertumbuhan populasi yang pesat dan keterbatasan ruang. Sistem pertanian vertikal, aeroponik, dan hidroponik merupakan solusi inovatif yang memungkinkan produksi pangan dengan tingkat efisiensi tinggi di lahan yang terbatas, terutama di perkotaan. Pertanian vertikal, misalnya, memanfaatkan ruang vertikal untuk menanam tanaman dalam lapisan bertingkat, yang dapat meningkatkan hasil produksi tanpa membutuhkan lahan yang luas. Sistem ini juga mengurangi kebutuhan transportasi, karena produksi dapat dilakukan lebih dekat dengan konsumen, mengurangi jejak karbon.

Konsep integrated farming yang menggabungkan pertanian, perikanan, dan peternakan semakin populer sebagai pendekatan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan ruang dan sumber daya. Dalam sistem ini, limbah dari satu sektor dapat dimanfaatkan untuk mendukung sektor lainnya, seperti penggunaan limbah ternak untuk pupuk tanaman atau air dari kolam ikan untuk irigasi tanaman. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan produktivitas lahan tetapi juga membantu menjaga keberlanjutan dan mengurangi limbah yang dihasilkan, membuat sistem pertanian lebih ramah lingkungan dan efisien.

e. Efisiensi Manajemen dan Informasi

Efisiensi manajemen dan informasi dalam agroteknologi berfokus pada penggunaan teknologi digital untuk memaksimalkan pengelolaan operasional pertanian. Aplikasi manajemen berbasis data, seperti sistem manajemen lahan dan aplikasi pemantauan hasil tanaman, memungkinkan petani untuk mengakses informasi penting secara real-time, seperti tingkat kelembapan tanah, suhu, dan kesehatan tanaman. Dengan data yang lebih akurat, petani dapat membuat keputusan yang lebih cepat dan tepat dalam mengelola sumber daya, mengurangi pemborosan, dan meningkatkan hasil panen (Kamilaris et al., 2017).

Sistem peramalan cuaca yang didukung oleh data satelit dan model pertumbuhan tanaman yang canggih memungkinkan

petani untuk merencanakan aktivitas pertanian dengan lebih baik, seperti penjadwalan irigasi, pemupukan, atau waktu panen. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga mengurangi kerugian akibat perubahan cuaca yang tak terduga.

D. Teknologi Konvensional vs. Modern

Pertanian merupakan sektor vital yang terus mengalami perkembangan seiring dengan pertumbuhan populasi dan meningkatnya permintaan pangan dunia. Dalam perjalanannya, teknologi yang digunakan dalam kegiatan pertanian telah berevolusi dari yang bersifat konvensional menuju sistem pertanian modern berbasis teknologi tinggi. Perubahan ini tidak hanya mengubah cara bercocok tanam, tetapi juga memengaruhi aspek produktivitas, efisiensi, dan keberlanjutan sistem pertanian itu sendiri. Teknologi konvensional sering dikaitkan dengan praktik turun-temurun yang berbasis pada kearifan lokal dan penggunaan alat sederhana, sementara teknologi modern merujuk pada pendekatan yang menggunakan inovasi digital, genetika, otomatisasi, dan informasi untuk meningkatkan efisiensi produksi pertanian.

Teknologi pertanian konvensional mencakup teknik-teknik tradisional dan semi-modern yang digunakan secara luas oleh petani, terutama di daerah pedesaan. Contoh penggunaannya mencakup pembajakan menggunakan hewan, irigasi manual, penggunaan pupuk kandang, dan metode tanam warisan budaya (Altieri, 2018). Teknologi ini sangat mengandalkan pengetahuan lokal, tenaga kerja manusia, dan umumnya memiliki biaya produksi yang lebih rendah namun juga cenderung menghasilkan produktivitas yang terbatas. Kelebihannya terletak pada sifatnya yang lebih ramah lingkungan dan berorientasi jangka panjang (Pretty et al., 2018).

Teknologi pertanian modern mengacu pada penggunaan teknologi tinggi dan sistem berbasis sains untuk mendukung seluruh proses budidaya, mulai dari perencanaan hingga distribusi. Teknologi ini meliputi precision agriculture, bioteknologi, sensor IoT, drone, otomatisasi alat pertanian, pemupukan cerdas, hingga penggunaan AI dalam pengambilan keputusan (Basso & Antle, 2020). Teknologi ini bertujuan untuk meningkatkan hasil pertanian secara signifikan, mengefisienkan penggunaan input, serta menjawab tantangan pertanian modern seperti perubahan iklim, degradasi lahan, dan kelangkaan tenaga

kerja. Teknologi konvensional dan modern memiliki beberapa perbedaan yang signifikan:

1. Produktivitas dan Hasil Panen

Teknologi pertanian konvensional, meskipun efektif di masa lalu, sering kali menghasilkan hasil panen yang terbatas. Salah satu faktor utama yang menghambat produktivitas adalah keterbatasan akses petani terhadap benih unggul yang memiliki potensi hasil tinggi. Selain itu, pemakaian pupuk anorganik yang kurang efisien dan pengendalian hama serta penyakit yang terbatas menyebabkan kerugian hasil yang signifikan. Praktik pertanian tradisional sering kali mengandalkan metode yang kurang teroptimasi, yang berdampak pada rendahnya hasil produksi di banyak daerah, terutama di negara berkembang.

Dengan kemajuan teknologi modern, hasil panen dapat meningkat secara signifikan. Teknologi seperti penggunaan varietas unggul yang tahan terhadap hama dan penyakit, sistem irigasi efisien, serta aplikasi pestisida yang terkontrol dengan baik, dapat meningkatkan hasil panen hingga dua kali lipat dibandingkan dengan metode pertanian konvensional. Selain itu, teknologi digital yang digunakan dalam pertanian presisi memungkinkan petani untuk memantau dan mengelola lahan dengan lebih efisien, mengoptimalkan penggunaan air dan pupuk untuk mendapatkan hasil yang lebih tinggi dengan input yang lebih sedikit.

2. Penggunaan Sumber Daya

Teknologi konvensional dalam pertanian sering kali mengandalkan sumber daya lokal yang terbatas, seperti air hujan, pupuk alami, dan tenaga kerja manusia. Sistem ini lebih sesuai untuk pertanian skala kecil, di mana sumber daya dapat dikelola dengan cara yang lebih sederhana. Namun, pada skala yang lebih besar, sistem pertanian tradisional cenderung kurang efisien. Penggunaan air hujan yang bergantung pada pola cuaca dan ketergantungan pada pupuk alami yang memerlukan waktu lama untuk pengolahan menyebabkan ketidakstabilan dalam hasil pertanian, khususnya di wilayah dengan kondisi cuaca yang tidak menentu atau terbatasnya sumber daya alam.

Teknologi modern menawarkan pendekatan yang lebih efisien dengan memanfaatkan integrasi data dan teknologi canggih. Salah satu contoh yang sangat penting adalah penggunaan sensor kelembaban

tanah. Sensor ini memungkinkan petani untuk mengukur tingkat kelembaban tanah secara real-time dan menyesuaikan penggunaan air secara tepat. Hal ini mengurangi pemborosan air yang selama ini terjadi pada sistem irigasi konvensional, di mana air sering kali digunakan lebih banyak dari yang diperlukan. Teknologi semacam ini memungkinkan penggunaan air yang lebih hemat, yang sangat penting di wilayah dengan kekurangan air atau di daerah-daerah yang rentan terhadap perubahan iklim.

3. Keberlanjutan Lingkungan

Pertanian konvensional sering kali dianggap lebih selaras dengan lingkungan karena tidak bergantung pada penggunaan bahan kimia secara berlebihan, yang mengurangi potensi pencemaran tanah dan air. Praktik-praktik tradisional seperti pemupukan dengan bahan organik dan penggunaan varietas lokal yang lebih tahan terhadap kondisi lingkungan cenderung lebih ramah terhadap ekosistem alami. Namun, dalam praktiknya, banyak metode pertanian konvensional yang tidak diatur dengan baik, seperti pembakaran lahan yang sering terjadi untuk membersihkan area pertanian. Pembakaran ini dapat merusak kualitas udara, mengurangi keberagaman hayati, dan menyebabkan erosi tanah. Selain itu, penggunaan varietas lokal yang tidak tahan terhadap hama sering kali mengarah pada hasil yang rendah dan peningkatan penggunaan pestisida yang berbahaya bagi lingkungan (Garnett et al., 2013).

Teknologi modern seperti pertanian presisi dan pertanian berbasis agroekologi menawarkan pendekatan yang lebih canggih dan ramah lingkungan. Pertanian presisi mengoptimalkan penggunaan input seperti air, pupuk, dan pestisida dengan cara yang lebih efisien, hanya menempatkan bahan-bahan tersebut di tempat yang tepat dan dalam jumlah yang dibutuhkan oleh tanaman. Hal ini mengurangi pemborosan dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan menggunakan teknologi seperti sensor tanah dan drone, petani dapat memantau kondisi lahan secara real-time, memastikan bahwa setiap sumber daya digunakan dengan tepat.

4. Tenaga Kerja dan Efisiensi Waktu

Pada sistem pertanian konvensional, proses dari penanaman hingga panen cenderung mengandalkan tenaga kerja manual yang besar.

Petani harus mengelola berbagai aspek seperti pembajakan tanah, penanaman, perawatan tanaman, pemupukan, serta panen yang dilakukan secara fisik dan bertahap. Proses ini memakan waktu yang lama dan sangat bergantung pada tenaga manusia. Dengan ketergantungan yang tinggi pada pekerja manual, pertanian konvensional tidak hanya membebani sumber daya manusia, tetapi juga mempengaruhi efisiensi produksi karena keterbatasan tenaga kerja yang tersedia, terutama di daerah pedesaan (Wolfert et al., 2017).

Dengan adanya modernisasi pertanian, teknologi telah berhasil menggantikan beberapa proses manual yang sebelumnya memerlukan banyak waktu dan tenaga kerja. Mesin pemanen otomatis adalah salah satu contoh teknologi yang telah membantu mempercepat proses panen. Alat ini dapat memanen hasil pertanian dengan kecepatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan metode manual, mengurangi ketergantungan pada pekerja musiman dan meningkatkan efisiensi produksi. Hal ini memungkinkan petani untuk mengalokasikan sumber daya manusia untuk tugas-tugas lainnya yang lebih produktif.

5. Ketahanan terhadap Perubahan Iklim

Pertanian konvensional sering kali tidak memiliki kapasitas untuk beradaptasi dengan perubahan iklim yang cepat dan ekstrem. Ketergantungan pada pola cuaca yang sudah dikenal dan tidak adanya teknologi yang mendukung prediksi cuaca atau peringatan dini membuat petani lebih rentan terhadap dampak perubahan iklim. Misalnya, cuaca ekstrem seperti kekeringan atau hujan lebat yang tidak terduga dapat menyebabkan kerugian hasil panen yang signifikan. Tanaman yang tidak tahan terhadap perubahan suhu dan curah hujan yang tidak stabil lebih mudah terpapar pada penyakit atau kerusakan yang disebabkan oleh kondisi iklim yang tidak menguntungkan.

Teknologi modern menawarkan solusi yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim. Dengan integrasi model cuaca berbasis data dan kecerdasan buatan (AI), petani dapat memperoleh informasi yang lebih akurat dan tepat waktu mengenai kondisi cuaca yang akan datang. Sistem peringatan dini yang memanfaatkan AI memungkinkan petani untuk merencanakan tindakan preventif, seperti pengaturan irigasi atau perlindungan tanaman, sebelum dampak buruk terjadi. Hal ini memungkinkan untuk lebih siap menghadapi kondisi cuaca yang tidak

terduga dan mengurangi potensi kerugian yang disebabkan oleh cuaca ekstrem.

BAB III
INOVASI TEKNOLOGI DALAM PERTANIAN

Inovasi teknologi yang telah merubah wajah pertanian dalam beberapa dekade terakhir. Teknologi dalam pertanian terus berkembang seiring dengan kebutuhan untuk meningkatkan produksi, efisiensi, dan keberlanjutan. Inovasi dalam sektor ini mencakup penerapan teknologi tinggi yang dapat memodernisasi cara-cara tradisional dalam bertani, mulai dari pemanfaatan sensor dan *internet of things* (IoT) untuk monitoring tanaman hingga penggunaan drone untuk pemantauan dan penyemprotan yang lebih efisien. Transformasi digital yang terjadi di sektor pertanian memberikan kemudahan bagi petani untuk mengelola tanaman dengan data yang lebih akurat. Teknologi seperti *artificial intelligence* (AI), *big data*, dan sistem otomatisasi menjadi alat bantu yang efektif dalam analisis data pertanian, serta dalam pengambilan keputusan yang berbasis pada prediksi dan optimasi hasil produksi. Aplikasi-aplikasi mobile untuk petani juga menjadi sarana penting yang menyediakan akses informasi seputar cuaca, harga pasar, serta solusi pertanian yang tepat.

A. Pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) untuk Monitoring dan Manajemen

IoT dalam pertanian merujuk pada penggunaan sensor, perangkat otomatis, dan sistem komunikasi untuk memantau dan mengelola faktor-faktor yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman dan produktivitas pertanian. Sensor-sensor yang digunakan dalam IoT dapat mendeteksi berbagai parameter lingkungan seperti kelembaban tanah, suhu udara, intensitas cahaya, kandungan nutrisi dalam tanah, dan tingkat CO2. Data yang diperoleh kemudian diproses dan dianalisis untuk memberikan

informasi yang berguna bagi petani dalam mengelola lahan dan meningkatkan hasil pertanian.

1. Pemantauan Kondisi Tanah dan Tanaman

Salah satu tantangan terbesar dalam pertanian adalah mengelola kondisi tanah dan tanaman secara efisien agar hasil panen optimal. Dalam hal ini, *Internet of Things* (IoT) memberikan solusi dengan menyediakan pemantauan kondisi tanah dan tanaman secara real-time. Sensor-sensor yang terpasang di tanah, seperti sensor kelembaban dan pH, mengumpulkan data yang sangat akurat mengenai kondisi tanah. Data tersebut memberikan informasi penting tentang kelembaban tanah, tingkat keasaman, dan nutrisi yang ada, yang semuanya berdampak langsung pada kesehatan tanaman. Dengan informasi ini, petani dapat mengambil keputusan yang lebih tepat mengenai irigasi dan pemupukan, sehingga tanaman dapat tumbuh dalam kondisi terbaik (Tzounis et al., 2017).

Pemantauan yang terus-menerus ini sangat bermanfaat dalam mengoptimalkan penggunaan air, yang merupakan sumber daya terbatas. Sistem IoT dapat mengawasi kelembaban tanah di berbagai lokasi secara simultan dan dalam waktu nyata. Dengan demikian, petani dapat mengetahui dengan pasti kapan tanah memerlukan irigasi, menghindari pemborosan air, dan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya. Hal ini juga sangat penting dalam wilayah yang menghadapi kekurangan air, di mana manajemen irigasi yang efisien dapat menjadi faktor penentu dalam ketahanan pertanian.

IoT juga memberikan manfaat dalam deteksi dini terhadap perubahan kondisi tanah yang dapat mempengaruhi hasil panen. Misalnya, sensor pH dapat mendeteksi perubahan keasaman tanah yang dapat menyebabkan tanaman kesulitan dalam menyerap nutrisi. Dengan mendeteksi perubahan ini lebih awal, petani dapat segera mengambil tindakan korektif, seperti penyesuaian pH atau pemupukan yang lebih tepat. Hal ini membantu menjaga kesuburan tanah dan memastikan hasil pertanian yang lebih baik dalam jangka panjang.

2. Irigasi Cerdas

Irigasi cerdas merupakan salah satu terobosan teknologi berbasis IoT yang sangat berpengaruh dalam dunia pertanian modern. Sistem ini mengintegrasikan sensor kelembaban tanah dengan sistem irigasi otomatis, sehingga memungkinkan petani untuk mengontrol jumlah air yang disalurkan ke tanaman secara tepat sesuai dengan kebutuhan tanah. Dengan cara ini, petani dapat menghindari penyiraman berlebihan atau kekurangan air, yang sering kali terjadi pada metode irigasi konvensional. Teknologi ini mengoptimalkan penggunaan air, sumber daya yang sangat terbatas, dan sangat penting untuk kelangsungan pertanian, terutama di daerah dengan curah hujan rendah atau sumber air yang terbatas (Vallejo-Gomez et al., 2023).

Dengan penerapan irigasi cerdas, petani dapat meraih hasil yang lebih baik tanpa harus bergantung pada metode yang lebih merusak lingkungan atau menghabiskan sumber daya secara berlebihan. Teknologi ini memungkinkan pertanian yang lebih berkelanjutan dan efisien, yang sangat penting untuk masa depan pertanian global, terutama mengingat tantangan terkait perubahan iklim dan keterbatasan sumber daya alam. Seiring dengan kemajuan teknologi, irigasi cerdas akan menjadi kunci untuk mewujudkan pertanian yang lebih produktif dan ramah lingkungan.

3. Pemantauan Kualitas Udara dan Cuaca

Pemantauan kualitas udara dan cuaca menjadi salah satu aplikasi penting dari teknologi IoT dalam pertanian. Faktor-faktor seperti suhu, kelembaban udara, dan kondisi cuaca yang ekstrem memiliki pengaruh besar terhadap kesehatan tanaman dan hasil pertanian. Dengan menggunakan sensor suhu dan kelembaban udara yang terhubung ke sistem IoT, petani dapat memantau perubahan kondisi cuaca secara real-time. Teknologi ini memungkinkan untuk mengidentifikasi masalah seperti kekeringan, hujan berlebihan, atau suhu ekstrem yang bisa merusak tanaman.

Pemanfaatan platform IoT yang mengintegrasikan data cuaca dengan sensor tanah memberikan keuntungan besar bagi petani. Dengan data cuaca yang real-time, petani dapat memperoleh informasi tentang kemungkinan datangnya cuaca buruk, seperti hujan deras atau suhu tinggi, yang dapat merusak tanaman. Hal ini memungkinkan untuk mengambil tindakan pencegahan lebih awal, seperti mengatur sistem

irigasi untuk menghindari kekeringan atau menutup tanaman untuk melindunginya dari hujan lebat.

Keunggulan lain dari pemantauan cuaca berbasis IoT adalah kemampuan untuk melakukan penyesuaian secara cepat terhadap kondisi yang terus berubah. Misalnya, dengan memonitor kelembaban udara dan suhu secara langsung, petani dapat mengetahui kapan waktu terbaik untuk menyiram tanaman atau memberikan perlindungan ekstra terhadap tanaman yang rentan. Tanpa teknologi ini, petani harus bergantung pada prakiraan cuaca yang tidak selalu akurat dan dapat terlambat dalam merespon perubahan iklim yang cepat.

4. Deteksi Hama dan Penyakit

IoT telah membuktikan dirinya sebagai alat yang sangat efektif dalam pemantauan dan deteksi hama serta penyakit tanaman. Dengan menggunakan sensor canggih yang dapat mendeteksi perubahan kondisi tanaman, seperti gejala awal penyakit atau pola perilaku hama, sistem IoT memberikan informasi yang sangat berguna bagi petani. Sensor ini bisa mendeteksi tanda-tanda stres pada tanaman, perubahan suhu atau kelembaban yang mendukung perkembangan hama, serta adanya jejak atau aktivitas dari organisme pengganggu. Berdasarkan data yang terkumpul, petani dapat segera mengambil langkah-langkah preventif sebelum kerusakan lebih lanjut terjadi.

Penggunaan sistem penginderaan berbasis IoT untuk deteksi hama mampu mengurangi penggunaan pestisida secara signifikan. Dengan pemberitahuan lebih awal tentang potensi serangan hama, petani dapat menerapkan pengendalian hama secara lebih tepat sasaran. Penggunaan pestisida yang lebih selektif dan terkontrol mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan organisme non-target, sekaligus menjaga kesehatan tanaman dan ekosistem pertanian secara keseluruhan.

Teknologi ini memungkinkan petani untuk melakukan pengendalian secara lebih akurat dan efisien, dengan memfokuskan upaya pada area yang benar-benar membutuhkan perlakuan. Sebelumnya, petani sering kali mengaplikasikan pestisida secara merata tanpa mengetahui tingkat infestasi secara spesifik, yang tidak hanya boros tetapi juga berbahaya bagi lingkungan. Dengan sistem berbasis IoT, penerapan pestisida hanya dilakukan ketika diperlukan, sehingga

biaya pengendalian hama dapat ditekan dan dampaknya terhadap lingkungan dapat diminimalkan.

B. *Artificial Intelligence* (AI) dalam Analisis Data Pertanian

AI dalam pertanian adalah penerapan algoritma pembelajaran mesin (*machine learning*), pengolahan citra, dan analitik prediktif untuk menganalisis data pertanian. AI memungkinkan sistem untuk "belajar" dari data yang ada dan membuat prediksi atau keputusan otomatis tanpa intervensi manusia secara langsung. Penerapan AI dapat mencakup analisis data yang berkaitan dengan iklim, tanah, tanaman, dan praktik pertanian untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik (Liakos et al., 2018).

1. Prediksi Hasil Panen

Kecerdasan buatan (AI) telah memberikan dampak besar dalam meningkatkan ketepatan prediksi hasil panen. Dengan menggunakan algoritma pembelajaran mesin yang menganalisis data historis dan real-time, AI dapat memperhitungkan berbagai faktor yang mempengaruhi hasil pertanian, seperti kondisi cuaca, kelembaban tanah, dan kualitas tanah. Misalnya, data yang diperoleh dari sensor IoT yang terpasang di lahan pertanian dapat memberikan gambaran mendalam tentang kondisi tanaman dan tanah. Berdasarkan informasi ini, AI dapat memberikan estimasi yang lebih akurat tentang hasil panen, memungkinkan petani untuk membuat keputusan yang lebih terinformasi.

Menurut Kamilaris et al. (2017), aplikasi AI dalam prediksi hasil panen dapat meningkatkan akurasi perkiraan hasil hingga 20%. Peningkatan ini penting karena petani dapat lebih siap dalam merencanakan pengelolaan tanaman, termasuk kapan waktu terbaik untuk memanen dan bagaimana mengatur distribusi hasil pertanian. Keakuratan prediksi ini juga memungkinkan petani untuk merencanakan lebih baik mengenai penggunaan sumber daya seperti air, pupuk, dan tenaga kerja, yang pada gilirannya meningkatkan efisiensi dan mengurangi pemborosan.

Dengan menggunakan AI untuk memprediksi hasil panen, petani dapat mengidentifikasi potensi masalah sebelum berkembang menjadi krisis. Misalnya, jika AI mengidentifikasi bahwa kondisi tanah atau iklim dapat mengurangi hasil panen, petani dapat mengambil tindakan

preventif seperti menyesuaikan teknik irigasi, memperbaiki kualitas tanah, atau menggunakan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap kondisi ekstrem. Hal ini tidak hanya meningkatkan hasil pertanian tetapi juga menjaga keberlanjutan dan ketahanan pangan.

2. Deteksi Penyakit dan Hama

Kecerdasan buatan (AI) telah mengubah cara kita mendeteksi penyakit dan hama pada tanaman. Salah satu aplikasi utamanya adalah penggunaan citra yang diambil oleh drone, kamera, atau citra satelit untuk memantau kondisi tanaman secara visual. Dengan teknologi ini, AI dapat menganalisis gambar untuk mendeteksi tanda-tanda awal serangan hama atau penyakit yang mungkin tidak terlihat oleh mata manusia. Misalnya, perubahan kecil pada daun, batang, atau bahkan tanah di sekitar tanaman dapat terdeteksi dan dianalisis untuk menentukan apakah ada potensi ancaman. Pendekatan ini memungkinkan deteksi lebih cepat dan lebih akurat dibandingkan metode tradisional.

Teknologi pengenalan pola dan pembelajaran mendalam (*deep learning*) berperan penting dalam mendukung deteksi ini. Dengan algoritma yang terus belajar dari data, AI dapat mengidentifikasi pola yang menunjukkan tanda-tanda penyakit atau serangan hama. Sebagai contoh, perubahan warna pada daun atau tekstur batang yang mungkin mengindikasikan infeksi atau kerusakan oleh hama bisa dideteksi secara otomatis. Ini memungkinkan diagnosis yang lebih tepat dan pengambilan tindakan yang lebih cepat sebelum masalah tersebut menyebar dan mengurangi hasil panen.

3. Pemantauan Kualitas Tanah

Kecerdasan buatan (AI) semakin diterapkan dalam pemantauan kualitas tanah, sebuah aspek krusial dalam pertanian modern yang berkelanjutan. Dengan memanfaatkan sensor tanah yang terhubung dengan sistem AI, petani dapat memperoleh data yang lebih mendalam mengenai kondisi tanah secara real-time, seperti pH tanah, kadar air, dan kandungan nutrisi. Sistem ini tidak hanya memberikan gambaran yang lebih akurat tentang kondisi tanah, tetapi juga memungkinkan analisis mendalam untuk menghasilkan rekomendasi yang lebih spesifik dan terpersonalisasi, seperti waktu yang tepat untuk pemupukan atau pengelolaan air. Ini membuka peluang bagi pengelolaan tanah yang lebih

presisi dan berbasis data, meningkatkan hasil pertanian tanpa mengorbankan kelestarian tanah itu sendiri.

AI memungkinkan pemantauan kualitas tanah secara terus-menerus dan dinamis, memungkinkan petani untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada tanah secara real-time. Dengan data yang lebih akurat, petani dapat merespons lebih cepat terhadap masalah yang terjadi, seperti penurunan kualitas tanah atau kekurangan unsur hara. Sistem AI ini juga dapat memprediksi perubahan kondisi tanah dalam jangka pendek, memberikan kesempatan bagi petani untuk melakukan tindakan preventif, seperti mengatur kadar air atau menambah pupuk sesuai kebutuhan tanaman.

Penggunaan teknologi AI dalam pemantauan kualitas tanah mendukung pengelolaan tanah yang lebih efisien dan ramah lingkungan dalam jangka panjang. Dengan analisis yang lebih tepat dan berbasis data, petani dapat memaksimalkan penggunaan sumber daya, seperti air dan pupuk, serta menghindari praktik pertanian yang merusak tanah. Hal ini memungkinkan pertanian berkelanjutan yang tidak hanya mengutamakan hasil, tetapi juga menjaga kelestarian ekosistem tanah untuk generasi mendatang.

4. Pengelolaan Irigasi Cerdas

Pengelolaan irigasi cerdas menggunakan kecerdasan buatan (AI) semakin menjadi solusi penting dalam pertanian modern, terutama dalam upaya meningkatkan efisiensi penggunaan air dan energi. Sistem irigasi cerdas memanfaatkan data yang diperoleh dari berbagai sensor, seperti sensor kelembaban tanah, suhu, dan cuaca, yang memberikan gambaran rinci tentang kebutuhan air tanaman di lapangan. Dengan menganalisis data ini, AI dapat menentukan jumlah air yang tepat yang dibutuhkan tanaman pada waktu tertentu, serta mengoptimalkan jadwal irigasi berdasarkan kondisi yang ada. Hal ini memastikan bahwa tanaman mendapatkan air yang cukup tanpa pemborosan, sehingga menghemat sumber daya air yang semakin terbatas.

Salah satu keuntungan utama dari pengelolaan irigasi berbasis AI adalah pengurangan pemborosan air. Sistem ini mampu menyesuaikan irigasi secara otomatis dengan mempertimbangkan variabilitas kondisi tanah dan cuaca, yang sering kali berubah dari waktu ke waktu. Hal ini sangat penting, terutama di daerah-daerah yang menghadapi kekeringan atau ketidakpastian sumber daya air. Dengan kemampuan untuk

mengatur irigasi secara lebih presisi dan dinamis, AI memastikan bahwa tanaman mendapatkan air yang diperlukan, tetapi tanpa berlebihan, yang sering kali menyebabkan pemborosan dan pencemaran.

Penggunaan AI dalam irigasi cerdas juga membantu petani mengoptimalkan penggunaan sumber daya lainnya, seperti energi. Sistem ini mampu menyesuaikan jadwal irigasi dengan waktu yang tepat, mengurangi penggunaan energi yang tidak perlu untuk sistem irigasi otomatis atau pompa air. Dengan demikian, irigasi cerdas berbasis AI tidak hanya membantu dalam penghematan air, tetapi juga mendukung keberlanjutan pertanian dengan mengoptimalkan penggunaan energi dan mengurangi jejak karbon. Hal ini menjadi penting di era perubahan iklim dan tantangan lingkungan yang semakin besar.

5. Analisis Citra Satelit dan Drone untuk Monitoring Tanaman

Pada pertanian modern, analisis citra satelit dan drone yang dipadukan dengan kecerdasan buatan (AI) memberikan cara yang sangat efektif untuk memantau kesehatan tanaman. Dengan menggunakan citra multispektral yang diambil oleh drone atau satelit, AI dapat menganalisis berbagai spektrum cahaya yang dipantulkan oleh tanaman untuk mengidentifikasi masalah kesehatan tanaman yang mungkin tidak terlihat oleh mata manusia. Misalnya, AI dapat mendeteksi area yang mengalami kekurangan nutrisi, dehidrasi, atau serangan hama, yang semuanya dapat memengaruhi hasil panen secara signifikan. Hal ini memberikan keuntungan besar dalam hal deteksi dini dan pengambilan keputusan yang lebih cepat untuk mengatasi masalah tersebut.

Penggunaan drone dan satelit untuk analisis citra memiliki keunggulan dalam memantau area yang sangat luas, yang sering kali sulit dijangkau dengan metode konvensional. Dengan alat ini, petani dapat memperoleh data visual secara real-time dari seluruh lahan pertanian, mengidentifikasi pola yang tidak biasa, dan mengawasi perubahan kondisi tanaman dengan cara yang lebih efisien. Teknologi ini sangat berguna, terutama untuk pertanian yang mencakup lahan besar, yang membutuhkan pemantauan rutin dan mendalam untuk mendeteksi masalah yang mungkin timbul. Di sisi lain, menggunakan drone atau satelit mengurangi kebutuhan akan inspeksi manual, yang dapat memakan waktu dan biaya yang cukup besar.

Penelitian oleh Liakos et al. (2018) menyebutkan bahwa analisis citra yang diperoleh melalui drone yang dilengkapi dengan AI dapat

memberikan informasi yang lebih detail tentang keadaan tanaman dibandingkan dengan metode tradisional. Citra multispektral dari drone memungkinkan deteksi masalah kesehatan tanaman lebih cepat, bahkan dalam kondisi cuaca yang buruk atau di area yang luas. AI kemudian menganalisis data ini untuk memberikan petunjuk yang lebih jelas kepada petani mengenai tindakan apa yang perlu diambil, apakah itu pemupukan, pengairan, atau pengendalian hama.

C. Automasi dan Robotika dalam Produksi Pertanian

Teknologi automasi dan robotika telah menjadi bagian integral dari revolusi industri keempat dalam sektor pertanian, yang dikenal sebagai Agriculture 4.0. Penerapan teknologi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manusia, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, dan meningkatkan hasil pertanian dengan cara yang berkelanjutan. Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan robot dan sistem automasi di bidang pertanian telah menunjukkan kemajuan yang signifikan dalam meningkatkan produksi pertanian dengan cara yang lebih presisi, efisien, dan ramah lingkungan (Puranik et al., 2019).

Automasi dan robotika dalam pertanian mencakup penggunaan mesin, robot, dan perangkat cerdas yang dapat melakukan tugas-tugas yang sebelumnya dilakukan oleh manusia, seperti menanam, menyiram, mengumpulkan hasil, dan melakukan pemeliharaan tanaman. Teknologi ini berpotensi mengatasi banyak tantangan yang dihadapi oleh sektor pertanian, seperti peningkatan permintaan pangan global, keterbatasan tenaga kerja, dan kebutuhan untuk meningkatkan keberlanjutan pertanian.

Automasi dalam pertanian mengacu pada penggunaan teknologi untuk mengotomatiskan proses pertanian yang biasanya dilakukan secara manual. Teknologi automasi termasuk perangkat lunak dan perangkat keras yang memungkinkan sistem untuk beroperasi dengan sedikit atau tanpa campur tangan manusia. Misalnya, sistem irigasi otomatis, alat pemanen otomatis, dan alat penanaman yang dapat diatur untuk beroperasi pada waktu dan kondisi tertentu. Automasi bertujuan untuk meningkatkan produktivitas, mengurangi biaya operasional, dan meningkatkan ketepatan dalam pengelolaan pertanian. Sistem-sistem ini menggunakan sensor, perangkat lunak, dan kontrol jarak jauh untuk

mengoptimalkan penggunaan air, pupuk, dan energi, sehingga meminimalkan pemborosan dan kerugian hasil panen.

Robotika dalam pertanian mengacu pada penggunaan robot untuk melakukan tugas-tugas fisik dalam proses pertanian. Robot ini dapat berupa kendaraan otonom, drone, atau perangkat robot lainnya yang mampu bekerja di lapangan secara mandiri. Robot dapat digunakan untuk berbagai tugas, seperti pemanenan otomatis, penyemprotan pestisida, penanaman benih, dan bahkan perawatan tanaman yang lebih presisi. Robot dalam pertanian sering kali dilengkapi dengan sensor canggih, pengolahan citra, dan kecerdasan buatan untuk mengidentifikasi tanaman, hama, dan kondisi lapangan. Dengan kemampuan ini, robot dapat bekerja secara lebih efisien dan dengan ketepatan yang lebih tinggi dibandingkan manusia.

1. Pemanenan Otomatis

Pemanenan adalah tahap krusial dalam proses pertanian, yang tidak hanya membutuhkan keterampilan manual tetapi juga ketepatan waktu untuk memastikan hasil yang optimal. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi robotika telah mengubah cara pemanenan dilakukan, dengan pengembangan sistem pemanenan otomatis yang semakin efisien. Robot pemanen menggunakan berbagai sensor, seperti kamera dan sensor gerak, untuk mendeteksi buah atau tanaman yang siap dipanen. Teknologi ini memungkinkan pemanenan yang lebih cepat dan akurat dibandingkan dengan cara tradisional yang mengandalkan tenaga kerja manual. Hal ini mengurangi kerugian yang disebabkan oleh pemanenan yang tidak tepat, seperti kerusakan pada tanaman atau hasil panen.

Salah satu contoh inovatif dari pemanenan otomatis adalah robot pemanen buah "*Octinion Rubion*," yang dirancang untuk memanen stroberi. Berdasarkan Fountas et al. (2020), robot ini menggunakan kamera dan algoritma canggih untuk mengidentifikasi stroberi yang sudah matang, sehingga dapat dipanen tanpa merusak buah atau tanaman. Penggunaan robot ini terbukti mengurangi tingkat kerusakan hasil panen secara signifikan dibandingkan dengan metode manual, yang sering kali menyebabkan buah rusak atau tercabut bersama tangkainya. Hal ini tidak hanya meningkatkan kualitas hasil panen tetapi juga mengurangi pemborosan, sehingga meningkatkan efisiensi dalam produksi.

Robot pemanen juga menawarkan keuntungan dalam hal pengurangan ketergantungan pada tenaga kerja musiman. Dalam banyak industri pertanian, pemanenan sering dilakukan oleh pekerja musiman yang harus datang pada waktu tertentu. Namun, robot pemanen dapat bekerja sepanjang hari tanpa batasan waktu, mengatasi tantangan keterbatasan tenaga kerja yang sering kali dihadapi oleh petani, terutama di daerah yang kekurangan pekerja atau mengalami kekurangan musim.

2. Penanaman Otomatis

Penanaman otomatis telah menjadi salah satu inovasi yang membawa perubahan signifikan dalam dunia pertanian modern. Dengan menggunakan robot atau mesin penanam otomatis, petani dapat menanam benih dengan presisi yang sangat tinggi. Sistem ini mampu mengatur jarak antar tanaman secara akurat, sehingga memberikan ruang yang cukup bagi setiap tanaman untuk tumbuh secara optimal. Selain itu, penanam otomatis juga memastikan bahwa benih ditanam pada kedalaman yang sesuai dengan jenis tanaman, yang sangat penting untuk mendukung pertumbuhan yang sehat dan produktif. Dengan pengaturan yang tepat, hasil panen dapat meningkat, mengurangi kerugian dan memaksimalkan penggunaan lahan.

Teknologi penanaman otomatis sangat berguna dalam mengoptimalkan proses penanaman, terutama bagi tanaman yang membutuhkan pengaturan spesifik. Penggunaan sistem otomatis memungkinkan petani untuk menjaga konsistensi dalam setiap tahapan penanaman. Misalnya, tanaman tertentu mungkin memerlukan kedalaman yang lebih dalam untuk perakaran yang baik, sementara tanaman lain mungkin lebih cocok dengan kedalaman yang dangkal. Penanaman otomatis dengan kontrol presisi ini memungkinkan penyesuaian yang sangat spesifik, mengurangi risiko kesalahan manusia dan meningkatkan kualitas hasil pertanian.

Penggunaan robot penanam otomatis ini memberikan manfaat besar dalam hal efisiensi waktu dan tenaga kerja. Proses penanaman yang biasanya memerlukan tenaga kerja manual dalam jumlah besar kini dapat dilakukan oleh mesin, yang bekerja dengan kecepatan dan ketepatan yang jauh lebih tinggi. Selain itu, sistem otomatis ini dapat beroperasi tanpa henti sepanjang hari, mengurangi ketergantungan pada pekerja musiman dan memungkinkan petani untuk mengelola waktu dan sumber daya dengan lebih baik. Dalam jangka panjang, teknologi

penanaman otomatis berpotensi meningkatkan hasil pertanian, mengurangi biaya operasional, dan menciptakan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan.

3. Pemeliharaan Tanaman dengan Robot

Robot dalam pertanian tidak hanya berperan dalam proses penanaman atau pemanenan, tetapi juga sangat berguna dalam pemeliharaan tanaman. Salah satu penerapan utama robot di bidang ini adalah dalam penyiraman otomatis. Beberapa robot dilengkapi dengan sistem sensor yang memantau kondisi tanah, seperti kelembaban dan suhu, untuk memastikan tanaman menerima jumlah air yang tepat sesuai kebutuhannya. Dengan adanya sistem ini, penyiraman dapat dilakukan lebih efisien, mengurangi pemborosan air yang sering terjadi pada metode penyiraman konvensional.

Sistem robot penyiraman otomatis bekerja dengan cara mendeteksi kelembaban tanah di berbagai bagian ladang. Dengan data yang diperoleh dari sensor, robot dapat menyesuaikan jumlah air yang diberikan pada setiap bagian tanah sesuai dengan tingkat kelembaban yang terdeteksi. Ini memastikan bahwa air hanya diberikan pada area yang benar-benar membutuhkannya, menghindari pemborosan air pada tanah yang sudah cukup lembab. Dengan cara ini, pemanfaatan air menjadi lebih efisien, mengurangi pemborosan dan mengoptimalkan sumber daya yang tersedia.

Penggunaan robot penyiraman otomatis tidak hanya membantu meningkatkan efisiensi penggunaan air tetapi juga memberikan kontribusi besar dalam mengatasi tantangan kekeringan yang sering dihadapi oleh banyak wilayah pertanian. Robot pemeliharaan tanaman juga dapat digunakan untuk pemangkasan tanaman secara otomatis. Beberapa robot dirancang untuk memotong atau memangkas bagian tanaman yang sudah tidak produktif atau mengganggu pertumbuhan tanaman lainnya. Teknologi ini membantu petani mengelola tanaman dengan lebih efektif, mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manual, dan memastikan bahwa tanaman tumbuh dengan optimal.

4. Pengendalian Hama dan Penyakit dengan Robot

Pengendalian hama dan penyakit tanaman adalah salah satu tantangan terbesar dalam pertanian, dan teknologi robotika menawarkan solusi yang efisien untuk masalah ini. Dengan menggunakan robot

penyemprotan otomatis, petani dapat mengelola hama dan penyakit dengan lebih tepat dan akurat. Robot ini dilengkapi dengan sensor dan kamera untuk mendeteksi keberadaan hama atau tanda-tanda penyakit pada tanaman, memungkinkan penyemprotan pestisida atau herbisida hanya pada area yang membutuhkan. Hal ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada tenaga manusia, tetapi juga meminimalkan penggunaan bahan kimia berbahaya yang dapat merusak lingkungan dan kesehatan manusia.

Contoh nyata dari aplikasi robotika dalam pengendalian hama adalah robot "AgBot" yang dikembangkan di Australia. AgBot memiliki kemampuan untuk memantau tanaman secara otomatis dan melakukan penyemprotan pestisida dengan dosis yang tepat. Dengan menggunakan teknologi sensor dan kamera, AgBot dapat mendeteksi hama atau penyakit pada tanaman, kemudian menyemprotkan pestisida secara selektif hanya pada bagian tanaman yang terinfeksi. Ini sangat efisien, mengurangi penggunaan bahan kimia yang tidak perlu dan meningkatkan efektivitas pengendalian hama.

D. Pengembangan Drone untuk Pemantauan dan Penyemprotan

Drone dalam pertanian merujuk pada perangkat terbang tanpa awak yang dilengkapi dengan berbagai sensor, kamera, dan perangkat lunak untuk melakukan pemantauan dan pengelolaan lahan pertanian. Teknologi ini dapat digunakan untuk memetakan lahan, memonitor kesehatan tanaman, mengukur kelembaban tanah, serta melakukan penyemprotan pestisida dan pupuk secara efisien.

Drone dapat dikendalikan dengan remote control atau melalui sistem otonom yang memungkinkan terbang secara otomatis berdasarkan rute yang telah diprogram sebelumnya. Drone pertanian sering dilengkapi dengan berbagai teknologi canggih, seperti multispectral sensors, thermal imaging, LiDAR (*Light Detection and Ranging*), dan GPS untuk menghasilkan data yang akurat dan dapat diandalkan.

1. Pemantauan Kesehatan Tanaman

Pemantauan kesehatan tanaman merupakan aspek yang sangat penting dalam pertanian modern, dan penggunaan drone dalam hal ini

telah membawa perubahan besar. Dengan kemampuan untuk terbang di atas ladang dan memantau kondisi tanaman secara real-time, drone menawarkan cara yang lebih efisien dan akurat dibandingkan dengan metode konvensional. Drone yang dilengkapi dengan sensor multispectral dan kamera high-definition dapat menangkap gambar dari tanaman pada berbagai panjang gelombang cahaya. Ini memberikan petani kemampuan untuk memantau tanaman secara menyeluruh, bahkan dalam kondisi yang tidak dapat dilihat dengan mata telanjang, seperti masalah terkait kelembaban tanah, kekurangan nutrisi, atau tanda-tanda awal penyakit dan hama.

Salah satu teknologi yang sangat berguna dalam pemantauan kesehatan tanaman adalah penggunaan sensor multispectral pada drone. Sensor ini dapat mengukur sejumlah parameter penting, seperti tingkat klorofil pada tanaman yang berkaitan dengan kesehatan vegetasi. Salah satu indikator yang sering digunakan adalah NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), yang mengukur perbedaan antara cahaya yang diserap dan dipantulkan oleh tanaman. NDVI memberikan informasi yang jelas mengenai kondisi tanaman, sehingga petani dapat mendeteksi apakah tanaman sedang mengalami stres akibat kekurangan air, hama, atau penyakit. Ini memungkinkan intervensi yang lebih cepat sebelum masalah tersebut berkembang lebih jauh.

Menurut Zhang dan Kovacs (2012), penggunaan drone dengan sensor multispectral dapat meningkatkan efisiensi dalam pemantauan kondisi tanaman, sekaligus mengurangi ketergantungan pada pengamatan lapangan yang biasanya memerlukan tenaga manusia atau pesawat terbang. Metode ini tidak hanya menghemat waktu dan tenaga, tetapi juga dapat mengurangi biaya yang sebelumnya diperlukan untuk pemantauan dalam skala besar. Dengan kemampuan untuk menjangkau area yang lebih luas dalam waktu singkat, drone memberikan keuntungan dalam hal cakupan pengawasan yang lebih luas dan lebih mendetail.

2. Penyemprotan Pestisida dan Nutrisi

Penyemprotan pestisida dan nutrisi tanaman merupakan salah satu aplikasi drone yang paling banyak digunakan dalam pertanian modern. Dengan kemampuannya yang canggih, drone dilengkapi dengan tangki dan sistem penyemprotan yang memungkinkan distribusi bahan kimia seperti pestisida, herbisida, dan pupuk dengan tingkat presisi yang

sangat tinggi. Salah satu keunggulan utama dari teknologi ini adalah kemampuannya untuk menyemprotkan cairan hanya pada area yang membutuhkan, menghindari pemborosan bahan kimia di tempat yang tidak diperlukan. Hal ini sangat menguntungkan dalam mengoptimalkan penggunaan pestisida dan pupuk, sehingga mengurangi biaya operasional pertanian.

Drone dilengkapi dengan berbagai sensor yang memungkinkan untuk memetakan dan menilai kondisi tanaman secara lebih akurat. Misalnya, sensor multispectral pada drone dapat mendeteksi area yang terinfeksi hama atau penyakit dan memberi tahu sistem untuk menyemprotkan bahan kimia hanya pada bagian tanaman yang membutuhkan perawatan. Ini bukan hanya meningkatkan efisiensi dalam penggunaan bahan kimia, tetapi juga meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti kontaminasi tanah dan air yang sering terjadi akibat penyemprotan berlebihan.

Penggunaan drone untuk penyemprotan juga lebih ramah lingkungan. Sebelum penggunaan drone, penyemprotan pestisida dan pupuk sering dilakukan dengan traktor atau pesawat terbang, yang membutuhkan bahan bakar fosil dan menghasilkan emisi karbon. Namun, dengan menggunakan drone, yang beroperasi secara listrik atau menggunakan bahan bakar yang lebih efisien, jejak karbon yang dihasilkan dapat dikurangi secara signifikan.

3. Pemantauan Kelembaban Tanah dan Irigasi

Pemantauan kelembaban tanah adalah salah satu aspek penting dalam pengelolaan pertanian yang efisien, terutama dalam kaitannya dengan pengelolaan sumber daya air. Dalam hal ini, drone berperan yang sangat vital. Drone dilengkapi dengan sensor termal dan multispectral yang memungkinkan untuk mendeteksi variasi kelembaban tanah secara akurat di seluruh lahan pertanian. Dengan menggunakan teknologi ini, petani dapat memantau kondisi kelembaban tanah secara real-time, yang sangat membantu dalam pengelolaan irigasi yang lebih tepat sasaran dan efisien.

Sensor multispectral pada drone dapat menangkap berbagai panjang gelombang cahaya yang mencerminkan kondisi tanah dan tanaman. Data yang dihasilkan ini memberikan informasi yang sangat detail mengenai tingkat kelembaban tanah di berbagai titik di ladang. Sebagai contoh, drone yang terbang di atas ladang dapat

mengidentifikasi daerah yang lebih kering dibandingkan dengan area yang lebih basah, memungkinkan petani untuk mengetahui secara pasti area mana yang membutuhkan irigasi lebih banyak. Hal ini membantu dalam pengaturan irigasi yang lebih tepat, sehingga tidak ada area yang terlalu basah atau terlalu kering.

Salah satu keuntungan utama dari penggunaan drone dalam pemantauan kelembaban tanah adalah kemampuannya untuk mengoptimalkan penggunaan air. Di banyak daerah yang memiliki keterbatasan sumber daya air, efisiensi dalam penggunaan air sangat penting untuk keberlanjutan pertanian. Dengan mengidentifikasi area yang memerlukan irigasi lebih banyak atau lebih sedikit, sistem irigasi dapat diatur dengan lebih tepat, menghindari pemborosan air. Ini tidak hanya menghemat sumber daya air, tetapi juga mengurangi biaya operasional bagi petani dalam jangka panjang.

BAB IV
TEKNOLOGI PANGAN DAN KETAHANAN PANGAN

Teknologi Pangan dan Ketahanan Pangan membahas peran penting inovasi teknologi dalam memastikan ketersediaan, aksesibilitas, dan kualitas pangan yang aman bagi populasi dunia yang terus berkembang. Ketahanan pangan merupakan salah satu tantangan terbesar di era globalisasi ini, di mana perubahan iklim, pertumbuhan populasi yang pesat, dan ketidakstabilan ekonomi mempengaruhi produksi dan distribusi pangan. Oleh karena itu, teknologi pangan berperan kunci dalam meningkatkan efisiensi produksi, memperpanjang umur simpan, serta mengurangi pemborosan dan limbah pangan.

Inovasi dalam teknologi pangan mencakup berbagai bidang, mulai dari pengolahan pascapanen, teknik penyimpanan, hingga pengembangan bahan pangan yang lebih bergizi dan tahan lama. Teknologi modern ini juga berfokus pada pengurangan limbah makanan dan pengolahan bahan pangan yang ramah lingkungan, memberikan solusi bagi tantangan global terkait kelaparan dan kerusakan lingkungan. Selain itu, melalui bioteknologi, riset mengenai modifikasi genetik tanaman dan mikroorganisme juga semakin membuka jalan untuk meningkatkan kualitas dan ketahanan pangan.

A. Inovasi dalam Penyimpanan dan Distribusi Pangan

Penyimpanan dan distribusi pangan berperan yang sangat penting dalam memastikan ketahanan pangan global. Tantangan dalam menjaga ketahanan pangan semakin kompleks, terutama dengan meningkatnya populasi dunia, perubahan iklim, serta ketergantungan pada sistem pertanian yang seringkali rentan terhadap bencana alam dan fluktuasi harga pasar. Salah satu solusi untuk meningkatkan ketahanan pangan

adalah dengan memperkenalkan inovasi dalam teknologi penyimpanan dan distribusi pangan.

Inovasi dalam bidang ini dapat membantu mengurangi pemborosan pangan, memperpanjang umur simpan, dan memastikan distribusi pangan yang lebih efisien, aman, serta lebih ramah lingkungan. Teknologi penyimpanan yang lebih baik memungkinkan pengurangan kerugian pascapanen, yang mencapai sekitar 30-40% dari total produksi pangan global (Pingali et al., 2019).

1. Inovasi dalam Penyimpanan Pangan

Penyimpanan pangan adalah salah satu tahap penting dalam rantai pasokan pangan. Setelah panen, pangan harus disimpan dengan cara yang tepat agar kualitasnya tetap terjaga sampai tiba saatnya untuk didistribusikan dan dikonsumsi. Beberapa inovasi yang telah dikembangkan dalam penyimpanan pangan adalah sebagai berikut:

a. Teknologi Pendinginan dan Pengeringan

Inovasi dalam penyimpanan pangan, khususnya melalui teknologi pendinginan dan pengeringan, menjadi kunci dalam menjaga ketahanan pangan di tengah tantangan global seperti perubahan iklim dan peningkatan kebutuhan energi. Pendinginan merupakan salah satu metode paling efektif untuk memperpanjang masa simpan produk segar seperti buah, sayuran, dan daging. Namun, sistem pendinginan konvensional sangat bergantung pada energi fosil yang berkontribusi pada emisi karbon. Untuk mengatasi hal ini, teknologi *cold chain* berbasis energi terbarukan telah dikembangkan sebagai solusi berkelanjutan. Zhang dan Mohammad (2024) mencatat bahwa integrasi panel surya dan sistem pendingin hemat energi dalam rantai dingin dapat secara signifikan mengurangi jejak karbon serta biaya operasional, sembari tetap menjaga kualitas dan keamanan pangan.

Metode pengeringan juga terus mengalami inovasi signifikan. Pengeringan tanpa udara (*vacuum drying*) dan pengeringan beku (*freeze drying*) menjadi metode alternatif yang lebih efisien dibandingkan pengeringan konvensional yang menggunakan suhu tinggi. Teknologi ini bekerja dengan menurunkan tekanan udara dan menghilangkan air dari bahan pangan pada suhu rendah, sehingga nutrisi, rasa, dan tekstur tetap terjaga.

b. Teknologi Penyimpanan Berbasis Atmosfer Terkendali (*Controlled Atmosphere Storage* - CAS)

Teknologi *Controlled Atmosphere Storage* (CAS) merupakan inovasi penting dalam sistem penyimpanan pangan modern, terutama untuk buah-buahan dan sayuran segar yang memiliki umur simpan terbatas. CAS bekerja dengan mengontrol lingkungan penyimpanan termasuk suhu, kelembaban relatif, serta komposisi gas seperti oksigen (O_2), karbon dioksida (CO_2), dan nitrogen (N_2) guna memperlambat proses respirasi dan pematangan produk. Dengan menurunkan kadar oksigen dan meningkatkan kadar karbon dioksida dalam ruang penyimpanan, aktivitas enzim dan mikroba penyebab pembusukan dapat dikendalikan, sehingga produk tetap segar lebih lama tanpa harus menggunakan bahan kimia tambahan.

Menurut Thompson et al. (2018), CAS telah berhasil diterapkan secara luas pada komoditas seperti apel, pir, jeruk, dan tomat. Misalnya, dalam penyimpanan apel, CAS dapat memperpanjang umur simpan hingga beberapa bulan lebih lama dibandingkan metode pendinginan biasa. Teknologi ini juga memungkinkan distribusi buah-buahan ke pasar jarak jauh tanpa kehilangan kualitas sensori seperti rasa, warna, dan tekstur. CAS menjadi solusi penting dalam rantai pasokan global, terutama ketika permintaan pasar menuntut pasokan produk segar dalam jangka waktu yang lebih lama.

c. Sistem Penyimpanan Berbasis Sensor dan IoT

Perkembangan teknologi sensor dan *Internet of Things* (IoT) telah merevolusi sistem penyimpanan pangan melalui pemantauan kondisi penyimpanan secara otomatis dan real-time. Sensor pintar yang dipasang dalam ruang penyimpanan dapat mendeteksi berbagai parameter penting seperti suhu, kelembaban udara, kadar etilen, hingga gas berbahaya lain yang dapat mempengaruhi mutu dan keamanan produk pangan. Dengan data ini, sistem berbasis IoT secara otomatis dapat mengatur ventilasi, pendinginan, atau sistem pengendalian atmosfer lainnya untuk menjaga kualitas produk tetap optimal.

Teknologi ini meningkatkan efisiensi operasional karena memungkinkan pemantauan dan pengambilan keputusan secara otomatis, bahkan dari jarak jauh, tanpa perlu intervensi manusia

secara terus-menerus. Sistem ini juga dapat mengirimkan peringatan langsung ke perangkat pengguna jika terdeteksi anomali yang berpotensi merusak bahan pangan. Inovasi ini sangat penting bagi industri pangan modern, terutama dalam menghadapi tantangan distribusi lintas wilayah dan penyimpanan dalam skala besar. Dengan mengintegrasikan sensor pintar dan IoT dalam sistem logistik dan manajemen gudang, pelaku industri tidak hanya dapat menjaga kesegaran produk lebih lama, tetapi juga mengefisienkan rantai pasok dan meminimalisir kerugian akibat kerusakan produk.

2. Inovasi dalam Distribusi Pangan

Distribusi pangan adalah tahap penting lainnya dalam rantai pasokan pangan. Pendistribusian pangan yang efisien dan tepat waktu sangat penting untuk mengurangi pemborosan, menjaga kualitas produk, dan memastikan pangan sampai ke konsumen dengan harga yang wajar. Inovasi dalam distribusi pangan berfokus pada peningkatan efisiensi logistik, pengurangan biaya distribusi, dan peningkatan akses pangan di daerah-daerah terpencil.

a. Logistik Berbasis Teknologi Digital

Inovasi digital dalam logistik telah mengubah cara distribusi pangan dilakukan, menjadikannya lebih efisien, transparan, dan responsif terhadap kebutuhan pasar. Sistem logistik berbasis teknologi digital memungkinkan pengelolaan dan pemantauan pergerakan produk pangan secara real-time dari produsen hingga konsumen akhir. Dengan menggunakan platform digital, semua pihak dalam rantai pasok dapat mengakses informasi yang sama terkait status pengiriman, kondisi penyimpanan, dan estimasi waktu tiba, sehingga mengurangi risiko keterlambatan dan kerusakan produk.

Teknologi seperti blockchain telah terbukti efektif dalam meningkatkan transparansi dan kepercayaan konsumen terhadap keamanan pangan. Kamilaris et al. (2017) menyatakan bahwa implementasi blockchain memungkinkan setiap langkah dalam rantai distribusi tercatat secara permanen dan tidak dapat dimanipulasi, sehingga asal-usul dan kualitas produk pangan dapat dilacak dengan mudah. Selain itu, cloud computing dan *big data analytics* memungkinkan perusahaan untuk menganalisis

tren permintaan pasar, mengoptimalkan jalur distribusi, dan menyesuaikan pasokan berdasarkan kebutuhan aktual secara dinamis.

b. Penggunaan Kendaraan Otomatis dan Drones untuk Pengiriman Pangan

Penggunaan kendaraan otonom dan drone dalam distribusi pangan merupakan langkah revolusioner dalam menghadapi tantangan logistik modern. Kendaraan otonom, seperti truk tanpa pengemudi, dapat beroperasi selama 24 jam penuh tanpa terganggu oleh keterbatasan waktu kerja manusia, sehingga mempercepat pengiriman dan mengurangi biaya operasional. Di sisi lain, drone menjadi solusi efisien untuk pengiriman jarak pendek, terutama di daerah terpencil, padat penduduk, atau yang memiliki infrastruktur jalan yang terbatas (Tsouros et al., 2019). Drone menawarkan keunggulan dalam kecepatan dan efisiensi, terutama untuk pengiriman produk pangan yang mudah rusak (*perishable goods*). Dengan kemampuan untuk menghindari kemacetan dan medan sulit, drone memungkinkan produk seperti sayuran segar, buah, atau makanan siap saji tiba di tangan konsumen dalam waktu yang jauh lebih singkat.

Implementasi teknologi ini juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dari transportasi tradisional. Dengan tenaga listrik dan rute teroptimasi, drone dan kendaraan otomatis dinilai lebih ramah lingkungan. Ke depan, penggunaan teknologi ini tidak hanya akan meningkatkan kecepatan distribusi, tetapi juga membuka akses pangan yang lebih merata, terutama di wilayah-wilayah yang selama ini sulit dijangkau oleh sistem distribusi konvensional. Inovasi ini menjanjikan efisiensi logistik yang lebih tinggi serta potensi peningkatan ketahanan pangan global.

c. Rantai Pasokan Pangan yang Responsif dan Berkelanjutan

Rantai pasokan pangan yang responsif dan berkelanjutan menjadi aspek krusial dalam menjamin ketersediaan pangan, terutama di tengah tantangan global seperti perubahan iklim, pandemi, atau bencana alam. Untuk itu, inovasi teknologi berbasis kecerdasan buatan (AI) telah diterapkan dalam sistem distribusi pangan guna meningkatkan kecepatan respons terhadap perubahan permintaan pasar. Teknologi ini memungkinkan pengumpulan dan analisis

data secara real-time, sehingga distribusi dapat disesuaikan dengan kebutuhan di lapangan dengan lebih presisi dan efisien. Dengan adanya sistem manajemen berbasis AI, pelaku rantai pasokan dapat memperkirakan permintaan secara akurat, mengatur stok dan rute pengiriman secara dinamis, serta menghindari keterlambatan dan pemborosan. Hal ini sangat penting dalam situasi darurat, seperti bencana alam atau gangguan rantai distribusi akibat konflik atau pandemi, di mana distribusi pangan harus cepat dan tepat sasaran. Penerapan sistem AI dalam rantai pasokan pangan telah terbukti efektif meningkatkan efisiensi distribusi di negara-negara berkembang, yang sebelumnya menghadapi masalah logistik dan keterbatasan infrastruktur.

B. Teknologi Pascapanen untuk Mengurangi Limbah

Ketahanan pangan adalah salah satu isu global yang terus berkembang, dengan tantangan yang semakin kompleks, terutama terkait dengan pemborosan pangan dan limbah pascapanen. Menurut data yang dikeluarkan oleh FAO (Food and Agriculture Organization), sekitar 1,3 miliar ton pangan terbuang setiap tahun, yang sebagian besar berasal dari tahap pascapanen hingga distribusi (FAO, 2019). Ini adalah masalah yang signifikan mengingat bahwa di banyak wilayah, terutama di negara berkembang, lebih dari 800 juta orang masih mengalami kelaparan. Salah satu solusi untuk mengatasi pemborosan pangan adalah dengan meningkatkan efisiensi di sektor pascapanen, yang berfokus pada pengelolaan produk pertanian setelah panen untuk memperpanjang umur simpan dan mengurangi kerugian.

Inovasi teknologi dalam bidang pascapanen tidak hanya berfokus pada peningkatan kualitas dan umur simpan produk pangan, tetapi juga pada pengurangan limbah. Limbah pascapanen dapat disebabkan oleh faktor-faktor seperti kerusakan mekanis, kerusakan biologis, atau kondisi lingkungan yang tidak mendukung. Limbah pascapanen dihasilkan dari berbagai tahap setelah panen, termasuk pengumpulan, penyimpanan, transportasi, pemrosesan, dan distribusi. Beberapa teknologi pascapanen yang inovatif telah dikembangkan untuk mengurangi pemborosan pangan dan limbah pascapanen, baik melalui pengurangan kerusakan mekanis, peningkatan penyimpanan, maupun

proses pengolahan untuk memperpanjang umur simpan produk. Teknologi-teknologi ini antara lain:

1. Penggunaan Teknologi Pendinginan untuk Penyimpanan

Penggunaan teknologi pendinginan merupakan salah satu komponen vital dalam sistem pascapanen untuk mempertahankan kualitas produk pangan. Teknologi ini bekerja dengan menurunkan suhu produk, yang secara langsung memperlambat proses fisiologis dan pertumbuhan mikroorganisme penyebab pembusukan. Penerapan cold storage sangat penting terutama bagi produk segar seperti buah-buahan, sayuran, dan daging, karena suhu rendah dapat memperpanjang masa simpan produk tanpa perlu tambahan bahan kimia. Dengan menjaga produk tetap segar lebih lama, teknologi pendinginan membantu mengurangi pemborosan pangan dan meningkatkan efisiensi rantai pasok.

Inovasi dalam bidang ini terus berkembang, salah satunya adalah penerapan energi terbarukan untuk mendukung sistem pendinginan. Zhang dan Mohammad (2024) mencatat bahwa penggunaan panel surya dan teknologi tenaga angin untuk menggerakkan sistem pendinginan dapat menurunkan biaya operasional secara signifikan, terutama di daerah terpencil atau negara berkembang yang menghadapi tantangan pasokan listrik. Teknologi ini juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon, sejalan dengan tujuan keberlanjutan lingkungan dalam sektor pertanian dan pangan. Dengan sistem pendinginan berbasis energi terbarukan, petani kecil pun dapat memiliki akses terhadap penyimpanan yang andal dan ramah lingkungan.

Inovasi teknologi sensor juga telah mengubah cara pengelolaan *cold chain*. Teknologi *cold chain logistics* modern dilengkapi dengan sensor pintar yang dapat memantau suhu, kelembaban, serta kondisi atmosfer secara real-time selama proses penyimpanan dan distribusi. Penggunaan sensor ini memungkinkan intervensi cepat jika terjadi fluktuasi suhu yang dapat merusak produk. Dengan demikian, kualitas dan keamanan pangan dapat tetap terjaga hingga sampai ke tangan konsumen.

2. Pengeringan dengan Teknologi Tepat Guna

Proses pengeringan merupakan salah satu teknologi pascapanen yang sangat penting dalam mempertahankan kualitas dan

memperpanjang umur simpan produk pangan. Dengan mengurangi kadar air dalam bahan makanan, pengeringan membantu memperlambat pertumbuhan mikroorganisme penyebab pembusukan dan fermentasi. Dalam konteks ketahanan pangan, teknologi pengeringan yang efisien juga dapat mengurangi limbah pangan, khususnya di wilayah pedesaan atau negara berkembang yang kerap mengalami keterbatasan fasilitas penyimpanan. Oleh karena itu, penerapan teknologi pengeringan yang tepat guna menjadi sangat strategis dalam mendukung keberlanjutan sistem pangan global (Hnin et al., 2019).

Freeze drying atau pengeringan beku merupakan salah satu inovasi pengeringan modern yang banyak digunakan untuk mempertahankan kualitas pangan. Teknologi ini bekerja dengan membekukan produk terlebih dahulu lalu menghilangkan kadar air melalui proses sublimasi. Metode ini terbukti mampu menjaga kandungan gizi, rasa, warna, dan tekstur makanan lebih baik dibandingkan metode pengeringan konvensional. Produk yang dihasilkan pun lebih ringan dan memiliki masa simpan yang panjang, menjadikannya pilihan ideal untuk industri makanan sehat, militer, atau bantuan pangan darurat.

Teknologi *vacuum drying* juga semakin mendapat perhatian. Vacuum drying bekerja dengan menurunkan tekanan udara di sekitar produk sehingga pengeringan dapat berlangsung pada suhu yang lebih rendah. Ini penting untuk produk-produk sensitif terhadap panas seperti buah-buahan, sayuran, atau herbal. Dengan mengurangi paparan panas tinggi, metode ini menjaga kandungan nutrisi serta kualitas organoleptik dari produk pangan. Teknologi ini memberikan nilai tambah terutama bagi produk-produk premium atau organik yang membutuhkan perlakuan khusus selama pascapanen.

3. Fermentasi dan Pengolahan untuk Memperpanjang Umur Simpan

Fermentasi merupakan salah satu teknik pengolahan pascapanen yang telah lama digunakan dalam berbagai budaya untuk memperpanjang umur simpan pangan. Proses ini melibatkan aktivitas mikroorganisme seperti bakteri asam laktat, ragi, atau kapang yang memecah komponen makanan dan menghasilkan senyawa yang menghambat pertumbuhan mikroba pembusuk. Fermentasi tidak hanya meningkatkan daya simpan makanan, tetapi juga memperkaya rasa,

meningkatkan nilai gizi, serta menciptakan variasi produk pangan seperti tempe, kimchi, yoghurt, dan sauerkraut. Karena alasan ini, fermentasi dianggap sebagai solusi alami dan ramah lingkungan untuk mengurangi limbah pangan.

Inovasi dalam teknologi fermentasi modern saat ini berfokus pada pengembangan starter cultures atau inokulum mikroba yang lebih stabil, efisien, dan dapat dikontrol. Penggunaan starter cultures yang dikembangkan secara ilmiah memungkinkan proses fermentasi berlangsung lebih konsisten dan dapat diadaptasi untuk berbagai jenis bahan pangan lokal. Hal ini sangat bermanfaat bagi industri pangan skala kecil hingga besar, karena mempermudah pengendalian kualitas, mempercepat proses produksi, dan menghasilkan produk yang lebih aman dikonsumsi. Selain itu, penggunaan kultur starter ramah lingkungan juga mendukung pengurangan penggunaan bahan kimia dalam pengawetan makanan.

Berbagai teknik pengolahan lain juga berkontribusi dalam memperpanjang umur simpan pangan. Misalnya, pemrosesan makanan kering yang dilakukan melalui pengasapan, pengeringan udara, atau teknologi vacuum drying, mampu mengurangi kadar air dalam makanan sehingga memperlambat pertumbuhan mikroorganisme pembusuk. Metode ini banyak digunakan untuk ikan asin, daging kering, dan produk herbal. Pengolahan ini memberikan alternatif yang ekonomis dan efektif bagi masyarakat, terutama di wilayah tanpa fasilitas pendinginan memadai.

Teknologi pembekuan dan pembekuan cepat (*flash freezing*) juga berperan penting dalam pengawetan produk pangan. *Flash freezing* mampu membekukan produk dalam waktu sangat singkat, menjaga struktur sel dan kandungan nutrisi agar tidak rusak. Metode ini sangat sesuai untuk produk seperti buah, sayur, daging, dan makanan laut. Produk yang dibekukan secara cepat cenderung memiliki kualitas yang lebih baik saat dicairkan dibandingkan pembekuan lambat, serta mengurangi risiko kontaminasi mikroba selama penyimpanan.

4. Penerapan Teknologi Bioteknologi untuk Meningkatkan Ketahanan Pangan

Bioteknologi merupakan salah satu pilar penting dalam upaya peningkatan ketahanan pangan, terutama melalui pengurangan kerugian pascapanen. Salah satu pendekatan yang kini berkembang pesat adalah

rekayasa genetika yang memungkinkan ilmuwan memodifikasi sifat tanaman agar lebih tahan terhadap pembusukan, kerusakan mekanis, serta serangan hama dan penyakit. Teknologi seperti CRISPR-Cas9 telah memberikan kemampuan presisi tinggi dalam mengedit gen spesifik pada tanaman, yang dapat menghasilkan varietas baru dengan karakteristik pascapanen yang lebih unggul. Wolt et al. (2016) menyebutkan bahwa dengan menggunakan pendekatan ini, tanaman dapat dikembangkan untuk memiliki kulit lebih tebal, struktur sel lebih kuat, atau mengandung senyawa antioksidan yang memperlambat proses pembusukan.

Kemajuan ini memberikan manfaat langsung terhadap pengurangan limbah di sepanjang rantai pasokan pangan. Tanaman yang lebih tahan terhadap kerusakan mekanis dapat bertahan lebih lama selama proses panen, pengangkutan, dan penyimpanan. Contoh nyata adalah pengembangan varietas tomat atau pisang yang lebih tahan guncangan dan lebih lambat matang, sehingga tidak cepat rusak selama pengiriman ke pasar. Hal ini sangat penting bagi petani dan pelaku usaha kecil di negara berkembang yang seringkali mengalami kerugian besar akibat produk yang tidak sampai ke konsumen dalam kondisi baik.

Bioteknologi juga memungkinkan pengubahan struktur kimiawi tanaman untuk memperlambat proses fisiologis seperti pematangan dan pelunakan. Misalnya, penghambatan produksi etilen—hormon pematangan buah—dapat memperlambat proses penuaan alami tanaman, sehingga memperpanjang umur simpannya. Pendekatan ini telah diterapkan pada beberapa produk seperti apel dan pisang yang direkayasa agar memiliki laju pematangan lebih lambat tanpa mengurangi rasa atau nilai gizinya. Dengan umur simpan yang lebih panjang, produk pangan memiliki waktu lebih banyak untuk didistribusikan, dijual, dan dikonsumsi sebelum membusuk.

5. Penerapan Teknologi Sensor dan IoT dalam Pengelolaan Pangan Pascapanen

Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan sensor pintar dalam pengelolaan pascapanen telah memberikan dampak signifikan terhadap efisiensi dan kualitas penyimpanan pangan. Dengan menggunakan sensor yang terpasang di berbagai titik dalam ruang penyimpanan, parameter-parameter seperti suhu, kelembaban, kadar gas, dan kualitas udara dapat dipantau secara real-time. Hal ini

memungkinkan pengelola penyimpanan untuk menjaga kondisi ideal bagi produk pangan, yang sangat penting untuk memperlambat proses pembusukan dan kerusakan. Keberadaan teknologi ini membantu menciptakan lingkungan yang lebih stabil, mengurangi risiko pembusukan yang disebabkan oleh perubahan suhu atau kelembaban yang tidak terkontrol.

Salah satu keuntungan utama dari sistem berbasis IoT adalah kemampuannya dalam memberikan data yang dapat diakses kapan saja dan di mana saja. Petani atau pengelola distribusi dapat memantau kondisi penyimpanan produk pangan melalui perangkat seluler atau komputer, memungkinkan untuk mengambil tindakan preventif jika ada parameter yang tidak sesuai dengan kondisi yang diinginkan. Sebagai contoh, jika suhu dalam ruang penyimpanan meningkat melebihi ambang batas, sistem dapat memberikan peringatan otomatis kepada pengelola untuk segera menyesuaikan pengaturan suhu, atau bahkan mematikan unit pendingin jika diperlukan. Ini mengurangi risiko kerusakan produk yang dapat terjadi jika perubahan kondisi tidak segera terdeteksi.

Penerapan teknologi sensor dan IoT juga memungkinkan sistem yang lebih efisien dalam mengelola penyimpanan jangka panjang. Sebagai contoh, dalam pengelolaan padi yang disimpan di gudang atau silo, sensor kelembaban dapat mendeteksi adanya kelembaban berlebih, yang sering kali menjadi penyebab utama pembusukan dan pertumbuhan jamur. Dengan data real-time dari sensor, petani dapat segera mengatur sistem ventilasi atau dehumidifikasi untuk mengurangi kelembaban dan mencegah kerusakan yang lebih parah pada hasil panen. Ini sangat membantu mengurangi kerugian ekonomi yang timbul akibat pembusukan atau kerusakan pascapanen.

Sensor IoT juga memungkinkan pemantauan kadar gas, seperti oksigen dan karbon dioksida, yang dapat mempengaruhi proses pematangan dan pembusukan produk pangan. Dalam penyimpanan produk yang sensitif terhadap gas-gas ini, seperti buah-buahan dan sayuran, teknologi IoT dapat memberikan peringatan dini jika terjadi perubahan konsentrasi gas yang dapat mempercepat proses pembusukan. Dengan demikian, pengelolaan pascapanen menjadi lebih presisi dan terkontrol, yang pada gilirannya membantu mengurangi pemborosan dan menjaga kualitas pangan.

C. Bioteknologi dalam Produksi Pangan

Bioteknologi merupakan salah satu cabang ilmu yang menggabungkan prinsip-prinsip biologi dengan teknologi untuk memanfaatkan organisme, sel, dan biomolekul guna menghasilkan produk yang bermanfaat bagi manusia. Dalam sektor pangan, bioteknologi telah digunakan secara luas untuk meningkatkan kualitas, kuantitas, dan keberlanjutan produksi pangan, serta meningkatkan ketahanan pangan di tingkat global. Dengan adanya tantangan besar terkait perubahan iklim, pertumbuhan populasi, dan degradasi sumber daya alam, bioteknologi hadir sebagai salah satu solusi yang menawarkan inovasi untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan sistem pangan.

Menurut FAO (2020), bioteknologi pangan dapat dibagi menjadi dua kategori utama: bioteknologi konvensional dan bioteknologi modern. Bioteknologi konvensional mengacu pada teknik yang sudah lama digunakan, seperti fermentasi untuk produksi pangan, sementara bioteknologi modern meliputi teknik-teknik seperti rekayasa genetika dan modifikasi genetik untuk menciptakan tanaman atau mikroorganisme dengan sifat-sifat tertentu yang menguntungkan bagi produksi pangan. Penerapan bioteknologi dalam produksi pangan dapat memberikan kontribusi besar dalam menghadapi masalah ketahanan pangan global, meningkatkan kualitas produk, mengurangi kerugian pascapanen, dan memodifikasi karakteristik produk pangan agar lebih tahan terhadap penyakit, hama, dan perubahan iklim.

1. Rekayasa Genetika dalam Pengembangan Tanaman Pangan

Rekayasa genetika merupakan inovasi bioteknologi yang sangat penting dalam dunia pertanian modern. Teknologi ini memungkinkan para ilmuwan untuk memodifikasi DNA tanaman dengan tujuan memperoleh sifat-sifat yang lebih menguntungkan, seperti ketahanan terhadap hama, penyakit, atau kondisi lingkungan yang ekstrem. Dalam konteks pertanian, rekayasa genetika memungkinkan pengembangan tanaman yang lebih kuat dan tahan banting, yang dapat beradaptasi dengan berbagai tantangan alam seperti kekeringan, salinitas tinggi, atau suhu ekstrem. Tanaman yang dimodifikasi genetik (GMO) ini memiliki potensi besar untuk meningkatkan hasil panen dan mengurangi kerugian

yang disebabkan oleh faktor lingkungan yang tidak dapat diprediksi (Shinwari et al., 2020).

Salah satu contoh sukses penerapan rekayasa genetika dalam pertanian adalah pengembangan tanaman yang tahan terhadap hama dan penyakit. Tanaman jagung Bt (*Bacillus thuringiensis*) adalah salah satu contoh GMO yang telah dimodifikasi untuk menghasilkan protein yang mematikan bagi hama tertentu, seperti ulat grayak. Dengan menggunakan jagung Bt, para petani dapat mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, yang tidak hanya mahal tetapi juga berpotensi merusak lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan jagung Bt dapat meningkatkan hasil panen dengan mengurangi kerusakan akibat hama, sekaligus mengurangi biaya dan dampak negatif penggunaan pestisida.

Rekayasa genetika juga telah berhasil mengembangkan tanaman yang tahan terhadap kekeringan. Padi tahan kekeringan, yang dikembangkan menggunakan gen-gen tertentu untuk meningkatkan toleransi terhadap kekurangan air, merupakan contoh dari bagaimana rekayasa genetika dapat membantu meningkatkan ketahanan pangan di daerah yang sering mengalami kekeringan. Tanaman ini dapat bertahan hidup meskipun menerima pasokan air yang terbatas, yang memungkinkan petani untuk mendapatkan hasil yang lebih stabil bahkan dalam kondisi kekeringan yang ekstrem. Inovasi semacam ini sangat penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim yang menyebabkan pola cuaca yang lebih tidak menentu di seluruh dunia.

Rekayasa genetika juga digunakan untuk meningkatkan kualitas gizi tanaman. Salah satu contoh yang terkenal adalah Golden Rice, yang telah dimodifikasi untuk mengandung provitamin A, yang sangat dibutuhkan untuk mencegah kekurangan vitamin A pada anak-anak dan ibu hamil di negara-negara berkembang. Program pengembangan Golden Rice di Filipina menunjukkan potensi besar dalam membantu mengatasi defisiensi gizi yang dapat menyebabkan kebutaan dan gangguan kesehatan lainnya pada populasi yang bergantung pada beras sebagai sumber utama makanan. Dengan meningkatkan kandungan nutrisi pada tanaman pangan, rekayasa genetika dapat berperan besar dalam memerangi malnutrisi global.

2. Mikroorganisme dalam Produksi Pangan

Mikroorganisme telah berperan penting dalam produksi pangan sejak zaman kuno, dengan proses fermentasi yang digunakan untuk menghasilkan berbagai produk pangan seperti tempe, keju, yogurt, dan roti. Proses fermentasi ini melibatkan mikroorganisme seperti bakteri, ragi, dan kapang yang memecah bahan organik dalam pangan, menghasilkan produk akhir dengan rasa, tekstur, dan aroma yang khas. Seiring perkembangan bioteknologi, penggunaan mikroorganisme dalam produksi pangan semakin efisien dan terkontrol, menghasilkan produk yang lebih berkualitas dan lebih cepat.

Salah satu inovasi terbesar dalam penggunaan mikroorganisme dalam pangan adalah pengembangan probiotik. Probiotik adalah mikroorganisme hidup yang memberikan manfaat kesehatan, terutama untuk kesehatan pencernaan. Bakteri probiotik yang digunakan dalam produk seperti yogurt, kefir, dan minuman fermentasi telah terbukti membantu menjaga keseimbangan mikroflora usus dan meningkatkan daya tahan tubuh terhadap berbagai penyakit. Konsumsi probiotik secara teratur dapat meningkatkan pencernaan, memperbaiki penyerapan nutrisi, serta mengurangi gejala gangguan pencernaan seperti diare dan sembelit. Dengan meningkatnya kesadaran akan kesehatan pencernaan, permintaan untuk produk pangan yang mengandung probiotik semakin meningkat (Soemarie et al., 2021).

Mikroorganisme juga digunakan untuk memproduksi bahan tambahan pangan, seperti enzim, yang berfungsi untuk meningkatkan rasa, tekstur, dan kualitas produk pangan. Enzim yang dihasilkan oleh mikroorganisme digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti pemecahan pati untuk menghasilkan sirup manis, pembuatan roti, serta dalam proses pemasakan dan pengolahan daging. Enzim-enzim ini membantu mempercepat proses produksi dan meningkatkan efisiensi industri pangan. Penggunaan mikroorganisme untuk produksi enzim juga lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan metode kimiawi, karena mengurangi penggunaan bahan kimia berbahaya dalam proses produksi.

Mikroorganisme juga memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi pemrosesan pangan melalui produksi biomassa yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai industri. Misalnya, mikroorganisme seperti alga dan jamur dapat menghasilkan biofuel yang dapat digunakan sebagai alternatif energi terbarukan, menggantikan bahan bakar fosil dalam proses produksi pangan. Biomassa

mikroorganisme dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan bioetanol dan biogas, yang dapat digunakan dalam proses fermentasi dan pemanasan dalam produksi pangan. Dengan demikian, mikroorganisme tidak hanya berkontribusi pada produksi pangan itu sendiri, tetapi juga dapat mengurangi ketergantungan pada sumber daya alam yang terbatas.

3. Bioteknologi untuk Mengurangi Pemborosan Pangan

Bioteknologi telah memberikan kontribusi yang signifikan dalam mengurangi pemborosan pangan, terutama pada tahap pascapanen. Salah satu teknologi yang semakin berkembang adalah penggunaan mikroorganisme dalam proses pengawetan pangan. Mikroorganisme, seperti bakteri asam laktat yang digunakan dalam fermentasi, dapat memperpanjang umur simpan produk pangan dengan cara mengubah lingkungan mikro produk tersebut menjadi kondisi yang tidak mendukung pertumbuhan mikroba patogen. Fermentasi ini sangat berguna dalam mengawetkan sayuran, buah-buahan, dan produk pangan lainnya, sehingga mengurangi pemborosan yang sering terjadi karena pembusukan akibat mikroorganisme. Proses fermentasi tidak hanya memperpanjang umur simpan, tetapi juga meningkatkan kualitas gizi dan rasa produk pangan tersebut.

Mikroorganisme yang digunakan dalam pengawetan pangan juga memiliki kemampuan untuk memperbaiki kualitas produk dan meningkatkan ketahanan pangan terhadap faktor eksternal yang dapat menyebabkan kerusakan. Contohnya, dalam produksi susu fermentasi atau sauerkraut, bakteri probiotik tidak hanya memperpanjang daya simpan, tetapi juga menambah nilai gizi dan menawarkan manfaat kesehatan tambahan, seperti meningkatkan sistem pencernaan konsumen. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi bioteknologi dalam pengawetan pangan tidak hanya berfungsi untuk mengurangi pemborosan, tetapi juga mendatangkan manfaat tambahan bagi konsumen.

Nanoteknologi juga mulai diterapkan dalam pengemasan pangan untuk memperpanjang umur simpan produk. Kemasan berbasis nanomaterial memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketahanan terhadap mikroba dan oksidasi, dua faktor utama yang menyebabkan kerusakan pada produk pangan. Nanoteknologi memungkinkan pembuatan kemasan yang lebih efektif dalam melindungi produk dari faktor eksternal, seperti udara dan kelembaban, yang dapat mempercepat

pembusukan. Kemasan yang mengandung nanopartikel perak atau zinc, misalnya, dapat mencegah pertumbuhan mikroba dan menjaga kesegaran produk lebih lama, sehingga mengurangi kerugian yang disebabkan oleh pembusukan.

Kemasan berbasis nanoteknologi dapat memperpanjang umur simpan produk segar, seperti buah-buahan dan sayuran, serta produk pangan olahan lainnya. Dengan teknologi ini, produk pangan dapat disimpan lebih lama tanpa memerlukan bahan pengawet kimia yang dapat menurunkan kualitas dan keamanan pangan. Hal ini sangat penting dalam mengurangi pemborosan pangan, terutama untuk produk yang memiliki masa simpan yang relatif singkat. Selain itu, kemasan berbasis nanoteknologi juga lebih ramah lingkungan karena mengurangi penggunaan plastik konvensional yang sulit terurai di alam.

4. Bioteknologi dalam Pengembangan Pangan Fungsional

Bioteknologi berperan yang sangat penting dalam pengembangan pangan fungsional, yaitu pangan yang tidak hanya memberikan nilai gizi dasar tetapi juga memberikan manfaat kesehatan tambahan bagi konsumennya. Pangan fungsional dirancang untuk meningkatkan kualitas hidup dan mencegah penyakit kronis melalui kandungan bioaktif seperti antioksidan, asam lemak omega-3, serat, serta vitamin dan mineral esensial lainnya. Inovasi dalam bidang bioteknologi memungkinkan pemanfaatan bahan-bahan alami yang dapat diperkaya untuk menghasilkan produk pangan yang lebih bernutrisi dan lebih bermanfaat bagi kesehatan.

Salah satu aplikasi utama bioteknologi dalam pangan fungsional adalah pengembangan produk yang diperkaya dengan probiotik. Probiotik, yaitu mikroorganisme hidup yang memberikan manfaat kesehatan ketika dikonsumsi dalam jumlah yang cukup, membantu menjaga keseimbangan mikroflora usus dan meningkatkan sistem pencernaan. Produk-produk seperti yogurt, kefir, dan minuman fermentasi semakin populer berkat penambahan probiotik yang lebih banyak, yang mendukung kesehatan pencernaan serta meningkatkan sistem kekebalan tubuh. Selain itu, mikroorganisme probiotik juga memiliki potensi untuk mengurangi gejala-gejala gangguan pencernaan, seperti sindrom iritasi usus dan diare.

Pengembangan pangan fungsional berbasis bioteknologi juga mencakup pembuatan produk bebas alergen yang lebih aman untuk

individu dengan intoleransi atau alergi terhadap bahan tertentu, seperti gluten, susu, atau kacang-kacangan. Proses rekayasa genetika memungkinkan pengembangan varietas tanaman atau produk pangan yang tidak mengandung alergen tertentu, membuka kemungkinan bagi yang menderita alergi untuk menikmati berbagai jenis makanan yang sebelumnya harus dihindari. Inovasi semacam ini sangat penting untuk meningkatkan kualitas hidup orang-orang dengan alergi makanan, yang sering kali terbatas dalam pilihan makanan.

Contoh inovasi lainnya dalam pengembangan pangan fungsional adalah fortifikasi padi dengan zat besi dan vitamin A. Kekurangan zat gizi ini adalah masalah kesehatan yang signifikan di banyak negara berkembang, dan bioteknologi telah memungkinkan pembuatan varietas padi yang diperkaya dengan zat besi dan vitamin A. Proyek Golden Rice adalah contoh konkret dari fortifikasi tanaman melalui rekayasa genetika, yang bertujuan untuk mengurangi kekurangan vitamin A yang dapat menyebabkan kebutaan dan gangguan kesehatan lainnya, khususnya pada anak-anak dan ibu hamil di negara berkembang.

Penelitian terkini juga berfokus pada pengembangan makanan dengan kandungan probiotik yang lebih tinggi dan manfaat kesehatan lainnya. Produk pangan yang diperkaya dengan probiotik tidak hanya meningkatkan pencernaan, tetapi juga dapat berperan dalam menjaga keseimbangan mikroflora usus, yang berhubungan erat dengan penguatan sistem kekebalan tubuh. Berbagai penelitian sedang dilakukan untuk mengembangkan produk pangan yang lebih kaya akan bahan bioaktif yang dapat mendukung kesehatan tubuh secara menyeluruh, menjadikannya lebih dari sekadar sumber energi atau nutrisi dasar. Bioteknologi memberikan kesempatan untuk meningkatkan kualitas hidup manusia melalui inovasi pangan yang lebih canggih dan bermanfaat.

D. Sistem Pertanian Vertikal dan Hidroponik

Pada beberapa tahun terakhir, sektor pertanian dihadapkan pada berbagai tantangan besar yang mempengaruhi ketahanan pangan global, antara lain perubahan iklim, urbanisasi yang pesat, serta terbatasnya lahan pertanian. Untuk mengatasi masalah ini, teknologi pertanian inovatif seperti sistem pertanian vertikal dan hidroponik menjadi solusi yang menjanjikan. Kedua sistem ini mengusung pendekatan baru dalam

pertanian dengan memaksimalkan penggunaan ruang dan sumber daya, serta memberikan solusi terhadap masalah terkait degradasi lahan, penggunaan air, dan ketergantungan pada pupuk kimia. Sistem pertanian vertikal dan hidroponik bukan hanya mengurangi ketergantungan pada lahan pertanian konvensional tetapi juga menawarkan metode pertanian yang lebih ramah lingkungan. Kedua sistem ini sangat relevan dalam mendukung ketahanan pangan di daerah yang memiliki keterbatasan lahan atau di wilayah urban yang semakin berkembang.

Sistem pertanian vertikal adalah metode budidaya tanaman yang dilakukan secara bertingkat atau vertikal, dengan memanfaatkan ruang yang terbatas di lingkungan perkotaan atau di daerah dengan lahan terbatas. Tanaman ditanam dalam rak-rak bertingkat yang dapat disusun vertikal, sehingga memungkinkan penggunaan ruang secara lebih efisien. Sistem ini biasanya dilengkapi dengan teknologi canggih seperti pencahayaan LED, sistem irigasi otomatis, dan sensor untuk monitoring kondisi tanaman (Benke & Tomkins, 2017). Sistem pertanian vertikal berpotensi untuk menghasilkan produk pangan dengan menggunakan lebih sedikit sumber daya dibandingkan dengan pertanian tradisional. Dengan menggunakan sistem ini, tanaman dapat tumbuh lebih cepat dan lebih efisien, mengingat lingkungan yang terkendali dan penggunaan ruang yang optimal. Salah satu contoh penerapan sistem pertanian vertikal adalah aeroponik, di mana akar tanaman menggantung di udara dan disemprot dengan larutan nutrisi.

Hidroponik adalah metode pertanian yang menggunakan air sebagai media tanam, bukan tanah. Dalam sistem ini, akar tanaman terendam dalam larutan nutrisi yang mengandung semua unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman untuk tumbuh dengan baik. Hidroponik sangat cocok diterapkan di lahan terbatas karena tidak memerlukan tanah yang luas dan dapat dilaksanakan di dalam ruangan atau lingkungan perkotaan (Resh, 2022). Ada beberapa jenis sistem hidroponik, seperti sistem aliran air berkelanjutan (NFT), sistem media terendam (DWC), dan sistem rakit apung. Masing-masing memiliki keunggulan dan aplikasi tertentu tergantung pada jenis tanaman yang dibudidayakan dan kebutuhan spesifik lainnya.

1. Efisiensi Penggunaan Lahan

Sistem pertanian vertikal menawarkan solusi efisien untuk mengatasi keterbatasan lahan dengan memaksimalkan penggunaan

ruang vertikal. Dengan menanam tanaman secara bertingkat, produksi pangan dapat ditingkatkan meskipun lahan yang tersedia terbatas. Hal ini sangat relevan di daerah perkotaan, di mana lahan pertanian terbuka semakin berkurang akibat perkembangan infrastruktur dan urbanisasi. Menurut Al-Chalabi (2015), pertanian vertikal memungkinkan petani untuk memanfaatkan ruang yang tidak terpakai, seperti gedung-gedung tinggi, untuk produksi pangan, sehingga meningkatkan hasil tanpa membutuhkan lahan yang luas.

Hidroponik juga memberikan solusi serupa dengan mengurangi ketergantungan pada tanah. Dalam sistem hidroponik, tanaman dapat tumbuh dengan baik hanya menggunakan air yang diperkaya dengan nutrisi, tanpa perlu tanah. Teknologi ini memungkinkan tanaman ditanam di ruang terbatas, seperti atap gedung atau dalam ruangan. Hal ini menjadi penting dalam konteks pertanian kota, di mana lahan terbuka semakin langka. Hidroponik memungkinkan produksi pangan di lingkungan perkotaan dengan memanfaatkan area yang tidak dapat digunakan untuk pertanian tradisional.

Salah satu keuntungan utama dari pertanian vertikal dan hidroponik adalah kemampuan untuk mengatasi keterbatasan lahan di perkotaan yang padat penduduk. Dengan memanfaatkan ruang yang lebih kecil, kedua sistem ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan lahan, tetapi juga mengurangi kebutuhan transportasi panjang dan biaya distribusi pangan. Ini berarti produk dapat dipanen lebih cepat dan lebih dekat dengan konsumen, meningkatkan ketahanan pangan di kota-kota besar.

2. Pengurangan Penggunaan Air dan Pupuk

Sistem pertanian vertikal dan hidroponik menawarkan pengurangan signifikan dalam konsumsi air jika dibandingkan dengan pertanian tradisional. Dalam pertanian konvensional, air banyak terbuang melalui penguapan dan perkolasi, yang menyebabkan pemborosan sumber daya air yang berharga. Sebaliknya, dalam sistem hidroponik dan vertikal, air disirkulasikan dalam sistem tertutup, yang memungkinkan tanaman untuk menyerap air secara efisien. Hanya sedikit air yang hilang dalam proses ini, sehingga mengurangi pemborosan. Menurut FAO (2017), sistem hidroponik dapat menghemat hingga 90% penggunaan air dibandingkan dengan metode pertanian konvensional.

Kedua sistem ini juga lebih hemat dalam penggunaan pupuk. Dalam pertanian konvensional, pupuk seringkali diberikan dalam jumlah berlebih, menyebabkan sebagian besar pupuk tersebut tercemar ke lingkungan, seperti dalam air tanah atau sungai. Namun, dalam sistem hidroponik dan vertikal, pupuk diberikan melalui larutan yang langsung diserap oleh tanaman, memungkinkan penggunaan pupuk yang lebih terukur dan presisi. Hal ini mengurangi pemborosan pupuk dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran air dan tanah.

Penggunaan pupuk yang lebih efisien tidak hanya mengurangi biaya produksi, tetapi juga membantu mempertahankan kualitas tanah dan mencegah degradasi lingkungan. Tanaman mendapatkan semua nutrisi yang dibutuhkan secara langsung, tanpa harus bergantung pada tanah yang dapat mengalami kelelahan atau kehilangan kesuburan akibat penggunaan pupuk yang berlebihan. Dengan demikian, sistem ini lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

3. Pengurangan Dampak Lingkungan

Sistem pertanian vertikal dan hidroponik dapat mengurangi dampak lingkungan secara signifikan dibandingkan dengan pertanian konvensional. Salah satu keuntungan utama adalah pengurangan penggunaan pestisida dan herbisida kimia. Dalam sistem vertikal dan hidroponik, tanaman tumbuh dalam lingkungan yang lebih terkendali, yang mengurangi risiko serangan hama dan penyakit. Tanaman yang dilindungi dari faktor lingkungan eksternal seperti cuaca dan kelembaban ekstrem cenderung lebih sehat dan memiliki daya tahan yang lebih baik terhadap serangan organisme pengganggu. Hal ini mengurangi kebutuhan untuk menggunakan pestisida dan herbisida kimia yang dapat mencemari lingkungan.

Dengan pengurangan penggunaan bahan kimia berbahaya, dampak negatif terhadap ekosistem juga berkurang. Pestisida kimia sering kali mencemari tanah, air, dan udara, serta membunuh organisme non-target yang dapat merusak keseimbangan ekosistem. Di sisi lain, dalam sistem hidroponik dan vertikal, tanaman dapat tumbuh dengan lebih alami dan sehat tanpa ketergantungan pada bahan kimia yang merusak lingkungan. Oleh karena itu, metode ini memberikan alternatif yang lebih ramah lingkungan dalam produksi pangan.

Teknologi pengendalian otomatis yang digunakan dalam sistem ini juga berperan penting dalam mengurangi dampak lingkungan. Teknologi ini memungkinkan pengelolaan yang lebih tepat dan efisien, termasuk dalam pengaturan suhu, kelembaban, dan pencahayaan. Dengan kontrol yang lebih akurat terhadap kondisi lingkungan, tanaman dapat tumbuh optimal tanpa pemborosan sumber daya atau penggunaan bahan kimia berlebihan. Sistem otomatis ini juga mengurangi potensi kesalahan manusia yang bisa berdampak negatif pada kualitas tanaman dan lingkungan.

4. Ketahanan Pangan di Daerah Urban

Dengan pesatnya urbanisasi, kebutuhan pangan di daerah perkotaan semakin meningkat. Kota-kota besar menghadapi tantangan besar dalam memenuhi permintaan pangan yang terus berkembang, sementara pasokan pangan dari luar kota sering kali terhambat oleh masalah transportasi dan ketergantungan pada sistem pasokan global. Sistem pertanian vertikal dan hidroponik menawarkan solusi yang efektif untuk mengatasi masalah ini dengan memungkinkan produksi pangan lokal di area yang terbatas. Dengan menanam tanaman secara vertikal atau dalam sistem hidroponik, produksi pangan dapat dilakukan dalam ruangan atau di atap gedung, mengurangi ketergantungan pada lahan pertanian terbuka yang semakin langka di kawasan perkotaan.

Sistem ini juga memiliki keunggulan dalam mengurangi jejak karbon yang dihasilkan dari transportasi pangan. Pangan yang diproduksi secara lokal tidak perlu diangkut dari daerah yang jauh, yang biasanya memerlukan transportasi jarak jauh yang mengonsumsi energi dan menghasilkan emisi karbon. Dengan sistem pertanian vertikal dan hidroponik, makanan dapat diproduksi lebih dekat dengan konsumen, sehingga mengurangi konsumsi energi yang terkait dengan distribusi pangan. Hal ini secara langsung berkontribusi pada pengurangan dampak lingkungan yang dihasilkan oleh sistem distribusi pangan konvensional.

Ketahanan pangan di daerah urban juga diperkuat dengan kemampuan sistem pertanian vertikal untuk mengatasi keterbatasan lahan. Tanaman dapat ditanam dalam ruangan yang sangat terbatas, seperti di atap gedung, balkon, atau bahkan dalam ruangan di dalam gedung. Ini memberi kesempatan untuk menghasilkan pangan di daerah yang sebelumnya tidak dapat digunakan untuk pertanian. Dengan cara ini, kota-kota besar dapat menghasilkan pangan secara mandiri dan

meningkatkan ketahanan pangan tanpa harus bergantung pada sumber daya luar yang rentan terhadap gangguan.

BAB V
TRANSFORMASI PERTANIAN BERBASIS ENERGI RAMAH LINGKUNGAN

Transformasi sektor pertanian dengan fokus pada pemanfaatan energi ramah lingkungan, yang semakin penting di tengah tantangan perubahan iklim global. Sektor pertanian, yang sebelumnya bergantung pada energi fosil, kini beralih ke penggunaan sumber energi terbarukan, seperti energi surya, biogas, dan angin, untuk mengurangi jejak karbon dan meningkatkan efisiensi produksi. Perubahan ini bukan hanya mendukung keberlanjutan lingkungan, tetapi juga membuka peluang baru untuk pengelolaan pertanian yang lebih efisien dan ekonomis.

Energi terbarukan memberikan solusi dalam mengatasi beberapa tantangan besar yang dihadapi sektor pertanian, seperti ketergantungan pada energi fosil, fluktuasi harga energi, dan dampak negatif terhadap lingkungan. Teknologi energi surya, misalnya, telah diterapkan untuk memberi daya pada sistem irigasi dan peralatan pertanian lainnya, mengurangi biaya operasional, serta meningkatkan ketahanan pangan. Begitu juga dengan biogas, yang dihasilkan dari limbah pertanian dan dapat digunakan sebagai sumber energi untuk memanaskan rumah kaca atau memberi daya pada mesin pertanian.

A. Pemanfaatan Energi Terbarukan dalam Pertanian

Pertanian, sebagai sektor vital bagi ketahanan pangan dan perekonomian banyak negara, kini menghadapi tantangan besar terkait keberlanjutan. Salah satu tantangan utama adalah ketergantungan pada sumber energi fosil yang tidak ramah lingkungan dan semakin terbatas.

Penggunaan energi fosil dalam pertanian, seperti untuk pengolahan lahan, irigasi, dan proses pascapanen, berkontribusi pada emisi gas rumah kaca yang memperburuk perubahan iklim global. Oleh karena itu, pemanfaatan energi terbarukan dalam sektor pertanian menjadi salah satu solusi penting untuk mencapai pertanian yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan.

Energi terbarukan, yang meliputi tenaga surya, tenaga angin, biomassa, dan energi air, menawarkan alternatif yang lebih bersih dan berkelanjutan dibandingkan dengan energi fosil. Dalam konteks pertanian, teknologi energi terbarukan dapat diterapkan untuk berbagai aktivitas, termasuk irigasi, pengolahan hasil pertanian, dan pemanfaatan limbah pertanian.

1. Irigasi Berkelanjutan dengan Tenaga Surya

Irigasi merupakan salah satu komponen penting dalam pertanian, terutama di daerah yang kekurangan air. Sistem irigasi yang efektif dan efisien sangat diperlukan untuk mendukung pertumbuhan tanaman, terutama di daerah kering atau semi-kering. Namun, salah satu tantangan besar dalam irigasi adalah ketergantungan pada sumber energi, yang sering kali mengandalkan bahan bakar fosil. Untuk mengatasi masalah ini, teknologi irigasi tenaga surya telah muncul sebagai solusi inovatif yang tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga efisien dalam penggunaan sumber daya alam yang terbatas.

Pompa irigasi tenaga surya bekerja dengan memanfaatkan energi matahari untuk menggerakkan pompa yang digunakan untuk menyedot air dari sumber seperti sumur atau sungai. Panel surya yang dipasang pada sistem ini mengubah energi matahari menjadi listrik, yang kemudian digunakan untuk mengoperasikan pompa. Dengan cara ini, petani dapat mendapatkan akses ke air irigasi tanpa harus bergantung pada bahan bakar fosil, yang harganya sering kali tidak stabil dan sulit dijangkau, terutama di daerah terpencil.

2. Pengolahan Hasil Pertanian Menggunakan Energi Terbarukan

Pengolahan hasil pertanian memerlukan berbagai proses yang mengandalkan energi untuk menggerakkan mesin, memanaskan, atau mengeringkan produk. Dalam banyak kasus, proses-proses ini mengandalkan sumber energi fosil yang tidak hanya mahal tetapi juga berkontribusi pada emisi gas rumah kaca. Untuk mengatasi masalah ini,

penerapan energi terbarukan dalam pengolahan hasil pertanian semakin populer. Energi surya, biomassa, dan biogas menjadi pilihan utama yang tidak hanya lebih ramah lingkungan tetapi juga lebih berkelanjutan. Teknologi ini memberikan solusi untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan (Coimbra-Araújo et al., 2014).

Salah satu contoh penerapan energi terbarukan dalam pengolahan pertanian adalah penggunaan biomassa dan biogas untuk menggerakkan mesin di pabrik pengolahan makanan. Biomassa, yang berasal dari bahan organik seperti limbah pertanian, sisa tanaman, atau limbah hewan, dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Proses pembakaran biomassa menghasilkan energi panas yang dapat digunakan untuk menggerakkan mesin pengering atau pemanasan dalam pengolahan makanan. Selain itu, biogas yang dihasilkan dari proses fermentasi limbah organik juga dapat digunakan untuk menghasilkan listrik atau energi panas yang diperlukan dalam pengolahan produk pertanian.

3. Rumah Kaca Berbasis Energi Terbarukan

Rumah kaca berbasis energi terbarukan semakin berkembang sebagai solusi untuk meningkatkan hasil pertanian, terutama di daerah dengan iklim yang tidak mendukung untuk pertanian sepanjang tahun. Salah satu inovasi yang banyak diterapkan adalah penggunaan sistem pemanas tenaga surya dan lampu LED bertenaga surya untuk mendukung kondisi yang ideal bagi pertumbuhan tanaman. Dengan memanfaatkan energi surya, rumah kaca dapat mempertahankan suhu yang stabil, memperpanjang musim tanam, dan meningkatkan produksi pertanian. Teknologi ini memberikan keuntungan signifikan bagi petani, terutama di kawasan dengan suhu ekstrem atau yang tidak memiliki musim tanam yang panjang.

Sistem pemanas tenaga surya bekerja dengan menyerap energi matahari melalui panel surya yang dipasang di atap rumah kaca. Energi yang terkumpul kemudian digunakan untuk memanaskan udara di dalam rumah kaca, menciptakan suhu yang sesuai untuk tanaman meskipun di luar musim tanam atau dalam cuaca dingin. Selain itu, penggunaan lampu LED bertenaga surya dapat membantu menciptakan pencahayaan yang optimal bagi tanaman pada malam hari atau saat hari pendek. Lampu LED ini sangat efisien dalam mengonsumsi energi dan

membantu meminimalkan konsumsi listrik secara keseluruhan, menjadikan rumah kaca ini lebih ramah lingkungan dan hemat biaya.

B. Teknologi untuk Pengelolaan Limbah Pertanian

Limbah pertanian adalah hasil sampingan dari berbagai kegiatan produksi pertanian yang tidak dapat dikonsumsi atau digunakan langsung. Limbah ini sering kali berupa bahan organik, seperti batang, daun, jerami, kulit buah, dan limbah ternak, serta bahan non-organik, seperti plastik dan bahan kimia. Di banyak negara berkembang, limbah pertanian sering kali dibakar atau dibuang begitu saja, yang dapat mengakibatkan polusi udara, pencemaran tanah, dan hilangnya potensi sumber daya yang seharusnya dapat dimanfaatkan.

Seiring dengan semakin tingginya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan dan pengurangan dampak lingkungan, berbagai teknologi baru kini dikembangkan untuk mengelola limbah pertanian secara lebih efektif dan ramah lingkungan. Teknologi ini tidak hanya bertujuan untuk mengurangi dampak negatif dari limbah, tetapi juga untuk mengubahnya menjadi produk yang berguna, seperti energi terbarukan, pupuk, dan bahan baku industri lainnya.

Pengelolaan limbah pertanian yang efektif juga memiliki dampak positif terhadap ekonomi pertanian, karena dapat menghasilkan pendapatan tambahan dan mengurangi ketergantungan pada input eksternal, seperti pupuk kimia dan bahan bakar fosil. Oleh karena itu, penerapan teknologi untuk pengelolaan limbah pertanian menjadi komponen penting dalam transformasi pertanian berbasis energi ramah lingkungan. Berbagai teknologi inovatif telah dikembangkan untuk mengelola limbah pertanian dengan cara yang ramah lingkungan. Beberapa teknologi utama yang digunakan dalam pengelolaan limbah pertanian meliputi:

1. Konversi Biomassa menjadi Energi Terbarukan

Salah satu teknologi yang paling banyak diterapkan untuk mengelola limbah pertanian adalah konversi biomassa menjadi energi terbarukan, seperti biogas dan bioenergi. Proses konversi ini dapat dilakukan melalui beberapa metode, seperti pembakaran langsung, pirolisis, dan fermentasi anaerobik.

a. Biogas dari Fermentasi Anaerobik

Konversi biomassa menjadi energi terbarukan melalui biogas merupakan salah satu solusi yang sangat potensial dalam pengelolaan limbah pertanian. Proses fermentasi anaerobik, yang mengubah bahan organik seperti kotoran ternak dan sisa tanaman menjadi biogas, telah terbukti menjadi metode yang efisien untuk menghasilkan energi terbarukan. Dalam kondisi tanpa oksigen, mikroorganisme mengurai bahan organik untuk menghasilkan metana, yang kemudian dapat digunakan untuk berbagai keperluan energi, seperti menghasilkan listrik atau memasak.

Penggunaan biogas sebagai sumber energi alternatif memiliki banyak keuntungan, terutama di negara-negara berkembang seperti India dan China, di mana limbah pertanian melimpah. Dengan mengalihkan limbah pertanian menjadi biogas, proses ini tidak hanya membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga mengurangi emisi gas rumah kaca. Biogas yang dihasilkan juga dapat menjadi sumber energi yang lebih terjangkau dan ramah lingkungan, yang sangat penting bagi komunitas pedesaan yang sering menghadapi keterbatasan akses energi.

b. Pirolisis dan Gasifikasi Biomassa

Konversi biomassa menjadi energi melalui proses pirolisis dan gasifikasi merupakan inovasi penting dalam bidang energi terbarukan. Pirolisis adalah proses pemanasan biomassa pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen, yang menghasilkan tiga produk utama: arang (*charcoal*), bio-oil, dan gas sintetis. Bio-oil yang dihasilkan dari pirolisis dapat digunakan sebagai bahan bakar cair untuk keperluan pemanasan atau sebagai bahan baku dalam industri kimia. Sementara itu, gas sintetis yang dihasilkan dapat digunakan untuk menghasilkan listrik melalui pembangkit energi atau dimanfaatkan dalam sistem pemanas industri (Akhtar et al., 2018).

Teknologi gasifikasi biomassa, meskipun serupa dengan pirolisis, lebih difokuskan pada konversi biomassa menjadi gas yang dapat digunakan secara langsung sebagai bahan bakar. Dalam proses ini, biomassa dipanaskan dengan jumlah oksigen terbatas sehingga terjadi reaksi kimia yang menghasilkan gas, terutama hidrogen, karbon monoksida, dan metana. Gas ini

kemudian dapat digunakan untuk membangkitkan energi listrik atau sebagai bahan bakar untuk mesin dan generator. Selain sebagai sumber energi, proses ini juga mengurangi volume limbah pertanian secara signifikan, menjadikannya solusi yang berkelanjutan dalam manajemen limbah.

2. Pengolahan Limbah Menjadi Pupuk Organik

Pengolahan limbah pertanian menjadi pupuk organik merupakan salah satu strategi utama dalam mewujudkan sistem pertanian yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Pupuk organik adalah larutan dari pembusukan bahan-bahan organik yang berasal dari sisa tanaman, kotoran hewan, dan manusia yang kandungan unsur haranya lebih dari satu unsur (Oktavianus et al., 2025). Limbah-limbah seperti jerami padi, daun jagung, batang tanaman, hingga sisa sayuran, yang sebelumnya dianggap sebagai sampah, dapat dimanfaatkan kembali melalui proses komposting. Komposting adalah proses biologis alami di mana mikroorganisme menguraikan bahan organik menjadi humus, suatu materi yang kaya akan unsur hara. Pupuk kompos ini tidak hanya mampu meningkatkan kesuburan tanah, tetapi juga memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan kapasitas retensi air (Ducasse et al., 2022).

Salah satu metode komposting yang semakin populer adalah vermikomposting, yaitu penggunaan cacing tanah untuk mempercepat proses penguraian bahan organik. Cacing seperti Eisenia fetida bekerja dengan cara mencerna bahan organik dan mengeluarkannya dalam bentuk kotoran (*vermikompos*) yang sangat kaya akan unsur hara dan mikroorganisme bermanfaat. Dibandingkan kompos biasa, vermikompos lebih halus, lebih cepat terurai, dan memiliki kandungan nutrisi serta aktivitas biologis yang lebih tinggi (Nagaoka et al., 2019). Pupuk ini sangat baik untuk memperbaiki kesehatan tanah secara alami dan meningkatkan pertumbuhan tanaman.

Pengolahan limbah menjadi pupuk organik juga memiliki nilai ekonomi dan ekologis. Petani dapat menghemat biaya pembelian pupuk kimia yang harganya semakin meningkat, serta mengurangi pencemaran lingkungan akibat penumpukan limbah organik yang tidak terkelola. Limbah yang semula menjadi beban kini berubah menjadi sumber daya produktif. Bahkan, pupuk kompos dapat dipasarkan sebagai produk bernilai tambah, memberikan pendapatan tambahan bagi petani atau pelaku usaha pertanian kecil.

3. Pemanfaatan Limbah Plastik Pertanian

Limbah plastik pertanian merupakan salah satu tantangan besar dalam sektor pertanian modern, terutama akibat penggunaan mulsa plastik, kantong pembibitan, serta kemasan produk pertanian. Plastik-plastik ini, meskipun berguna dalam mengendalikan gulma, menjaga kelembapan tanah, dan memperpanjang umur simpan produk, sering kali dibuang begitu saja setelah digunakan. Akumulasi limbah plastik di lahan pertanian tidak hanya mencemari lingkungan, tetapi juga dapat merusak struktur tanah dan mengganggu mikroorganisme tanah yang penting bagi kesuburan.

Untuk mengatasi permasalahan ini, sejumlah teknologi daur ulang plastik pertanian telah dikembangkan. Proses daur ulang dimulai dari pengumpulan limbah plastik di lahan, kemudian dilakukan penggilingan dan pencucian untuk menghilangkan kotoran serta sisa bahan kimia. Setelah dibersihkan, plastik dicetak ulang menjadi bahan baru yang dapat digunakan kembali. Produk hasil daur ulang meliputi pot tanaman, komponen alat irigasi, hingga barang konstruksi seperti paving block atau papan plastik. Pendekatan ini memberikan solusi konkret untuk mengurangi limbah plastik sekaligus menciptakan nilai ekonomi baru.

Beberapa negara seperti Spanyol, Belanda, dan Tiongkok telah sukses menerapkan teknologi ini dalam skala besar. Program daur ulang plastik pertanian tidak hanya mengurangi limbah yang mencemari tanah pertanian, tetapi juga menyediakan bahan baku alternatif yang lebih murah bagi sektor pertanian dan industri. Di tingkat lokal, inisiatif serupa dapat memberdayakan petani dan komunitas desa dalam mengelola limbah sekaligus membuka peluang usaha baru.

4. Teknologi Pengolahan Limbah Cair dari Peternakan

Limbah cair dari peternakan, seperti urin ternak dan limbah dari proses pembersihan kandang, merupakan sumber pencemar lingkungan yang signifikan apabila tidak ditangani secara tepat. Kandungan bahan organik dan nutrien yang tinggi dalam limbah ini dapat mencemari air tanah dan sungai, menyebabkan eutrofikasi, serta menimbulkan bau tidak sedap yang mengganggu masyarakat sekitar. Oleh karena itu, pengelolaan limbah cair peternakan menjadi salah satu aspek penting dalam upaya menuju pertanian dan peternakan yang berkelanjutan.

Dengan kemajuan teknologi, limbah cair tersebut kini dapat diolah menjadi produk yang bermanfaat, seperti biogas dan pupuk cair. Salah satu teknologi yang digunakan adalah sistem pengolahan limbah secara anaerobik, yaitu proses fermentasi tanpa oksigen menggunakan mikroorganisme. Melalui proses ini, bahan organik dalam limbah diuraikan dan menghasilkan gas metana (CH_4), yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk memasak, penerangan, atau menjalankan mesin pertanian. Selain itu, hasil samping dari proses ini berupa pupuk cair yang kaya akan nitrogen, fosfor, dan kalium.

Penggunaan teknologi pengolahan limbah cair ini memiliki keuntungan ganda: mengurangi risiko pencemaran lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi sumber daya dalam sistem pertanian terpadu. Pupuk cair yang dihasilkan dapat langsung digunakan untuk menyuburkan lahan pertanian, sehingga mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia sintetis yang berpotensi merusak ekosistem tanah dalam jangka panjang. Energi dari biogas juga dapat menggantikan kebutuhan energi berbasis fosil yang mahal dan tidak ramah lingkungan.

C. *Circular Economy* dalam Sistem Pertanian

Di tengah meningkatnya tantangan perubahan iklim, deforestasi, dan penurunan kualitas tanah, sektor pertanian menjadi salah satu penyumbang terbesar terhadap kerusakan lingkungan global. Praktik pertanian konvensional, yang cenderung bergantung pada penggunaan sumber daya alam yang terbatas, seringkali mengarah pada penurunan keberlanjutan. Oleh karena itu, pengenalan dan penerapan model ekonomi sirkular (*circular economy*) dalam sistem pertanian menjadi suatu langkah penting untuk mencapai pertanian berkelanjutan yang lebih ramah lingkungan.

Ekonomi sirkular adalah model ekonomi yang berfokus pada pengurangan, penggunaan kembali, dan daur ulang sumber daya, dengan tujuan meminimalkan limbah dan memaksimalkan nilai produk, bahan, dan energi. Dalam konteks pertanian, ekonomi sirkular melibatkan penerapan prinsip-prinsip ini dalam produksi pangan, pengelolaan sumber daya alam, serta pengolahan dan distribusi hasil pertanian. Model ini tidak hanya berfokus pada efisiensi penggunaan sumber daya, tetapi juga pada pemulihan dan pengelolaan limbah untuk menciptakan siklus yang berkelanjutan. Penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam

sistem pertanian melibatkan berbagai strategi dan teknologi yang memungkinkan petani dan pelaku pertanian untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan mengurangi dampak lingkungan. Beberapa contoh aplikasinya antara lain:

1. Bioteknologi dan Pupuk Organik

Bioteknologi memiliki peran strategis dalam mendukung ekonomi sirkular di sektor pertanian, khususnya melalui pemanfaatan limbah organik menjadi produk bernilai guna tinggi seperti pupuk organik. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah pemanfaatan mikroorganisme, seperti bakteri dan jamur, untuk mempercepat proses dekomposisi bahan organik. Teknologi ini memungkinkan limbah tanaman, sisa panen, dan limbah ternak diubah menjadi pupuk yang kaya unsur hara esensial seperti nitrogen, fosfor, dan kalium. Hal ini tidak hanya mengurangi volume limbah tetapi juga menciptakan siklus tertutup yang memperkuat ketahanan dan keberlanjutan sistem pertanian.

Pupuk organik hasil dari pengolahan bioteknologi memiliki banyak keunggulan, antara lain memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas tanah dalam menyimpan air dan nutrisi, serta mendukung pertumbuhan mikroorganisme tanah yang bermanfaat. Berbeda dengan pupuk kimia yang cenderung merusak struktur dan ekosistem tanah dalam jangka panjang, pupuk organik lebih aman dan ramah lingkungan. Penggunaan pupuk organik secara berkelanjutan juga membantu mengurangi ketergantungan petani terhadap input pertanian berbasis kimia, yang cenderung mahal dan berdampak negatif terhadap ekosistem pertanian.

Salah satu bentuk pengolahan limbah organik yang berbasis bioteknologi adalah vermikomposting, yaitu proses pengomposan menggunakan bantuan cacing tanah seperti Eisenia fetida. Menurut Mistry (2015), vermikomposting dapat menghasilkan pupuk organik yang lebih cepat terurai, kaya akan nutrien, dan memiliki kandungan mikroba yang tinggi. Proses ini juga lebih efisien dalam mengurangi limbah organik dan tidak menghasilkan bau menyengat seperti komposting konvensional. Dengan demikian, vermikomposting tidak hanya menjadi solusi pengelolaan limbah tetapi juga meningkatkan nilai ekonomi dari limbah pertanian.

2. Pengelolaan Limbah Peternakan

Pengelolaan limbah peternakan menjadi salah satu pilar penting dalam penerapan konsep pertanian berkelanjutan dan ekonomi sirkular. Limbah seperti kotoran sapi, kambing, atau ayam dapat menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak ditangani dengan baik, khususnya dalam hal emisi gas rumah kaca, pencemaran air tanah, dan bau tidak sedap. Namun, melalui teknologi fermentasi anaerobik, kotoran ternak dapat diolah menjadi biogas sebuah sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Biogas yang dihasilkan dari proses ini terdiri atas metana dan karbon dioksida, yang dapat dimanfaatkan untuk keperluan energi di lingkungan peternakan.

Biogas dari limbah peternakan bisa digunakan untuk berbagai kebutuhan energi seperti menyalakan mesin penggiling pakan, pengering hasil panen, atau sebagai bahan bakar untuk pemanas air dan rumah kaca. Dengan demikian, petani tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga dapat menekan biaya operasional harian. Teknologi ini secara signifikan mengurangi emisi metana langsung ke atmosfer, gas rumah kaca yang memiliki potensi pemanasan global lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida. Dengan demikian, pengolahan limbah peternakan bukan hanya bermanfaat secara ekonomi, tetapi juga memiliki dampak positif terhadap lingkungan global.

Limbah padat sisa dari proses fermentasi anaerobik atau digestat dapat digunakan sebagai pupuk organik. Digestat kaya akan unsur hara penting seperti nitrogen, fosfor, dan kalium yang sangat dibutuhkan tanaman. Pupuk organik ini lebih ramah lingkungan dibandingkan pupuk kimia dan berkontribusi dalam meningkatkan kualitas tanah secara jangka panjang. Kandungan mikroorganisme yang masih aktif juga membantu memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman.

3. Penggunaan Kembali Limbah Pertanian untuk Energi Terbarukan

Penggunaan kembali limbah pertanian sebagai sumber energi terbarukan merupakan langkah strategis dalam mendukung transisi menuju pertanian yang berkelanjutan. Limbah organik seperti batang padi, daun jagung, jerami, dan sekam padi yang sebelumnya dianggap tidak bernilai kini menjadi bahan baku potensial untuk menghasilkan energi melalui berbagai teknologi konversi biomassa. Proses ini tidak

hanya mengurangi akumulasi limbah di lahan pertanian, tetapi juga menciptakan nilai tambah dari sisa-sisa hasil pertanian yang melimpah di pedesaan.

Salah satu teknologi yang banyak dikembangkan adalah pirolisis, yaitu proses pemanasan biomassa tanpa oksigen untuk menghasilkan produk seperti bio-oil, arang, dan gas sintetis. Bio-oil yang dihasilkan bisa dimanfaatkan sebagai bahan bakar cair alternatif, sedangkan arang dapat digunakan sebagai bahan bakar padat atau biochar untuk meningkatkan kualitas tanah. Teknologi gasifikasi, di sisi lain, mengubah biomassa menjadi gas sintetis (syngas) yang dapat digunakan langsung sebagai bahan bakar untuk mesin atau pembangkit listrik. Kedua teknologi ini memungkinkan petani untuk mengubah limbah yang melimpah menjadi energi yang dapat dimanfaatkan langsung di lapangan.

Menurut Liu et al. (2014), pemanfaatan teknologi pirolisis dan gasifikasi untuk mengolah limbah pertanian terbukti mampu menghasilkan energi dalam jumlah yang cukup untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga dan kegiatan pertanian di daerah pedesaan. Ini menjadi solusi alternatif yang sangat penting, terutama bagi komunitas pertanian yang belum memiliki akses listrik dari jaringan utama. Selain itu, proses ini juga berkontribusi dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sekaligus menurunkan emisi karbon.

4. Sistem Pertanian Terintegrasi (*Agro-Ecosystem*)

Sistem pertanian terintegrasi atau *agro-ecosystem* adalah pendekatan holistik yang menggabungkan berbagai komponen pertanian seperti tanaman, ternak, dan pengelolaan sumber daya alam ke dalam satu sistem yang saling berhubungan dan mendukung. Konsep ini merupakan implementasi nyata dari prinsip ekonomi sirkular dalam dunia pertanian, di mana tidak ada limbah yang terbuang karena semuanya dimanfaatkan kembali dalam siklus produksi. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi ketergantungan pada input eksternal, serta menjaga keseimbangan ekologis.

Salah satu bentuk penerapan yang paling umum adalah integrasi antara budidaya tanaman dan peternakan. Dalam model ini, kotoran ternak yang kaya akan nutrisi digunakan sebagai pupuk organik untuk menyuburkan tanaman. Sebaliknya, limbah tanaman seperti jerami, dedaunan, atau limbah panen digunakan sebagai pakan ternak. Siklus ini

menciptakan hubungan simbiotik yang saling menguntungkan, mengurangi kebutuhan akan pupuk dan pakan buatan yang mahal serta berisiko merusak lingkungan.

Sistem pertanian terintegrasi mampu meningkatkan produktivitas lahan dan keberlanjutan pertanian dengan mengefisienkan penggunaan sumber daya. Selain itu, sistem ini juga membantu meningkatkan pendapatan petani karena mengurangi biaya produksi dan menghasilkan berbagai produk dalam satu lahan yang sama. Diversifikasi produksi ini juga memperkuat ketahanan ekonomi petani terhadap fluktuasi harga pasar dan risiko gagal panen.

D. Studi Kasus: Implementasi Energi Surya dan Biogas di Sektor Pertanian

Pertanian adalah salah satu sektor yang sangat bergantung pada energi untuk mendukung berbagai aktivitas, mulai dari pengolahan lahan, irigasi, hingga pengolahan hasil pertanian. Di tengah tantangan global seperti perubahan iklim dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil, sektor pertanian membutuhkan inovasi teknologi yang dapat mengurangi jejak karbon dan meningkatkan keberlanjutan. Salah satu solusi yang mulai diterapkan adalah pemanfaatan energi terbarukan, khususnya energi surya dan biogas, dalam berbagai proses pertanian. Energi surya dan biogas merupakan dua jenis sumber energi yang ramah lingkungan yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta mengurangi dampak lingkungan dari aktivitas pertanian.

1. Energi Surya dalam Pertanian

Energi surya telah lama dianggap sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan untuk diterapkan dalam berbagai sektor, termasuk pertanian. Penerapan energi surya dalam pertanian mencakup penggunaan panel surya untuk menghasilkan listrik, pompa air tenaga surya untuk irigasi, dan sistem pemanas surya untuk rumah kaca dan pengeringan hasil pertanian. Beberapa studi kasus berikut menunjukkan keberhasilan penerapan energi surya dalam sektor pertanian.

a. Studi Kasus di India: *Solar-Powered Irrigation Systems* (SPIS)

India merupakan salah satu negara dengan populasi petani terbesar di dunia yang sangat bergantung pada irigasi untuk mendukung produktivitas pertanian. Namun, keterbatasan akses terhadap energi konvensional, terutama listrik dan bahan bakar diesel, sering kali menjadi kendala utama dalam pengoperasian pompa air untuk irigasi. Untuk menjawab tantangan ini, pemerintah India bersama sejumlah organisasi telah mengembangkan dan mengimplementasikan *Solar-Powered Irrigation Systems* (SPIS) sebagai solusi irigasi berkelanjutan berbasis energi terbarukan. Sistem ini memanfaatkan panel surya untuk menghasilkan energi listrik yang digunakan menggerakkan pompa air secara langsung, tanpa perlu bergantung pada jaringan listrik atau bahan bakar fosil.

Studi oleh Patel et al. (2019) mengungkapkan keberhasilan penerapan SPIS di negara bagian Gujarat dan Maharashtra, dua wilayah agraris yang mengalami tantangan serius dalam manajemen air dan energi. Proyek SPIS ini tidak hanya memberikan akses irigasi yang lebih andal bagi para petani, tetapi juga berhasil menurunkan biaya operasional secara signifikan. Petani yang sebelumnya menghabiskan banyak biaya untuk membeli diesel kini dapat menghemat hingga 40% dari total pengeluaran energi. Selain itu, sistem irigasi yang berjalan dengan tenaga surya memungkinkan petani untuk mengakses air irigasi kapan saja, tanpa harus menunggu jadwal pasokan listrik dari pemerintah yang sering tidak menentu.

Adopsi SPIS turut memberikan dampak positif terhadap lingkungan. Dengan menurunnya penggunaan diesel dan listrik berbasis batu bara, emisi karbon dan polusi udara pun ikut berkurang. Ini menjadikan SPIS sebagai teknologi yang mendukung pertanian ramah lingkungan, efisien, dan berkelanjutan. Keberhasilan studi kasus ini menunjukkan bahwa pengembangan teknologi energi terbarukan di sektor pertanian tidak hanya mampu meningkatkan produktivitas, tetapi juga mendorong transformasi ekologi yang lebih hijau dan adil di kawasan pedesaan.

b. Studi Kasus di Kenya: *Solar-Powered Greenhouses*

Kenya merupakan negara di Sub-Sahara Afrika yang sangat bergantung pada sektor pertanian sebagai sumber penghidupan

utama masyarakatnya. Namun, salah satu tantangan utama yang dihadapi petani di Kenya adalah ketergantungan pada pola cuaca yang tidak menentu, termasuk curah hujan yang tidak teratur dan suhu ekstrem. Untuk mengatasi hal ini, banyak petani mulai mengadopsi teknologi rumah kaca (*greenhouse*) guna menciptakan lingkungan pertanian yang lebih stabil. Namun, pengoperasian rumah kaca memerlukan sumber energi untuk pemanas dan pengering, yang sering kali tidak tersedia secara konsisten karena keterbatasan akses listrik di daerah pedesaan (Verma, 2024).

Sebagai solusi, sejumlah petani di Kenya mulai memanfaatkan energi surya untuk mendukung operasional rumah kaca. Proyek yang digagas oleh Solar-Agriculture Solutions Kenya memperkenalkan teknologi panel surya yang digunakan untuk menggerakkan sistem pemanas, ventilasi, dan pengering dalam rumah kaca. Penggunaan energi surya memungkinkan petani mengontrol suhu dan kelembapan secara lebih efektif, sehingga tanaman terlindung dari cuaca ekstrem seperti hujan deras, angin kencang, atau suhu malam yang sangat dingin.

Keuntungan lain dari sistem ini adalah pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil dan penghematan biaya operasional dalam jangka panjang. Energi surya, sebagai sumber yang bersih dan terbarukan, memberikan dampak lingkungan yang lebih kecil sekaligus meningkatkan ketahanan ekonomi petani. Studi kasus di Kenya ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi energi terbarukan dalam praktik pertanian tidak hanya meningkatkan produktivitas, tetapi juga memperkuat keberlanjutan sistem pangan lokal di tengah tantangan perubahan iklim dan keterbatasan infrastruktur.

c. Studi Kasus di Indonesia: Pemanfaatan Panel Surya untuk Pengairan Pertanian

Di Indonesia, pemanfaatan energi surya untuk pengairan pertanian mulai diterapkan di beberapa daerah pedesaan, dengan tujuan mengatasi masalah ketergantungan pada sumber energi konvensional yang terbatas dan mahal. Daerah seperti Lampung dan Bali menjadi contoh sukses dalam implementasi teknologi panel surya untuk menggantikan penggunaan listrik dari PLN atau bahan bakar diesel untuk menggerakkan pompa irigasi. Di

daerah-daerah ini, sistem panel surya digunakan untuk menyuplai energi yang diperlukan untuk pompa air yang mengalirkan air ke sawah atau kebun, sehingga meningkatkan efisiensi dan mengurangi ketergantungan pada pasokan listrik eksternal yang terbatas (Syahputra & Soesanti, 2021).

Penggunaan energi surya di daerah-daerah tersebut berhasil menurunkan biaya operasional bagi petani. Dalam pengairan sawah, misalnya, pompa tenaga surya terbukti lebih efisien dalam mengalirkan air tanpa memerlukan pasokan listrik yang terganggu atau bahan bakar diesel yang mahal. Dengan sistem ini, petani dapat mengatur jadwal irigasi dengan lebih fleksibel dan konsisten, yang berkontribusi pada peningkatan hasil pertanian. Selain itu, pengoperasian pompa menggunakan energi terbarukan juga mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan oleh bahan bakar fosil.

Keberhasilan penerapan teknologi ini menunjukkan bahwa potensi matahari yang melimpah di Indonesia dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk mendukung pertanian yang lebih efisien dan berkelanjutan. Dengan memanfaatkan energi surya, petani tidak hanya memperoleh solusi untuk pengairan yang lebih efisien, tetapi juga membantu mengurangi emisi karbon dan meminimalkan ketergantungan pada sumber daya energi yang tidak terbarukan. Ini menjadikan teknologi panel surya sebagai salah satu solusi yang sangat layak dan mendukung keberlanjutan sektor pertanian di Indonesia.

2. Biogas dalam Pertanian

Biogas, yang dihasilkan dari proses fermentasi anaerobik limbah organik, juga semakin banyak digunakan dalam sektor pertanian. Biogas tidak hanya dapat menyediakan energi terbarukan untuk menggantikan bahan bakar fosil, tetapi juga dapat mengurangi limbah pertanian yang dihasilkan. Beberapa studi kasus berikut menggambarkan penerapan biogas dalam sektor pertanian.

a. Studi Kasus di Tiongkok: Penggunaan Biogas untuk Mengolah Limbah Peternakan

Tiongkok, sebagai negara dengan populasi terbesar dan sektor peternakan yang berkembang pesat, menghadapi tantangan besar

dalam mengelola limbah peternakan yang dapat mencemari lingkungan. Pada tahun 2014, pemerintah Tiongkok memperkenalkan sistem biogas berbasis peternakan sebagai solusi untuk mengatasi masalah ini. Sistem biogas ini memungkinkan pengolahan kotoran ternak menjadi energi terbarukan berupa gas metana yang dapat digunakan untuk keperluan rumah tangga dan pertanian, sekaligus mengurangi ketergantungan pada energi fosil. Pendekatan ini juga berperan dalam pengelolaan limbah peternakan yang lebih ramah lingkungan.

Di wilayah pedesaan Tiongkok, sistem biogas terbukti efektif dalam mengolah kotoran ternak menjadi sumber energi yang berguna. Gas metana yang dihasilkan dari fermentasi kotoran ternak dapat digunakan untuk pemanasan dan penerangan rumah, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil seperti batu bara atau gas. Selain itu, limbah yang dihasilkan dari proses fermentasi ini juga menghasilkan pupuk organik yang dapat digunakan dalam pertanian, menggantikan kebutuhan akan pupuk kimia yang mahal dan berpotensi merusak lingkungan.

Keberhasilan sistem biogas ini tidak hanya berdampak positif bagi lingkungan, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi bagi petani. Dengan mengurangi kebutuhan akan bahan bakar dan pupuk kimia, petani dapat menekan biaya operasional pertanian. Di sisi lain, sistem ini juga berperan dalam pengurangan emisi gas rumah kaca yang sebelumnya dihasilkan dari pembakaran langsung kotoran ternak, yang menjadi salah satu faktor penyumbang polusi udara. Inisiatif ini menjadi model bagi negara-negara lain yang menghadapi tantangan serupa dalam mengelola limbah peternakan dan mengurangi dampak lingkungan.

b. Studi Kasus di Brasil: Sistem Biogas untuk Pengolahan Limbah Pertanian

Di Brasil, sistem biogas telah diterapkan secara luas dalam sektor pertanian, khususnya di Negara Bagian São Paulo, untuk mengelola limbah organik seperti sisa tanaman dan kotoran ternak. Proyek ini bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menyediakan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Petani di daerah ini menggunakan

biogas yang dihasilkan dari fermentasi limbah pertanian untuk berbagai keperluan, termasuk pengolahan hasil pertanian dan energi rumah tangga. Dengan demikian, sistem biogas memberikan solusi yang efektif untuk mengatasi masalah energi di sektor pertanian yang sebelumnya bergantung pada bahan bakar fosil yang mahal dan tidak ramah lingkungan (Koniuszewska et al., 2020).

Sistem ini membantu menggantikan penggunaan bahan bakar fosil dalam berbagai kegiatan pertanian, dari pengolahan hasil hingga kebutuhan energi rumah tangga. Di samping itu, teknologi biogas juga secara signifikan mengurangi emisi metana yang biasa dihasilkan dari pembusukan limbah pertanian, yang berkontribusi pada pemanasan global. Dengan demikian, penerapan sistem biogas ini memiliki dampak positif dalam mengurangi jejak karbon sektor pertanian.

Sistem biogas di Brasil juga menghasilkan sisa yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik, yang meningkatkan kesuburan tanah. Pupuk ini menggantikan pupuk kimia yang biasanya digunakan dalam pertanian, membantu petani mengurangi biaya operasional dan meningkatkan hasil pertanian. Dengan meningkatkan kesuburan tanah secara alami, sistem biogas tidak hanya memperbaiki kualitas tanah tetapi juga memberikan keuntungan jangka panjang bagi para petani.

c. Studi Kasus di India: Biogas untuk Pengolahan Limbah Peternakan dan Pertanian

Di India, pengelolaan limbah peternakan dan pertanian menjadi tantangan besar, terutama di daerah pedesaan. Untuk mengatasi masalah ini, pemerintah India meluncurkan Prakarsa Biogas Nasional pada tahun 2015. Tujuan utama dari proyek ini adalah untuk memperkenalkan sistem biogas yang mengolah limbah pertanian dan peternakan menjadi energi terbarukan di banyak rumah tangga dan peternakan di daerah pedesaan. Dengan menerapkan sistem biogas, India berusaha mengurangi pembakaran limbah terbuka yang seringkali menyebabkan pencemaran udara dan emisi gas rumah kaca yang berbahaya bagi lingkungan (Yadav et al., 2022).

Petani yang mengadopsi teknologi biogas mengalami penghematan biaya energi yang signifikan. Sebelum adanya

sistem biogas, banyak petani yang bergantung pada bahan bakar fosil, seperti kayu bakar atau gas, untuk keperluan pemanasan dan penerangan. Dengan menggantikan sumber energi fosil dengan biogas, petani tidak hanya mendapatkan energi yang lebih murah dan berkelanjutan, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada bahan bakar eksternal. Selain itu, biogas yang dihasilkan juga digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi dalam kegiatan pertanian sehari-hari.

Sistem biogas ini menghasilkan pupuk organik berkualitas yang dapat digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah. Petani melaporkan peningkatan hasil pertanian setelah menggunakan pupuk organik dari proses biogas, yang menggantikan kebutuhan akan pupuk kimia. Proyek ini juga membawa dampak positif terhadap lingkungan dengan mengurangi emisi metana yang dihasilkan oleh limbah peternakan yang dibuang ke udara.

BAB VI
DIGITALISASI PERTANIAN

Digitalisasi pertanian yang merujuk pada penerapan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas dalam sektor pertanian. Dalam era teknologi informasi yang semakin maju, digitalisasi menawarkan berbagai solusi untuk memodernisasi sistem pertanian tradisional. Dengan memanfaatkan internet, *big data*, dan teknologi lainnya, petani dapat memperoleh informasi yang lebih akurat, efisien, dan tepat waktu, yang pada gilirannya mendukung pengambilan keputusan yang lebih baik dalam pengelolaan sumber daya alam dan hasil pertanian.

Teknologi digital seperti *Internet of Things* (IoT), *big data*, dan blockchain telah memungkinkan sistem pertanian untuk bertransformasi menjadi lebih efisien dan berkelanjutan. Misalnya, IoT memungkinkan pemantauan tanaman secara real-time dengan sensor yang mengukur kelembapan tanah, suhu, dan kondisi lainnya, yang membantu petani mengoptimalkan penggunaan air dan pupuk. *Big data*, di sisi lain, menyediakan analisis mendalam tentang pola cuaca, jenis tanah, dan variabel lainnya yang memungkinkan prediksi hasil pertanian yang lebih akurat. Blockchain menawarkan transparansi dalam rantai pasokan pertanian, yang menjamin kualitas dan keaslian produk dari petani ke konsumen.

A. Penggunaan *Big Data* dalam Optimalisasi Produksi

Big data merujuk pada volume data yang sangat besar dan kompleks, yang tidak dapat diproses dengan menggunakan metode tradisional atau perangkat lunak pengolahan data. Dalam konteks pertanian, *big data* mengacu pada informasi yang dikumpulkan dari berbagai sumber yang berkaitan dengan proses pertanian, seperti data tentang cuaca, kelembaban tanah, suhu, penggunaan air, dan kinerja

tanaman. Data ini dapat dikumpulkan melalui berbagai teknologi, termasuk sensor tanah, drone, citra satelit, dan *Internet of Things* (IoT), yang semuanya menghasilkan data dalam jumlah besar. Untuk memanfaatkan data ini secara efektif, dibutuhkan analisis data canggih menggunakan teknik seperti *machine learning* dan kecerdasan buatan (AI), yang dapat mengidentifikasi pola dan wawasan dari data tersebut, membantu petani dalam pengambilan keputusan yang lebih tepat.

1. Monitoring Kondisi Tanah dan Cuaca

Pemanfaatan *big data* dalam pertanian semakin berkembang, salah satunya adalah untuk memantau kondisi tanah dan cuaca. Teknologi ini memungkinkan petani untuk mengakses data secara real-time mengenai kelembaban tanah, suhu, pH, dan kadar nutrisi yang ada di lahannya. Sensor tanah yang dipasang di berbagai titik dalam area pertanian mengumpulkan data yang kemudian dianalisis untuk memberikan gambaran lengkap tentang status tanah. Dengan memanfaatkan informasi ini, petani bisa mendapatkan wawasan yang lebih akurat untuk mengoptimalkan kondisi tanah sesuai dengan kebutuhan tanaman yang sedang dibudidayakan (Zhao et al., 2023)

Big data juga mengintegrasikan informasi cuaca untuk memberikan prediksi kondisi iklim yang lebih tepat. Data cuaca yang diperoleh dari stasiun cuaca terdekat atau satelit memberikan gambaran tentang kemungkinan hujan, kekeringan, atau suhu ekstrem yang akan terjadi. Dengan memadukan data tanah dan cuaca, petani dapat merencanakan kegiatan pertanian lebih baik. Misalnya, bisa mengatur waktu tanam atau memutuskan kapan harus melakukan penyiraman berdasarkan prakiraan cuaca, sehingga mengurangi risiko gagal panen.

2. *Precision Agriculture* dan *Variable Rate Technology* (VRT)

Precision agriculture atau pertanian presisi adalah pendekatan inovatif yang memanfaatkan data untuk mengelola input pertanian secara lebih efisien dan terkontrol. Pendekatan ini tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil panen, tetapi juga pada pengurangan pemborosan sumber daya dan bahan kimia, seperti pupuk dan pestisida. Dengan menggunakan teknologi sensor, pemetaan lahan, dan analisis data, *precision agriculture* memungkinkan petani untuk mengidentifikasi dan mengatasi masalah di lahan pertanian dengan lebih tepat dan sesuai kebutuhan. Hal ini memungkinkan pengelolaan yang lebih baik dari

berbagai faktor yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman, seperti kelembaban, suhu tanah, dan kandungan nutrisi.

Salah satu teknologi yang mendukung precision agriculture adalah *Variable Rate Technology* (VRT). VRT memungkinkan penerapan input pertanian, seperti pupuk dan pestisida, dalam jumlah yang bervariasi berdasarkan kebutuhan spesifik tanaman pada tiap bagian lahan. Dengan teknologi ini, aplikasi bahan kimia dapat disesuaikan dengan kondisi tanah atau tanaman yang berbeda, menghindari penggunaan yang berlebihan pada area yang tidak memerlukannya, dan memastikan setiap tanaman mendapatkan jumlah nutrisi yang optimal. Ini bukan hanya mengurangi pemborosan, tetapi juga mengoptimalkan hasil panen dengan meminimalkan stres tanaman akibat penggunaan input yang tidak tepat.

3. Prediksi Hasil Panen

Prediksi hasil panen yang akurat merupakan salah satu manfaat utama dari penerapan *big data* dalam pertanian. Melalui pengumpulan data historis tentang pertumbuhan tanaman, kondisi iklim, dan pola tanam, petani dapat memperoleh informasi yang lebih tepat untuk merencanakan hasil pertanian. Dengan bantuan algoritma analitik yang kuat, data yang diperoleh dapat dianalisis untuk memprediksi hasil panen dengan lebih presisi. Prediksi ini membantu petani untuk membuat keputusan yang lebih cerdas terkait pengelolaan hasil pertanian, baik itu dalam hal distribusi, pemasaran, maupun manajemen risiko yang berkaitan dengan fluktuasi cuaca atau pasar.

Prediksi hasil panen yang lebih tepat memberikan keuntungan besar bagi petani, terutama dalam pengelolaan pemasaran. Dengan mengetahui perkiraan hasil panen, petani dapat mengatur jadwal distribusi produknya untuk meminimalkan kerugian akibat penurunan harga atau kelebihan pasokan, juga dapat bernegosiasi dengan pembeli dan pengepul untuk mendapatkan harga terbaik, sehingga meningkatkan keuntungan. Prediksi hasil panen yang lebih akurat juga membantu petani dalam manajemen risiko. Dengan memahami potensi hasil yang dapat dicapai, petani dapat mempersiapkan diri lebih baik menghadapi tantangan, seperti perubahan iklim yang tak terduga atau serangan hama.

4. Manajemen Sumber Daya Alam

Manajemen sumber daya alam yang efisien, terutama dalam hal penggunaan air dan energi, menjadi semakin penting dalam pertanian modern, terutama di daerah yang menghadapi kekeringan atau keterbatasan sumber daya alam. *Big data* berperan krusial dalam mengelola sumber daya ini dengan cara yang lebih presisi dan berbasis informasi yang akurat. Dalam sektor pertanian, di mana air dan energi merupakan dua komponen penting, teknologi seperti sensor IoT dan analitik data memungkinkan petani untuk memantau dan mengelola penggunaan sumber daya secara lebih efektif. Dengan pengumpulan data real-time mengenai kelembaban tanah dan kondisi cuaca, petani dapat membuat keputusan yang lebih tepat terkait waktu dan jumlah air yang diperlukan untuk irigasi.

Sensor IoT dapat membantu memantau kebutuhan air tanaman dengan tingkat presisi yang tinggi. Misalnya, sensor ini dapat mengukur kelembaban tanah di berbagai titik dalam lahan pertanian dan memberikan informasi yang tepat kapan dan berapa banyak air yang harus diberikan. Pendekatan ini mengurangi pemborosan air yang sering terjadi akibat irigasi yang tidak terkontrol dan meningkatkan efisiensi dalam penggunaan air, terutama di daerah-daerah yang mengalami kekeringan atau krisis air.

Big data juga dapat meningkatkan pengelolaan energi dalam pertanian. Dengan menggunakan data historis dan real-time, petani dapat mengoptimalkan penggunaan energi dalam sistem irigasi, pengolahan hasil pertanian, dan bahkan dalam pengoperasian peralatan pertanian. Misalnya, dengan menggunakan sistem irigasi yang didorong oleh energi surya, petani dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, sekaligus mengurangi biaya operasional dan jejak karbon pertanian.

5. Sistem Peringatan Dini untuk Penyakit dan Hama

Big data telah berperan yang sangat penting dalam mengembangkan sistem peringatan dini untuk mengatasi masalah penyakit dan hama dalam pertanian. Dengan memanfaatkan berbagai data lingkungan, seperti suhu, kelembaban, curah hujan, dan kondisi tanah, serta informasi tentang pertumbuhan tanaman, sistem peringatan dini dapat memberikan prediksi yang lebih akurat terkait ancaman yang mungkin terjadi. Teknologi ini memungkinkan para petani untuk mendeteksi potensi wabah penyakit atau serangan hama jauh sebelum

mulai merusak tanaman. Penggunaan *big data* dalam hal ini sangat bermanfaat karena dapat mengidentifikasi pola-pola yang sebelumnya sulit terlihat secara manual, memberikan petani kesempatan untuk mengambil tindakan yang lebih tepat waktu.

Penggunaan data cuaca, kelembaban, dan data agronomi lainnya dapat membantu petani untuk menerima peringatan lebih awal tentang ancaman penyakit atau hama. Data real-time yang dikumpulkan dari berbagai sumber ini dianalisis menggunakan algoritma untuk mengidentifikasi pola yang mengindikasikan kemungkinan serangan hama atau wabah penyakit. Sebagai contoh, kombinasi antara kelembaban tinggi dan suhu yang meningkat dapat menjadi indikator yang menunjukkan bahwa kondisi tersebut dapat mendukung perkembangan penyakit tertentu atau serangan hama.

Dengan adanya peringatan dini tersebut, petani dapat melakukan tindakan preventif yang lebih cepat dan lebih terarah. Salah satu langkah preventif yang sering diambil adalah penyemprotan pestisida atau fungisida, yang lebih terfokus pada area yang rawan terkena dampak. Hal ini mengurangi penggunaan bahan kimia secara berlebihan, yang tidak hanya lebih ramah lingkungan tetapi juga lebih hemat biaya bagi petani. Selain itu, pengurangan penggunaan pestisida yang tidak perlu juga dapat meningkatkan kualitas produk pertanian dan mengurangi risiko kerusakan pada ekosistem sekitar.

B. Blockchain untuk Transparansi dalam Rantai Pasok Pertanian

Rantai pasok pertanian yang transparan dan efisien sangat penting untuk memastikan produk pertanian sampai ke konsumen dengan harga yang wajar, kualitas yang baik, dan tidak ada penipuan dalam prosesnya. Salah satu inovasi teknologi yang mulai mendapatkan perhatian untuk meningkatkan transparansi dan efisiensi dalam rantai pasok pertanian adalah blockchain. Teknologi blockchain yang terkenal dalam dunia keuangan dan cryptocurrency kini telah diterapkan di berbagai sektor industri, termasuk pertanian. Teknologi ini dapat menyelesaikan berbagai tantangan yang dihadapi oleh industri pertanian, seperti ketidakpastian harga, penipuan, pemborosan makanan, dan masalah efisiensi logistik (Saberi et al., 2019).

Pada dasarnya, blockchain adalah sistem penyimpanan data terdesentralisasi yang memanfaatkan teknologi enkripsi untuk mencatat transaksi secara aman dan transparan. Setiap blok dalam rantai berisi informasi yang tidak dapat diubah atau dimanipulasi setelah tercatat, yang menjadikannya solusi yang ideal untuk memastikan integritas dan transparansi dalam berbagai proses. Dalam konteks pertanian, penggunaan blockchain bertujuan untuk menghubungkan seluruh pihak yang terlibat dalam rantai pasok, mulai dari petani, distributor, pengepul, hingga pengecer, serta memastikan informasi yang terkait dengan produk dapat dilacak dengan mudah oleh konsumen dan semua pihak terkait.

1. Transparansi Harga dan Perdagangan

Transparansi harga dan perdagangan dalam sektor pertanian sering kali menjadi masalah yang sulit dipecahkan. Banyak petani yang tidak mendapatkan harga yang adil untuk hasil pertaniannya karena ketidaktransparanan dalam rantai pasok. Para petani sering kali bergantung pada perantara atau tengkulak yang tidak selalu memberikan informasi harga yang jujur atau akurat. Hal ini menyebabkan ketidakseimbangan dalam pembagian keuntungan, di mana petani cenderung menerima harga yang lebih rendah daripada yang seharusnya didapatkan. Ketidakpastian ini tidak hanya merugikan petani, tetapi juga memengaruhi stabilitas ekonomi di daerah pedesaan.

Dengan hadirnya teknologi blockchain, masalah ketidaktransparanan ini dapat diatasi. Blockchain dapat digunakan untuk mencatat setiap transaksi yang terjadi dalam rantai pasok pertanian secara terperinci dan aman. Setiap langkah dalam proses perdagangan, mulai dari petani, distributor, hingga pengecer, dapat tercatat dalam sistem terdesentralisasi yang tidak dapat diubah atau dimanipulasi. Ini memungkinkan seluruh pihak yang terlibat dalam transaksi untuk mengakses informasi harga dan proses perdagangan yang transparan, sehingga tidak ada pihak yang bisa menyembunyikan atau mengubah informasi harga yang sebenarnya.

Dengan penerapan blockchain, petani bisa mendapatkan akses langsung ke informasi harga pasar secara real-time, dapat memantau harga produk pertanian yang berlaku di berbagai pasar dan membandingkannya dengan harga yang ditawarkan oleh perantara atau distributor. Ini memberi kekuatan untuk menentukan apakah

mendapatkan harga yang adil atau tidak, serta memutuskan apakah akan melanjutkan transaksi atau mencari opsi lain yang lebih menguntungkan. Keberadaan transparansi harga ini memungkinkan petani untuk meningkatkan daya tawar dalam negosiasi harga.

2. Pelacakan Asal Usul Produk (*Traceability*)

Di dunia yang semakin terhubung dan sadar akan isu-isu etika serta keberlanjutan, konsumen kini memiliki kepedulian yang lebih besar terhadap kualitas dan asal usul produk yang dikonsumsi. Tidak hanya ingin mengetahui apakah produk tersebut aman, tetapi juga bagaimana produk tersebut diproduksi, apakah proses produksinya ramah lingkungan, dan apakah ada aspek keberlanjutan atau keadilan dalam rantai pasoknya. Oleh karena itu, pelacakan asal usul produk (*traceability*) menjadi sangat penting, terutama dalam sektor pertanian. Blockchain menawarkan solusi canggih untuk memungkinkan pelacakan yang transparan, akurat, dan mudah diakses oleh semua pihak yang terlibat dalam proses produksi dan distribusi.

Dengan menggunakan teknologi blockchain, setiap langkah dalam proses rantai pasok produk pertanian, mulai dari budidaya di lapangan hingga distribusi di toko, dapat dicatat secara digital dan terverifikasi. Informasi ini tidak hanya dapat diakses oleh para pelaku dalam rantai pasok, tetapi juga dapat dilihat oleh konsumen melalui aplikasi atau kode QR yang terhubung dengan blockchain. Misalnya, seorang konsumen yang membeli kopi atau kakao dapat memindai kode QR pada kemasan untuk mendapatkan informasi tentang asal usul produk tersebut, siapa petani yang menanamnya, bagaimana proses budidaya dilakukan, apakah produk tersebut organik, dan langkah-langkah lain yang diambil untuk memastikan produk tersebut diproduksi secara berkelanjutan dan etis.

Salah satu contoh penerapan yang menarik adalah dalam industri kopi dan kakao, di mana perusahaan-perusahaan besar telah mulai menggunakan blockchain untuk melacak asal usul produknya. Dengan teknologi ini, kopi dapat dilacak dari petani di negara berkembang hingga sampai ke konsumen di negara maju. Hal ini tidak hanya memastikan bahwa produk yang dijual memenuhi standar kualitas yang diinginkan, tetapi juga meningkatkan transparansi dalam pengelolaan sumber daya alam dan pemberdayaan petani. Dengan memberikan informasi yang jelas dan dapat diverifikasi tentang proses produksi, perusahaan dapat membangun kepercayaan yang lebih besar dengan

konsumen yang semakin memperhatikan dampak sosial dan lingkungan dari produk yang dibeli.

3. Pengelolaan Pembayaran yang Lebih Efisien

Pengelolaan pembayaran dalam rantai pasok pertanian seringkali menjadi salah satu tantangan besar, terutama di negara-negara berkembang atau dalam transaksi lintas negara. Banyaknya pihak yang terlibat, mulai dari petani, distributor, pengecer, hingga bank atau lembaga keuangan, seringkali memperlambat proses pembayaran dan meningkatkan biaya administrasi. Proses ini dapat memakan waktu yang lama, dan sering kali melibatkan biaya tambahan yang membebani semua pihak yang terlibat. Hal ini tentu menjadi kendala bagi para petani, terutama yang beroperasi di sektor informal atau yang memiliki keterbatasan dalam akses ke layanan keuangan.

Blockchain, dengan kemampuannya untuk mencatat setiap transaksi secara real-time, memberikan solusi efisien untuk pengelolaan pembayaran. Teknologi ini memungkinkan transaksi dilakukan secara langsung antara dua pihak tanpa melalui perantara pihak ketiga, seperti bank atau lembaga keuangan. Dengan blockchain, transaksi dapat tercatat dalam sistem terdesentralisasi yang aman dan transparan, mengurangi kemungkinan adanya kesalahan atau manipulasi dalam proses pembayaran. Hal ini mempermudah petani dan distributor untuk melakukan transaksi dengan lebih cepat dan tanpa hambatan administratif yang rumit.

Penggunaan cryptocurrency dalam sistem pembayaran berbasis blockchain memberikan keuntungan tambahan dalam hal efisiensi. Cryptocurrency, yang beroperasi di atas jaringan blockchain, memungkinkan transaksi lintas negara dengan biaya yang lebih rendah dan waktu yang lebih cepat dibandingkan dengan sistem pembayaran tradisional yang melibatkan bank. Hal ini sangat menguntungkan bagi petani yang sering bertransaksi dengan pihak luar negeri atau perusahaan besar, di mana biaya dan waktu transfer dapat menjadi masalah besar. Dengan cryptocurrency, pembayaran dapat dilakukan hampir seketika, tanpa memerlukan waktu yang lama untuk memproses atau biaya yang tinggi.

4. Pengurangan Pemborosan dan Ketidakpastian Pasokan

Pemborosan makanan dalam rantai pasok pertanian adalah salah satu masalah terbesar yang dihadapi dunia, dengan sejumlah besar produk yang rusak atau terbuang sebelum sampai ke konsumen. Data dari Organisasi Pangan dan Pertanian Dunia (FAO) menunjukkan bahwa hampir sepertiga dari semua makanan yang diproduksi untuk konsumsi manusia terbuang begitu saja. Salah satu penyebab utama dari pemborosan ini adalah ketidakpastian dalam manajemen inventaris dan pengelolaan distribusi, di mana produk seringkali tidak dikelola dengan efisien selama proses transportasi, penyimpanan, dan pengiriman. Hal ini sering kali disebabkan oleh ketidakjelasan dalam pemantauan status produk di sepanjang rantai pasok.

Blockchain, dengan sifatnya yang terdesentralisasi dan transparan, menawarkan solusi yang efektif untuk mengurangi pemborosan makanan. Dengan blockchain, setiap langkah dalam perjalanan produk dapat dicatat secara otomatis dan transparan, mulai dari pengiriman dari petani, penyimpanan di gudang, hingga distribusi ke pengecer. Informasi ini dapat diakses secara real-time oleh semua pihak yang terlibat dalam rantai pasok, memungkinkan pemantauan yang lebih ketat terhadap status produk di setiap tahap distribusi. Hal ini sangat membantu dalam mengidentifikasi potensi masalah, seperti keterlambatan pengiriman atau perubahan kondisi penyimpanan, yang dapat menyebabkan kerusakan pada produk.

Salah satu manfaat besar dari penerapan blockchain adalah kemampuannya untuk memberikan visibilitas penuh kepada para pemangku kepentingan, mulai dari petani, distributor, hingga pengecer. Dengan mengetahui posisi dan kondisi produk secara akurat, tindakan preventif dapat diambil lebih cepat. Misalnya, jika produk berada di bawah suhu yang tidak sesuai selama pengiriman, sistem berbasis blockchain dapat memberikan notifikasi kepada pihak terkait, yang kemudian dapat segera mengatasi masalah tersebut untuk mencegah kerusakan. Dengan begitu, pemborosan makanan akibat keterlambatan atau penanganan yang salah dapat dikurangi.

C. Aplikasi Mobile untuk Petani: Manfaat dan Tantangan

Digitalisasi pertanian telah membuka banyak peluang untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi sektor pertanian, salah satunya

adalah melalui pemanfaatan aplikasi mobile. Aplikasi mobile untuk petani kini semakin populer di berbagai belahan dunia, memberikan kemudahan akses kepada petani untuk mendapatkan informasi yang lebih baik, memperbaiki hasil pertanian, dan mengoptimalkan sumber daya yang tersedia. Dari informasi cuaca hingga manajemen keuangan pertanian, aplikasi mobile memberikan alat yang sangat diperlukan oleh petani, terutama yang berada di daerah pedesaan (Duncan et al., 2021). Aplikasi-aplikasi ini menghubungkan petani dengan berbagai layanan dan informasi yang sebelumnya sulit dijangkau, seperti akses pasar, tips pertanian yang ramah lingkungan, penggunaan teknologi pertanian terbaru, serta konektivitas dengan lembaga pemerintah atau perusahaan agribisnis. Namun, meskipun memiliki banyak manfaat, adopsi aplikasi mobile juga menghadapi beberapa tantangan.

1. Manfaat Aplikasi Mobile untuk Petani

a. Akses Informasi yang Cepat dan Tepat

Aplikasi mobile telah membawa revolusi dalam cara petani mengakses informasi yang dibutuhkan untuk meningkatkan hasil pertanian. Sebelumnya, petani sering kali bergantung pada sumber informasi yang terbatas dan kurang terjangkau, seperti petugas pertanian lokal atau media cetak. Namun, dengan adanya aplikasi mobile, petani kini dapat mengakses informasi secara langsung dan tepat waktu. Salah satu contoh besar adalah aplikasi seperti AgriApp dan Kisan Suvidha, yang menyediakan prakiraan cuaca harian dan mingguan, memberi petani informasi tentang perubahan cuaca yang dapat mempengaruhi aktivitas pertanian, seperti kapan waktu yang tepat untuk menanam atau memanen.

Penggunaan aplikasi mobile secara signifikan meningkatkan ketepatan waktu pengambilan keputusan oleh petani, terutama dalam hal perencanaan budidaya tanaman. Dengan mengetahui prakiraan cuaca dan informasi terkait iklim secara real-time, petani dapat mengatur jadwal tanam dan pemanenan dengan lebih akurat, yang pada gilirannya dapat meningkatkan hasil pertanian dan efisiensi. Selain itu, aplikasi ini juga memberikan petani akses ke teknik budidaya terbaru dan informasi tentang pestisida yang lebih efektif, yang membantu mengatasi tantangan pertanian modern.

b. Pengelolaan Keuangan dan Pasar

Aplikasi mobile telah membuka peluang baru bagi petani dalam mengelola keuangan dan melakukan transaksi secara lebih efisien. Dengan aplikasi seperti FarmERP, petani dapat memantau pendapatan dan pengeluaran dengan lebih mudah, yang memungkinkan pengelolaan keuangan yang lebih terstruktur. Selain itu, aplikasi ini juga menawarkan fitur yang membantu petani untuk merencanakan dan memonitor anggaran, yang sangat penting dalam sektor pertanian yang sering menghadapi fluktuasi harga dan cuaca yang tidak menentu. Dengan demikian, petani dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan membuat keputusan keuangan yang lebih bijaksana.

Aplikasi mobile juga memfasilitasi petani dalam mencari pasar yang tepat untuk hasil pertanian. Salah satu contoh aplikasi yang sukses adalah e-Choupal, yang sangat populer di India. Aplikasi ini menghubungkan petani secara langsung dengan konsumen atau pengepul dari berbagai daerah, mengurangi ketergantungan pada tengkulak dan menghilangkan perantara yang sering kali meningkatkan biaya transaksi. Petani dapat mengetahui harga pasar yang transparan dan lebih adil, yang memungkinkan untuk mendapatkan harga yang lebih baik dan mengurangi potensi kerugian.

c. Penyuluhan dan Edukasi untuk Petani

Aplikasi mobile juga berperan penting dalam penyuluhan dan edukasi petani, memungkinkan untuk mengakses informasi terbaru tentang teknik pertanian yang efisien dan berkelanjutan. Melalui aplikasi seperti iFarming dan Agri-Edge, petani dapat mempelajari berbagai aspek pertanian, mulai dari cara merawat tanaman dengan metode organik hingga pengelolaan hama secara ramah lingkungan. Video tutorial, artikel, dan panduan langkah demi langkah membantu petani untuk meningkatkan keterampilan, memberikan pengetahuan yang dapat langsung diterapkan di lapangan.

Aplikasi ini juga memungkinkan para ahli atau penyuluh pertanian untuk memberikan bimbingan jarak jauh, meningkatkan kualitas pendidikan pertanian di daerah terpencil yang mungkin kesulitan mengakses pelatihan tatap muka.

Dengan aplikasi ini, petani tidak hanya memperoleh wawasan baru tetapi juga dapat beradaptasi dengan metode yang lebih ramah lingkungan, yang berkontribusi pada keberlanjutan pertanian.

d. Penggunaan Teknologi Canggih dalam Pertanian

Aplikasi mobile memberikan petani akses langsung ke teknologi canggih yang dapat meningkatkan efisiensi pertanian. Misalnya, aplikasi seperti Agri-Tech memungkinkan integrasi dengan perangkat sensor yang dapat memantau kondisi tanah, seperti kelembaban, suhu, dan kadar nutrisi. Data yang dikumpulkan oleh sensor ini memberikan informasi real-time yang membantu petani untuk mengelola sumber daya secara lebih tepat, seperti menentukan waktu yang optimal untuk penyiraman atau pemberian pupuk, sehingga dapat mengurangi pemborosan air dan input pertanian lainnya.

Aplikasi ini juga mendukung penggunaan teknologi drone untuk pemantauan lahan secara udara, memungkinkan petani untuk mengidentifikasi masalah di lahannya, seperti area yang kekurangan air atau terkena hama, tanpa perlu melakukan inspeksi manual. Dengan bantuan teknologi ini, petani dapat membuat keputusan yang lebih cepat dan akurat, yang pada gilirannya meningkatkan hasil panen dan keberlanjutan pertanian.

e. Meningkatkan Efisiensi Operasional

Aplikasi mobile memberikan petani alat yang efektif untuk merencanakan dan mengelola kegiatan pertanian dengan lebih terstruktur. Fitur seperti kalender pertanian yang terintegrasi dalam aplikasi memungkinkan petani untuk menjadwalkan kegiatan seperti penanaman, pemupukan, penyiraman, dan pemanenan dengan lebih tepat. Dengan perencanaan yang lebih baik, petani dapat menghindari penundaan atau kekurangan dalam kegiatan yang krusial, serta memastikan setiap tahap proses pertanian dilakukan pada waktu yang optimal.

Aplikasi mobile membantu meningkatkan efisiensi operasional dengan memberikan pengingat otomatis dan rekomendasi berdasarkan kondisi tanah atau cuaca saat itu. Hal ini mengurangi kemungkinan kesalahan manusia, meningkatkan produktivitas, dan mengurangi pemborosan sumber daya seperti air dan pupuk.

Dengan pengelolaan yang lebih efisien, petani tidak hanya dapat mengurangi biaya operasional tetapi juga meningkatkan hasil pertanian secara keseluruhan.

2. Tantangan dalam Penggunaan Aplikasi Mobile oleh Petani

Meskipun aplikasi mobile menawarkan banyak manfaat, ada sejumlah tantangan yang menghambat adopsinya di kalangan petani, terutama di negara-negara berkembang.

a. Akses Terbatas ke Teknologi dan Infrastruktur

Salah satu tantangan utama dalam penggunaan aplikasi mobile untuk pertanian adalah keterbatasan akses petani terhadap teknologi dan infrastruktur yang dibutuhkan. Di banyak daerah pedesaan, terutama di negara-negara berkembang, banyak petani yang tidak memiliki smartphone atau perangkat yang kompatibel dengan aplikasi mobile. Hal ini membuatnya kesulitan untuk memanfaatkan potensi penuh dari teknologi yang ada. Selain itu, harga perangkat yang relatif mahal juga menjadi penghalang bagi petani untuk memperoleh akses ke teknologi yang dapat mendukung kegiatan pertanian.

Masalah akses internet yang stabil juga menjadi tantangan besar. Banyak daerah pedesaan yang belum memiliki jaringan internet yang memadai atau akses Wi-Fi yang cukup, sehingga sulit bagi petani untuk mengunduh atau memperbarui aplikasi mobile yang dibutuhkan. Tanpa koneksi internet yang baik, aplikasi mobile tidak akan efektif dalam memberikan layanan yang tepat waktu dan akurat, yang sangat penting dalam dunia pertanian yang bergantung pada informasi real-time, seperti prakiraan cuaca atau tips pertanian terbaru.

b. Kurangnya Literasi Digital di Kalangan Petani

Kurangnya literasi digital di kalangan petani, terutama petani yang lebih tua atau yang belum terpapar dengan teknologi, menjadi tantangan besar dalam penggunaan aplikasi mobile untuk pertanian. Banyak petani yang merasa kesulitan mengoperasikan smartphone dan aplikasi karena keterbatasan pengetahuan teknologi. Hal ini membuatnya tidak dapat memanfaatkan potensi penuh aplikasi mobile yang dapat membantu dalam merencanakan kegiatan pertanian, mengelola

sumber daya, dan memperoleh informasi penting terkait cuaca atau pasar.

Untuk mengatasi hal ini, diperlukan upaya yang lebih besar dalam memberikan penyuluhan dan pelatihan kepada petani mengenai penggunaan aplikasi mobile. Dengan pelatihan yang tepat, petani akan lebih mudah mengoperasikan aplikasi dan memahami informasi yang diberikan. Penyuluhan ini juga dapat membantu meningkatkan pemahaman tentang manfaat teknologi, yang pada gilirannya dapat meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian. Tanpa literasi digital yang memadai, potensi aplikasi mobile untuk meningkatkan hasil pertanian tidak akan tercapai secara maksimal.

c. Ketergantungan pada Data dan Keandalan Informasi

Ketergantungan aplikasi pertanian pada data yang akurat menjadi tantangan besar, karena kualitas informasi yang diberikan langsung memengaruhi keputusan yang diambil oleh petani. Jika data cuaca, prediksi musim, atau informasi terkait lainnya tidak akurat, maka rekomendasi yang dihasilkan oleh aplikasi akan keliru. Misalnya, data cuaca yang tidak tepat bisa menyebabkan petani menanam atau memanen di waktu yang kurang optimal, berisiko mengurangi hasil panen dan bahkan kerugian finansial.

Untuk mengatasi hal ini, penting bagi pengembang aplikasi untuk memastikan bahwa data yang digunakan diperoleh dari sumber yang terpercaya dan terus diperbarui. Kualitas dan keandalan informasi adalah faktor kunci dalam memastikan aplikasi dapat berfungsi dengan efektif, memberikan nilai tambah bagi petani, dan meningkatkan produktivitas pertanian.

d. Hambatan Bahasa dan Budaya

Hambatan bahasa menjadi masalah besar dalam penyebaran aplikasi mobile di kalangan petani, terutama di negara-negara berkembang di mana banyak petani berbicara dalam bahasa lokal atau dialek tertentu. Sebagian besar aplikasi mobile pertanian dirancang dalam bahasa Inggris atau bahasa-bahasa dominan lainnya, yang tidak selalu dipahami oleh petani di daerah pedesaan. Hal ini membatasi kemampuan untuk mengakses informasi yang disediakan oleh aplikasi, sehingga manfaat teknologi ini tidak dapat sepenuhnya dimanfaatkan.

Perbedaan budaya dan pemahaman teknis juga memengaruhi penerimaan aplikasi di kalangan petani. Praktik pertanian seringkali dipengaruhi oleh tradisi dan kebiasaan lokal, yang mungkin tidak sesuai dengan pendekatan modern yang ditawarkan oleh aplikasi. Oleh karena itu, pengembang aplikasi perlu mempertimbangkan pentingnya adaptasi aplikasi agar sesuai dengan bahasa lokal dan norma budaya setempat. Menyediakan aplikasi dalam bahasa yang lebih inklusif serta dengan konten yang relevan secara budaya akan meningkatkan adopsi dan keberhasilan penggunaan aplikasi mobile oleh petani.

e. Biaya Aplikasi dan Pelatihan

Meskipun banyak aplikasi mobile untuk pertanian yang dirancang untuk mendukung petani dengan biaya yang terjangkau atau bahkan gratis, beberapa aplikasi memerlukan biaya berlangganan atau pembelian untuk fitur tambahan. Bagi petani kecil, yang sering kali beroperasi dengan anggaran terbatas, biaya ini bisa menjadi beban yang signifikan. Petani mungkin merasa kesulitan untuk mengalokasikan dana untuk aplikasi atau layanan tambahan, yang pada akhirnya membatasi akses terhadap teknologi yang dapat meningkatkan efisiensi dan hasil pertanian.

Meskipun aplikasi mobile dapat memberikan manfaat besar, biaya pelatihan untuk mempelajari cara menggunakan aplikasi ini juga menjadi tantangan. Banyak petani, terutama yang tidak terbiasa dengan teknologi, membutuhkan pelatihan khusus untuk memahami cara mengoperasikan aplikasi secara efektif. Biaya untuk pelatihan ini, baik itu dalam bentuk biaya pelatihan formal atau biaya waktu yang dihabiskan untuk belajar, dapat menjadi hambatan yang mengurangi potensi adopsi teknologi oleh petani, khususnya di daerah dengan keterbatasan sumber daya.

D. Platform Digital untuk Pasar dan Distribusi Hasil Pertanian

Digitalisasi pertanian telah menjadi pilar penting dalam meningkatkan efisiensi dan transparansi dalam berbagai aspek sektor pertanian, termasuk pasar dan distribusi hasil pertanian. Salah satu inovasi yang paling signifikan dalam hal ini adalah platform digital yang memungkinkan petani untuk terhubung langsung dengan pembeli,

mempercepat proses distribusi, dan mengurangi ketergantungan pada perantara yang seringkali mengurangi keuntungan petani. Platform digital ini mencakup aplikasi dan situs web yang memungkinkan petani memasarkan hasil pertanian, memantau harga pasar secara real-time, dan mengelola transaksi dengan lebih efisien (Abdulquadri et al., 2024). Platform ini juga dapat meningkatkan transparansi dalam rantai pasok, memungkinkan konsumen untuk mengetahui asal-usul produk pertanian dan memastikan kualitasnya. Dengan adanya teknologi ini, petani dapat mengakses pasar yang lebih luas, sementara konsumen dapat memperoleh produk yang lebih segar dan dengan harga yang lebih kompetitif.

1. Memperluas Akses ke Pasar

Platform digital berperan penting dalam mengatasi tantangan yang dihadapi petani di daerah pedesaan terkait dengan akses ke pasar. Di banyak wilayah, petani sering kali bergantung pada perantara untuk menjual hasil pertanian. Perantara ini biasanya mengambil bagian dari keuntungan, yang membuat petani tidak mendapatkan harga yang adil untuk produknya. Platform digital, seperti AgriMarketplace, membuka peluang bagi petani untuk menghubungkan langsung dengan pembeli tanpa perantara, yang memberikan lebih banyak kontrol terhadap harga jual dan kondisi perdagangan.

Salah satu keuntungan utama yang ditawarkan platform digital adalah kemampuan untuk memperluas pasar bagi petani. Dalam sistem tradisional, petani di daerah terpencil sering kali terbatas pada pasar lokal yang tidak menawarkan harga yang kompetitif. Dengan platform digital, petani dapat menjangkau pembeli dari berbagai daerah, bahkan internasional. Ini memungkinkan untuk memperoleh harga yang lebih baik, karena dapat memilih dari beberapa pembeli yang bersedia menawarkan harga yang lebih tinggi atau kondisi pembayaran yang lebih menguntungkan.

Platform digital memungkinkan petani untuk memasarkan produknya dengan lebih efisien. Misalnya, dapat memanfaatkan fitur pencarian dan promosi yang disediakan oleh platform untuk meningkatkan visibilitas produknya. Hal ini tidak hanya meningkatkan peluang penjualan, tetapi juga memperkenalkan produk pertanian lokal ke pasar yang lebih luas, yang sebelumnya mungkin sulit dijangkau karena hambatan geografis atau infrastruktur yang terbatas. Platform

seperti AgriMarketplace juga menciptakan ruang bagi petani untuk berinteraksi lebih langsung dengan pembeli dan konsumen. Dengan adanya sistem umpan balik dan review, petani dapat membangun reputasinya di pasar. Ini memberinya keuntungan lebih, karena pembeli dapat merasa lebih yakin untuk membeli produk dari petani yang memiliki rekam jejak baik. Dengan cara ini, petani tidak hanya memperoleh harga yang lebih baik, tetapi juga membangun hubungan jangka panjang dengan pembeli yang dapat memperluas peluang pasar.

2. Meningkatkan Transparansi dalam Rantai Pasok

Kurangnya transparansi dalam rantai pasok pertanian menjadi salah satu masalah besar yang dihadapi oleh petani dan konsumen. Dalam sistem tradisional, konsumen sering kali tidak tahu dari mana asal produk yang dibeli, bagaimana produk tersebut diproses, dan siapa yang sebenarnya mendapatkan manfaat dari penjualan tersebut. Hal ini sering menyebabkan ketidakpercayaan dan keraguan, baik di pihak petani maupun konsumen. Platform digital dapat berperan penting dalam mengatasi masalah ini dengan menyediakan informasi yang jelas dan dapat diakses mengenai setiap langkah dalam rantai pasok, mulai dari produksi hingga distribusi.

Salah satu contoh platform yang meningkatkan transparansi dalam rantai pasok adalah Farm2Market. Aplikasi ini memungkinkan petani untuk melacak hasil pertanian sejak dari ladang hingga sampai ke tangan konsumen. Setiap langkah dalam proses distribusi tercatat secara rinci, mulai dari waktu panen, metode pengolahan, hingga pengiriman produk ke pengecer atau konsumen akhir. Dengan teknologi ini, setiap pihak yang terlibat dalam rantai pasok dapat mengakses informasi yang relevan dan memastikan bahwa semua transaksi berjalan sesuai dengan prosedur yang transparan.

Peningkatan transparansi ini membawa manfaat besar bagi petani. Dengan informasi yang jelas tentang harga yang diterima oleh konsumen dan harga yang diterima petani, dapat lebih memahami nilai dari produknya. Ini juga memungkinkan untuk mendapatkan harga yang lebih adil dan menghindari praktik tidak transparan yang sering dilakukan oleh perantara atau pengepul. Selain itu, konsumen yang lebih sadar akan asal-usul produk cenderung lebih memilih produk yang transparan dalam proses distribusinya, meningkatkan permintaan dan memperluas pasar bagi petani.

3. Pemantauan Harga Pasar Secara Real-Time

Kemampuan untuk memantau harga pasar secara real-time menjadi salah satu manfaat utama dari penggunaan platform digital dalam sektor pertanian. Dalam sistem pertanian tradisional, petani sering kali tidak memiliki informasi yang cukup mengenai perkembangan harga pasar. Mengandalkan informasi dari tengkulak atau perantara yang tidak selalu akurat atau menguntungkan. Dengan adanya platform digital, petani dapat langsung mengakses informasi harga dari berbagai pasar secara aktual, sehingga memiliki dasar yang lebih kuat untuk mengambil keputusan penjualan.

Platform seperti AgriDigital menyediakan data harga pasar harian yang mudah diakses oleh petani melalui perangkat mobile atau komputer. Informasi ini mencakup harga komoditas pertanian di pasar lokal maupun nasional, serta tren harga dari waktu ke waktu. Dengan demikian, petani dapat menentukan strategi penjualan yang lebih cerdas, misalnya dengan menyimpan hasil panen saat harga rendah dan menjualnya ketika harga naik. Kemampuan ini sangat penting terutama bagi petani kecil yang sebelumnya tidak memiliki akses ke data pasar yang valid dan tepat waktu.

Real-time pricing juga membantu petani menghindari kerugian akibat fluktuasi harga. Dalam banyak kasus, petani menjual produknya terlalu dini atau terlalu lambat karena kurangnya informasi tentang harga pasar saat itu. Dengan pemantauan yang akurat dan terus-menerus, petani dapat merespons perubahan harga dengan cepat dan meminimalkan risiko kerugian. Selain itu, data harga yang tersedia secara terbuka dapat meningkatkan daya tawar petani terhadap pembeli dan perantara.

4. Mengurangi Biaya Distribusi

Biaya distribusi yang tinggi merupakan salah satu tantangan utama dalam rantai pasok pertanian tradisional. Dalam sistem konvensional, produk pertanian harus melalui berbagai perantara seperti tengkulak, pedagang grosir, dan distributor sebelum sampai ke konsumen akhir. Setiap tahapan distribusi tersebut menambah biaya dan mengurangi margin keuntungan yang diterima oleh petani. Akibatnya, harga produk di pasar menjadi lebih mahal, sementara petani hanya menerima sebagian kecil dari nilai jual produknya.

Dengan munculnya platform digital seperti Kisan Network dan Trade Geeks, struktur distribusi yang kompleks tersebut mulai dapat dipangkas. Platform ini memfasilitasi interaksi langsung antara petani dan pembeli, baik itu konsumen individu maupun pelaku bisnis seperti restoran, pasar swalayan, dan eksportir. Dengan menghilangkan perantara, biaya distribusi dapat ditekan secara signifikan. Petani pun memiliki kesempatan untuk menetapkan harga yang lebih kompetitif tanpa mengorbankan keuntungan.

Transaksi langsung melalui platform digital juga memungkinkan proses logistik yang lebih sederhana dan transparan. Banyak platform menyediakan sistem pelacakan pengiriman yang terintegrasi, sehingga petani dan pembeli dapat memantau pergerakan produk secara real-time. Hal ini membantu mengurangi risiko kehilangan atau kerusakan produk selama proses pengiriman, serta mempercepat waktu distribusi dari ladang ke pasar.

5. Kemudahan Pembayaran dan Transaksi Digital

Kemajuan teknologi digital telah menghadirkan solusi signifikan dalam sistem pembayaran di sektor pertanian. Salah satu manfaat utama dari platform digital adalah kemudahan dalam melakukan transaksi keuangan, baik untuk penjualan hasil pertanian maupun pembelian input produksi. Dalam sistem konvensional, petani sering kali harus menunggu lama untuk menerima pembayaran, atau bahkan menghadapi risiko tidak dibayar oleh tengkulak atau pihak perantara. Platform digital mengatasi masalah ini dengan menyediakan sistem pembayaran yang cepat, aman, dan transparan.

Penggunaan sistem pembayaran digital, seperti dompet elektronik dan transfer bank langsung, memungkinkan transaksi tanpa uang tunai yang lebih efisien dan minim risiko. Platform seperti Farmerline telah mengintegrasikan fitur pembayaran langsung dalam aplikasinya, sehingga petani dapat menerima pembayaran segera setelah transaksi disetujui. Hal ini sangat membantu terutama bagi petani kecil yang sering mengalami kendala arus kas dan membutuhkan pembayaran segera untuk mendanai kegiatan pertanian selanjutnya.

Sistem ini juga meningkatkan keamanan transaksi. Risiko kehilangan uang fisik, pemalsuan, atau penipuan dapat ditekan karena seluruh transaksi tercatat secara digital dan dapat dilacak. Platform digital biasanya juga memiliki sistem verifikasi untuk memastikan

bahwa pembayaran hanya dilakukan setelah produk diterima sesuai kesepakatan, sehingga kedua belah pihak merasa lebih aman dan terlindungi dalam bertransaksi.

BAB VII
INOVASI GENETIKA DAN BIOTEKNOLOGI PERTANIAN

Inovasi Genetika dan Bioteknologi Pertanian membahas kemajuan terbaru dalam bidang genetika dan bioteknologi yang berperan penting dalam pengembangan pertanian modern. Teknologi-teknologi ini memungkinkan para ilmuwan untuk menciptakan tanaman dengan karakteristik yang lebih unggul, seperti ketahanan terhadap hama dan penyakit, peningkatan hasil panen, serta ketahanan terhadap kondisi iklim yang ekstrem. Seiring dengan perubahan iklim dan tantangan global dalam pemenuhan kebutuhan pangan, inovasi genetika dan bioteknologi menjadi kunci dalam menciptakan solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan bagi sektor pertanian.

Salah satu teknologi yang berkembang pesat dalam bidang ini adalah rekayasa genetika, yang memungkinkan manipulasi DNA tanaman untuk memperoleh sifat-sifat unggul yang diinginkan. Penggunaan teknik-teknik seperti CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) dalam pemuliaan tanaman telah membuka peluang baru untuk menghasilkan varietas tanaman yang lebih produktif dan lebih tahan terhadap stres lingkungan. Inovasi ini juga memiliki potensi besar untuk mengurangi ketergantungan pada bahan kimia, seperti pestisida dan herbisida, yang berdampak negatif pada lingkungan dan kesehatan manusia.

A. Rekayasa Genetika untuk Tanaman Tahan Iklim Ekstrem

Pada beberapa dekade terakhir, perubahan iklim global telah menyebabkan cuaca ekstrem yang lebih sering terjadi, termasuk kekeringan yang berkepanjangan, suhu tinggi, dan badai tropis. Perubahan ini berpotensi merusak ketahanan pangan dunia, karena

tanaman pertanian yang umumnya tidak tahan terhadap kondisi iklim ekstrem. Untuk mengatasi tantangan ini, salah satu pendekatan yang paling menjanjikan adalah rekayasa genetika atau modifikasi genetik pada tanaman agar lebih tahan terhadap perubahan iklim yang ekstrem.

Rekayasa genetika adalah proses di mana gen dari organisme lain, baik dari spesies yang sama atau berbeda, dimasukkan ke dalam tanaman untuk memberi sifat yang diinginkan, seperti ketahanan terhadap kekeringan, suhu tinggi, atau kondisi salinitas yang tinggi. Teknologi ini memungkinkan penambahan atau pengubahan sifat tanaman tanpa harus menunggu proses pemuliaan tanaman konvensional yang memakan waktu bertahun-tahun. Teknologi ini memberikan solusi yang cepat dan efektif untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim, yang merupakan masalah penting dalam mencapai ketahanan pangan di masa depan.

1. Rekayasa Genetika untuk Ketahanan terhadap Kekeringan

Kekeringan adalah salah satu bentuk iklim ekstrem yang paling merusak sektor pertanian. Banyak tanaman pertanian penting seperti padi, jagung, dan gandum sangat sensitif terhadap kekurangan air, yang dapat menyebabkan penurunan hasil yang signifikan. Oleh karena itu, rekayasa genetika untuk menciptakan tanaman yang lebih tahan terhadap kekeringan telah menjadi area penelitian yang sangat penting dalam bioteknologi pertanian.

a. Mekanisme Ketahanan Kekeringan pada Tanaman

   Rekayasa genetika telah menjadi salah satu pendekatan penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan, sebuah tantangan utama dalam sektor pertanian modern akibat perubahan iklim. Ketahanan terhadap kekeringan pada tanaman sangat bergantung pada kemampuan fisiologis dan biokimia tanaman dalam mempertahankan keseimbangan air dan fungsi metabolik saat berada di bawah tekanan air. Salah satu mekanisme utama adalah osmoregulasi, yaitu proses penyesuaian tekanan osmotik sel tanaman untuk mempertahankan hidrasi. Melalui rekayasa genetika, ilmuwan dapat memasukkan gen yang mengatur produksi senyawa osmoregulator seperti trehalosa, yang membantu menjaga integritas membran sel dan protein selama kondisi dehidrasi (Joshi et al., 2020).

Modifikasi sistem akar juga menjadi fokus penting dalam meningkatkan penyerapan air. Tanaman yang memiliki akar lebih dalam dan bercabang luas memiliki kapasitas yang lebih besar untuk mencari sumber air di dalam tanah. Rekayasa genetika memungkinkan manipulasi genetik pada hormon pertumbuhan seperti auksin dan sitokinin, yang mempengaruhi pola pertumbuhan akar. Tidak hanya itu, produksi aquaporin, yaitu protein saluran air di membran sel, juga dapat ditingkatkan melalui rekayasa genetika untuk mempercepat pergerakan air dalam jaringan tanaman. Aquaporin sangat penting dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air, terutama dalam kondisi tanah yang kering.

b. Kasus Tanaman Tahan Kekeringan yang Dimodifikasi Secara Genetik

Salah satu contoh paling menonjol dari penerapan rekayasa genetika untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan adalah pengembangan jagung transgenik oleh perusahaan-perusahaan pertanian besar seperti Monsanto dan Syngenta. Jagung ini dimodifikasi secara genetik untuk mengekspresikan gen dari bakteri Bacillus subtilis atau gen lainnya yang berkaitan dengan pengendalian osmoregulasi dan efisiensi penggunaan air. Gen tersebut memungkinkan tanaman untuk menyerap air lebih efisien dan mengurangi kehilangan air melalui daun. Berdasarkan penelitian Zhao et al. (2021), varietas jagung transgenik ini menunjukkan ketahanan yang jauh lebih baik terhadap kondisi kekeringan, dengan peningkatan hasil panen sebesar 10–15% dibandingkan varietas non-transgenik dalam kondisi air terbatas.

Padi juga menjadi fokus utama dalam penelitian rekayasa genetika untuk ketahanan terhadap kekeringan, terutama karena pentingnya padi sebagai makanan pokok di banyak negara tropis. Padi transgenik yang dimodifikasi untuk mengatur ekspresi gen yang berperan dalam kontrol stomata struktur kecil pada permukaan daun yang mengatur penguapan air dapat menahan air lebih baik. Modifikasi ini membantu tanaman mempertahankan keseimbangan air internalnya, bahkan ketika ketersediaan air di tanah sangat rendah, tanpa mengorbankan fotosintesis secara signifikan.

2. Rekayasa Genetika untuk Ketahanan terhadap Suhu Ekstrem

Perubahan suhu global yang lebih tinggi dan fluktuasi suhu yang drastis dapat memengaruhi hasil pertanian, terutama untuk tanaman yang sensitif terhadap suhu tinggi. Suhu ekstrem dapat merusak proses fotosintesis, mempercepat dehidrasi, dan menyebabkan penurunan hasil yang dramatis.

a. Modifikasi Gen untuk Toleransi Suhu Tinggi

Suhu tinggi merupakan salah satu bentuk stres abiotik yang paling merugikan dalam pertanian, terutama di era perubahan iklim yang semakin tidak menentu. Tanaman yang terpapar suhu ekstrem mengalami kerusakan pada struktur sel, denaturasi protein, dan gangguan pada proses fotosintesis. Untuk mengatasi masalah ini, rekayasa genetika digunakan untuk meningkatkan toleransi tanaman terhadap suhu tinggi dengan cara memperkenalkan atau meningkatkan ekspresi gen yang mengatur produksi *heat shock proteins* (HSPs). HSPs bertindak sebagai "*chaperone molekuler*" yang melindungi dan memperbaiki protein yang rusak akibat panas, menjaga struktur dan fungsi protein tetap stabil meskipun suhu lingkungan melonjak.

Salah satu contoh nyata dari penerapan teknologi ini dapat ditemukan pada tanaman tomat yang dimodifikasi untuk mengekspresikan gen HSP70. Tanaman tomat transgenik menunjukkan resistensi yang jauh lebih baik terhadap suhu tinggi dibandingkan dengan varietas biasa. Tanaman tersebut mengalami lebih sedikit kerusakan jaringan, mempertahankan laju fotosintesis yang lebih tinggi, dan menghasilkan buah dengan jumlah dan kualitas yang lebih baik meskipun ditanam dalam kondisi suhu tinggi yang ekstrem. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan ekspresi HSP70 memberikan perlindungan penting terhadap stres panas.

b. Tanaman Transgenik yang Tahan Suhu Tinggi

Untuk menghadapi tantangan perubahan iklim, khususnya suhu tinggi yang ekstrem, rekayasa genetika berperan penting dalam mengembangkan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap stres panas. Selain protein kejutan panas (*heat shock proteins* atau HSPs), mekanisme pertahanan lain yang sangat penting adalah sistem antioksidan tanaman. Suhu tinggi dapat menyebabkan akumulasi spesies oksigen reaktif (ROS) yang

merusak sel-sel tanaman, seperti membran dan protein. Oleh karena itu, peningkatan ekspresi enzim antioksidan seperti *superoxide dismutase* (SOD) menjadi strategi penting dalam melindungi tanaman dari kerusakan oksidatif yang disebabkan oleh panas (Ali et al., 2020).

Salah satu contoh yang menonjol adalah padi transgenik yang dimodifikasi secara genetik untuk meningkatkan aktivitas enzim SOD. Tanaman padi yang telah dimodifikasi ini menunjukkan toleransi yang lebih tinggi terhadap suhu ekstrem dibandingkan dengan varietas konvensional. Padi transgenik tersebut mampu mempertahankan struktur sel yang lebih stabil, menunjukkan gejala kerusakan daun yang lebih rendah, dan mempertahankan hasil panen yang lebih baik meskipun ditanam dalam kondisi suhu tinggi. Ini membuktikan bahwa perlindungan terhadap stres oksidatif berperan sentral dalam ketahanan terhadap panas.

3. Rekayasa Genetika untuk Ketahanan terhadap Salinitas

Salinitas tanah yang tinggi merupakan masalah serius di banyak daerah pertanian, yang menghambat kemampuan tanaman untuk menyerap air dengan efektif dan dapat menyebabkan penurunan hasil yang signifikan. Rekayasa genetika untuk ketahanan terhadap salinitas bertujuan untuk menghasilkan tanaman yang dapat bertahan hidup dan berkembang biak di tanah yang mengandung garam tinggi.

a. Gen yang Meningkatkan Toleransi Salinitas

Ketahanan terhadap salinitas merupakan tantangan besar dalam pertanian, terutama di daerah dengan irigasi berlebihan atau daerah pesisir yang rentan terhadap intrusi air laut. Rekayasa genetika menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan kemampuan tanaman bertahan dalam lingkungan dengan kadar garam tinggi. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah meningkatkan sintesis prolin, yaitu senyawa organik kecil yang berfungsi sebagai osmoregulator. Prolin membantu menjaga tekanan osmotik sel tanaman dan melindungi struktur protein serta membran dari kerusakan akibat stres salinitas. Tanaman yang dimodifikasi untuk memproduksi lebih banyak prolin menunjukkan toleransi yang lebih tinggi terhadap kondisi salin (Cheng et al., 2018).

Gen NHX1 menjadi fokus utama dalam pengembangan tanaman tahan garam. Gen ini berperan dalam mengatur keseimbangan ion di dalam sel dengan memompa ion natrium (Na^+) ke vakuola, sehingga mengurangi konsentrasi garam di sitoplasma yang berbahaya bagi proses metabolisme. Kapas transgenik yang mengekspresikan gen AtNHX1 dari tanaman Arabidopsis thaliana mampu mengurangi kerusakan pada akar dan meningkatkan pertumbuhan secara keseluruhan meskipun ditanam dalam kondisi tanah dengan kadar garam tinggi.

b. Tanaman Tahan Salinitas yang Dimodifikasi Secara Genetik

Rekayasa genetika telah membuka peluang besar dalam menciptakan tanaman pangan yang mampu bertahan di lingkungan dengan kadar garam tinggi, yang sebelumnya dianggap sebagai lahan marginal. Salah satu contoh sukses adalah pengembangan tomat transgenik yang dimodifikasi dengan gen untuk meningkatkan ekspresi protein pengatur ion dan asam amino. Protein-protein ini berperan penting dalam menjaga keseimbangan ion di dalam sel dan membantu tanaman menghindari stres osmotik akibat akumulasi garam. Tomat transgenik ini menunjukkan pertumbuhan akar dan daun yang lebih baik dibandingkan varietas konvensional ketika ditanam di tanah salin, serta memiliki hasil panen yang lebih tinggi.

Tanaman padi juga menjadi subjek utama dalam penelitian ketahanan terhadap salinitas karena perannya yang krusial sebagai makanan pokok di banyak negara. Salah satu pendekatan inovatif yang digunakan adalah menggabungkan gen dari tanaman halofit, tanaman alami yang dapat tumbuh di tanah dengan kadar garam tinggi ke dalam genom padi. Hasilnya, padi transgenik tersebut memiliki kemampuan untuk mempertahankan fungsi fisiologisnya dalam kondisi salin, termasuk fotosintesis dan pembelahan sel yang stabil. Penelitian oleh Munns dan Tester (2008) menunjukkan bahwa padi yang telah dimodifikasi ini mampu bertahan dalam konsentrasi garam yang biasanya menghambat pertumbuhan varietas biasa.

B. Mikroorganisme sebagai Solusi Ramah Lingkungan

Pada beberapa tahun terakhir, tantangan besar yang dihadapi oleh sektor pertanian global adalah bagaimana meningkatkan produktivitas pertanian secara berkelanjutan, mengurangi dampak lingkungan yang merusak, serta mengatasi masalah kesehatan tanaman dan tanah. Salah satu solusi yang semakin populer dalam mengatasi tantangan ini adalah penggunaan mikroorganisme dalam pertanian. Mikroorganisme, yang mencakup bakteri, jamur, alga, dan virus, memiliki potensi besar untuk meningkatkan keberlanjutan pertanian dengan cara yang ramah lingkungan.

Mikroorganisme dapat berperan sebagai agen biofertilizer, biopestisida, serta berfungsi dalam pengolahan limbah pertanian. Tidak hanya meningkatkan hasil pertanian, tetapi juga dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan kimia sintetik yang sering kali merusak lingkungan dan mengancam kesehatan manusia. Penelitian dan aplikasi mikroorganisme dalam pertanian juga berfokus pada peningkatan efisiensi penggunaan air, pengurangan polusi tanah dan air, serta pemeliharaan keanekaragaman hayati tanah.

1. Mikroorganisme sebagai Biofertilizer

a. Peran Mikroorganisme dalam Memperbaiki Kualitas Tanah

Mikroorganisme berperan vital dalam memperbaiki kualitas tanah melalui mekanisme alami yang ramah lingkungan. Sebagai biofertilizer, mikroorganisme seperti bakteri pengikat nitrogen mampu menyediakan nutrisi esensial yang dibutuhkan oleh tanaman. Rhizobium, misalnya, hidup bersimbiosis dengan akar tanaman leguminosa dan mengikat nitrogen bebas dari atmosfer menjadi bentuk amonia yang dapat langsung dimanfaatkan oleh tanaman. Sementara itu, Azotobacter berperan dalam tanah non-leguminosa dengan meningkatkan ketersediaan nitrogen secara bebas di tanah, memberikan kontribusi besar terhadap kesuburan lahan tanpa perlu tambahan pupuk nitrogen sintetis.

Mikroorganisme tanah juga berperan dalam mempercepat proses dekomposisi bahan organik. Bakteri dan fungi pengurai memecah sisa-sisa tanaman, hewan, dan limbah organik menjadi senyawa yang lebih sederhana. Proses ini tidak hanya menghasilkan humus yang kaya akan nutrisi, tetapi juga

meningkatkan struktur tanah. Tanah dengan kandungan humus tinggi memiliki porositas dan kapasitas menahan air yang lebih baik, yang secara langsung meningkatkan efisiensi penyerapan air dan nutrisi oleh akar tanaman.

b. Bakteri yang Memperbaiki Ketersediaan Fosfor dan Kalium
Bakteri dan mikroorganisme lainnya berperan penting dalam meningkatkan ketersediaan fosfor dan kalium, dua unsur hara yang sering kali terbatas dalam tanah. Mycorrhiza, salah satu jenis jamur mikoriza yang berkolaborasi dengan akar tanaman, merupakan salah satu contoh mikroorganisme yang sangat efektif dalam meningkatkan ketersediaan fosfor. Mycorrhiza memperluas jaringan akar tanaman, yang memungkinkan tanaman untuk mengakses fosfor yang sebelumnya sulit dijangkau. Fosfor, yang sangat penting untuk pertumbuhan akar dan pembungaan tanaman, sering kali tidak tersedia dalam bentuk yang dapat diserap tanaman. Melalui simbiosis ini, mikoriza mengubah fosfor tidak larut menjadi bentuk yang lebih mudah diserap oleh tanaman, meningkatkan efisiensi penggunaan unsur hara ini.
Beberapa bakteri juga memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketersediaan kalium, unsur hara yang penting untuk mengatur keseimbangan air dan sintesis protein dalam tanaman. Bakteri pelarut kalium, seperti yang ditemukan dalam tanah yang sehat, mampu mengubah kalium yang terikat dalam mineral tanah menjadi bentuk yang lebih mudah diserap oleh tanaman. Dengan adanya bakteri tersebut, tanaman dapat mengakses kalium secara lebih efisien, yang dapat meningkatkan daya tahan tanaman terhadap stres abiotik, seperti kekeringan atau suhu ekstrem.

2. Mikroorganisme sebagai Biopestisida

Penggunaan pestisida kimia dalam pertanian sering kali memiliki dampak lingkungan yang serius, termasuk pencemaran tanah, air, dan pengurangan keberagaman hayati. Sebagai solusi alternatif, mikroorganisme digunakan sebagai biopestisida yang dapat mengendalikan hama dan penyakit tanaman tanpa merusak lingkungan. Mikroorganisme ini bekerja dengan berbagai cara, seperti mengeluarkan

senyawa toksik terhadap hama, menghambat perkembangan jamur patogen, atau mendorong sistem kekebalan tanaman. Beberapa mikroorganisme yang telah terbukti efektif sebagai biopestisida antara lain:

a. Bacillus thuringiensis (Bt)

   Bacillus thuringiensis (Bt) adalah mikroorganisme yang menghasilkan protein toksin yang sangat efektif dalam membunuh serangga tertentu, seperti ulat daun dan kutu, yang sering menjadi hama pada tanaman. Toksin yang dihasilkan oleh Bt bersifat selektif, artinya hanya berdampak pada serangga yang mengonsumsinya, sementara tanaman dan makhluk hidup lain yang bermanfaat tetap aman. Keunggulan Bt terletak pada kemampuannya untuk mengendalikan hama tanpa memerlukan bahan kimia berbahaya yang dapat mencemari lingkungan dan merusak ekosistem (Ortiz & Sansinenea, 2022).

   Penggunaan Bt sebagai biopestisida telah terbukti efektif dalam mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh serangga hama, sekaligus mendukung pertanian yang lebih ramah lingkungan. Penggunaan Bacillus thuringiensis tidak hanya mengurangi populasi hama, tetapi juga meningkatkan hasil pertanian dengan mengurangi kebutuhan akan pestisida kimia. Hal ini memberikan alternatif yang lebih berkelanjutan dalam mengelola hama tanaman tanpa merugikan kesehatan manusia atau organisme non-target.

b. Trichoderma spp.

   Trichoderma spp. adalah jamur yang dikenal sebagai agen pengendalian hayati yang efektif dalam melawan patogen tanah, seperti Fusarium dan Rhizoctonia, yang dapat menyebabkan berbagai penyakit akar pada tanaman. Trichoderma berkompetisi dengan patogen ini untuk mendapatkan nutrisi dan ruang, serta menghasilkan senyawa-senyawa antifungal yang menghambat pertumbuhannya. Penggunaan Trichoderma dalam pertanian membantu mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, yang sering kali memiliki dampak negatif pada lingkungan dan kesehatan manusia (El Enshasy et al., 2020).

   Trichoderma spp. juga dikenal memiliki peran dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan,

termasuk kekeringan dan salinitas. Jamur ini dapat memperbaiki sistem pertahanan tanaman, meningkatkan daya tahan terhadap serangan patogen, dan membantu tanaman beradaptasi dengan kondisi lingkungan yang buruk. Dengan demikian, Trichoderma tidak hanya mengendalikan penyakit, tetapi juga mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih sehat dan tahan terhadap berbagai tantangan lingkungan.

c. Pseudomonas spp.

Pseudomonas spp. adalah kelompok bakteri yang memiliki kemampuan luar biasa dalam melawan patogen tanaman melalui produksi senyawa antimikroba, seperti antibiotik dan senyawa penghambat pertumbuhan patogen. Bakteri ini berkompetisi dengan patogen untuk ruang dan sumber daya di permukaan akar, mengurangi infeksi penyakit yang dapat merusak tanaman. Dengan kemampuan untuk menghambat pertumbuhan berbagai jenis patogen, Pseudomonas telah digunakan secara luas sebagai biopestisida dalam pertanian, menggantikan penggunaan pestisida kimia yang dapat berdampak negatif pada lingkungan (Höfte, 2021). Selain perannya dalam mengendalikan patogen, Pseudomonas spp. juga membantu meningkatkan daya tahan tanaman terhadap stres biotik dan abiotik. Bakteri ini dapat memicu respon sistem pertahanan tanaman, meningkatkan toleransi terhadap stres seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem.

3. Mikroorganisme dalam Pengolahan Limbah Pertanian

a. Mikroorganisme untuk Dekomposisi Limbah Pertanian

Limbah pertanian, jika tidak dikelola dengan baik, dapat mencemari lingkungan dan membuang potensi sumber daya yang seharusnya dapat dimanfaatkan. Salah satu solusi yang ramah lingkungan untuk mengelola limbah ini adalah dengan menggunakan mikroorganisme untuk dekomposisi. Bakteri pengurai dan jamur dekomposer memiliki kemampuan untuk mengubah sisa-sisa tanaman, dedak padi, dan bahan organik lainnya menjadi kompos yang kaya nutrisi. Proses dekomposisi ini tidak hanya mengurangi volume limbah tetapi juga mengubahnya menjadi bahan yang berguna untuk meningkatkan kesuburan tanah.

Bakteri seperti Bacillus dan Pseudomonas, serta jamur seperti Trichoderma dan Aspergillus, adalah beberapa contoh mikroorganisme yang efektif dalam mengurai limbah organik. Mikroorganisme ini memecah bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana, melepaskan unsur hara yang penting untuk tanaman. Sebagai hasilnya, tanah menjadi lebih subur dan dapat menahan air lebih baik, meningkatkan kualitas tanah secara keseluruhan. Kompos yang dihasilkan dari proses ini juga dapat digunakan untuk memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kemampuan tanah untuk menyimpan unsur hara, dan mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia.

b. Mikroorganisme untuk Pengolahan Biogas

Mikroorganisme anaerobik memiliki peran penting dalam pengolahan limbah pertanian untuk menghasilkan biogas, yang merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Proses pengolahan biogas melibatkan bakteri dan mikroorganisme lainnya yang mampu menguraikan bahan organik, seperti kotoran ternak, jerami, dan sisa tanaman, dalam kondisi tanpa oksigen. Selama proses ini, mikroorganisme menghasilkan metana, yang dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk kebutuhan energi, menggantikan bahan bakar fosil yang lebih mencemari.

Pengolahan limbah pertanian menjadi biogas juga memiliki potensi untuk mengurangi jumlah limbah organik yang dibuang secara tidak terkendali. Limbah yang sebelumnya dapat menyebabkan polusi atau dibakar, kini dapat diproses menjadi sumber daya yang berguna. Hal ini mengurangi beban lingkungan akibat penumpukan limbah pertanian, yang pada gilirannya dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan dampak negatif terhadap kualitas udara dan tanah.

4. Mikroorganisme dalam Pemulihan Tanah dan Air

a. Mikroorganisme untuk Remediasi Tanah

Tanah yang tercemar oleh pestisida atau logam berat dapat mengalami penurunan kualitas yang serius, yang pada gilirannya mempengaruhi produktivitas pertanian dan kesehatan ekosistem. Salah satu pendekatan yang efektif untuk memulihkan tanah yang tercemar adalah dengan menggunakan mikroorganisme,

melalui proses yang dikenal sebagai bioremediasi. Mikroorganisme seperti bakteri dan fungi memiliki kemampuan alami untuk mengurai atau mengurangi tingkat polutan berbahaya di dalam tanah, sehingga membantu mengembalikan kualitas tanah yang tercemar.

Bakteri seperti Pseudomonas putida dan Bacillus spp. telah terbukti efektif dalam mengurangi kontaminasi pestisida dan bahan kimia lain yang ada di tanah. Mikroorganisme ini bekerja dengan memecah senyawa berbahaya menjadi komponen yang lebih sederhana dan tidak beracun, yang dapat diterima kembali oleh ekosistem. Proses ini tidak hanya menghilangkan polutan, tetapi juga dapat mengubah senyawa berbahaya menjadi nutrisi yang bermanfaat bagi tanaman, sehingga memperbaiki kualitas tanah.

b. Mikroorganisme dalam Pengolahan Air Limbah

Air limbah pertanian, yang sering mengandung bahan organik dan bahan kimia berbahaya, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan yang serius, terutama di perairan yang mengalir ke ekosistem alami. Salah satu cara yang efektif untuk mengatasi masalah ini adalah dengan menggunakan mikroorganisme untuk mengolah air limbah. Mikroorganisme memiliki kemampuan alami untuk menguraikan bahan organik, menghilangkan bahan kimia berbahaya, serta mengurangi konsentrasi unsur hara yang dapat menyebabkan eutrofikasi. Beberapa mikroorganisme yang digunakan dalam pengolahan air limbah ini antara lain alga dan bakteri fototrofik, yang dapat memanfaatkan cahaya matahari untuk mengubah bahan organik menjadi produk yang lebih ramah lingkungan.

Alga fototrofik, khususnya, dapat berperan penting dalam mengurangi kandungan nutrisi berlebih dalam air limbah, seperti nitrogen dan fosfor, yang sering kali menjadi penyebab utama eutrofikasi. Proses fotosintesis yang dilakukan oleh alga tidak hanya mengurangi bahan organik, tetapi juga menghasilkan oksigen yang mendukung kelangsungan hidup organisme akuatik lainnya. Selain itu, bakteri fototrofik juga dapat mengurangi kandungan bahan kimia berbahaya dengan memanfaatkan energi dari cahaya matahari untuk mendegradasi senyawa beracun.

C. Teknologi CRISPR dalam Pemuliaan Tanaman

CRISPR/Cas9 bekerja berdasarkan prinsip sistem kekebalan alami yang dimiliki oleh banyak bakteri dan archaea untuk melawan infeksi virus. Secara teknis, sistem CRISPR menggunakan sekuens DNA pendek yang dikenal sebagai CRISPR array yang menyimpan potongan DNA dari virus yang sebelumnya menginfeksi organisme tersebut. Ketika virus yang sama menyerang kembali, protein Cas9 dipandu oleh RNA untuk memotong DNA virus tersebut. Dalam konteks pemuliaan tanaman, teknologi ini digunakan untuk memodifikasi DNA tanaman secara tepat, memungkinkan para ilmuwan untuk mengedit gen yang berhubungan dengan sifat-sifat penting, seperti ketahanan terhadap penyakit, toleransi terhadap kekeringan, atau perbaikan kandungan gizi.

1. Peningkatan Ketahanan terhadap Stres Lingkungan

Salah satu aplikasi utama CRISPR dalam pemuliaan tanaman adalah untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan, seperti kekeringan, suhu ekstrem, dan salinitas tinggi. Tanaman yang mampu bertahan dalam kondisi lingkungan yang kurang ideal akan sangat penting di masa depan mengingat dampak perubahan iklim.

a. Tanaman Tahan Kekeringan

Teknologi CRISPR telah membuka peluang baru dalam pengembangan tanaman tahan kekeringan melalui modifikasi genetik yang lebih presisi. Salah satu aplikasi utama dari CRISPR adalah mengedit gen yang mengatur pengaturan stomata pada tanaman. Stomata berfungsi sebagai pintu untuk pertukaran gas dan penguapan air. Dengan mengedit gen yang mengontrol pembukaan dan penutupan stomata, para ilmuwan dapat membuat tanaman lebih efisien dalam penggunaan air, sehingga dapat bertahan lebih lama dalam kondisi kekeringan. Penelitian yang dilakukan pada tanaman Arabidopsis dan padi menunjukkan hasil yang menjanjikan, di mana tanaman yang dimodifikasi genetik ini mampu bertahan lebih baik dalam kondisi kering tanpa mengorbankan hasil (Sami et al., 2021).

Hasil ini sangat penting untuk menghadapi perubahan iklim yang menyebabkan peningkatan frekuensi dan durasi kekeringan. Dengan tanaman yang lebih tahan terhadap stres air,

produktivitas pertanian dapat dipertahankan meskipun dihadapkan pada kondisi lingkungan yang tidak menentu. Keberhasilan modifikasi genetik menggunakan CRISPR juga berpotensi mengurangi ketergantungan pada irigasi yang mahal dan sumber daya air yang terbatas, menjadikannya solusi yang lebih berkelanjutan untuk pertanian di masa depan.

b. Toleransi Terhadap Salinitas

Penggunaan teknologi CRISPR untuk meningkatkan toleransi terhadap salinitas pada tanaman merupakan salah satu terobosan besar dalam pertanian modern. Tanaman yang biasanya kesulitan tumbuh di lahan dengan kandungan garam tinggi, seperti daerah pesisir, kini dapat dimodifikasi untuk mengelola stres salinitas dengan lebih baik. Salah satu contoh penerapan CRISPR adalah pada tanaman tomat, yang dimodifikasi untuk meningkatkan kemampuan dalam menangani konsentrasi garam yang tinggi di tanah. Modifikasi genetik ini melibatkan pengaktifan gen yang terlibat dalam mekanisme pengaturan osmoregulasi dan transportasi ion, yang memungkinkan tanaman untuk mempertahankan keseimbangan air dan garam meskipun berada dalam kondisi salin.

Keberhasilan modifikasi genetik ini sangat penting mengingat meningkatnya ancaman salinisasi lahan akibat perubahan iklim. Dengan kemampuan baru untuk bertahan di tanah salin, tanaman seperti tomat dapat tumbuh dengan lebih baik di lahan pesisir yang sebelumnya tidak dapat dimanfaatkan secara maksimal. Hal ini tidak hanya meningkatkan hasil pertanian di daerah yang terpapar salinitas, tetapi juga membuka potensi untuk memanfaatkan lahan yang dulunya terabaikan, meningkatkan ketahanan pangan global di masa depan.

2. Meningkatkan Ketahanan terhadap Penyakit

Penyakit tanaman, yang disebabkan oleh patogen seperti jamur, virus, dan bakteri, dapat merusak hasil pertanian dan mengurangi kualitas tanaman. Dengan CRISPR, para ilmuwan dapat mengedit gen tanaman untuk meningkatkan ketahanannya terhadap penyakit.

a. Padi Tahan Penyakit

Penggunaan teknologi CRISPR pada tanaman padi telah memberikan solusi potensial untuk mengatasi ancaman penyakit

yang disebabkan oleh patogen seperti Magnaporthe oryzae, penyebab penyakit blast pada padi. Peneliti menggunakan CRISPR untuk mengedit gen-gen yang berperan dalam sistem pertahanan tanaman, khususnya yang terkait dengan respon imun terhadap serangan jamur. Dengan modifikasi ini, tanaman padi menjadi lebih mampu mengenali dan menanggapi infeksi secara lebih efisien, mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh penyakit blast yang seringkali mengakibatkan penurunan hasil yang signifikan.

Padi yang telah dimodifikasi dengan teknologi CRISPR ini memiliki potensi besar untuk meningkatkan ketahanan terhadap penyakit, mengurangi ketergantungan pada pestisida kimia, dan memperbaiki hasil pertanian. Terutama di negara-negara penghasil padi utama, di mana penyakit blast dapat merusak ladang padi secara masif, pendekatan ini menawarkan cara yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan untuk memastikan ketahanan pangan global. Hasil penelitian ini juga membuka peluang untuk mengembangkan varietas padi yang lebih tahan terhadap patogen lainnya, yang sangat penting untuk menghadapi tantangan pertanian di masa depan.

b. Kentang Tahan Virus

Teknologi CRISPR telah diterapkan pada tanaman kentang untuk meningkatkan ketahanannya terhadap virus Y dan late blight, dua penyakit yang sering merusak produksi kentang secara signifikan. Virus Y dapat menyebabkan pembusukan dan penurunan kualitas kentang, sementara late blight disebabkan oleh jamur Phytophthora infestans yang dapat menghancurkan tanaman kentang dalam waktu singkat. Dengan mengedit gen-gen tertentu pada kentang, peneliti berhasil meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kedua penyakit ini, mengurangi kerugian yang ditimbulkan oleh infeksi virus dan jamur.

Penerapan CRISPR pada kentang tidak hanya meningkatkan ketahanan terhadap penyakit, tetapi juga memberikan manfaat ekonomi yang besar bagi petani. Dengan tanaman yang lebih tahan terhadap penyakit, penggunaan pestisida dan fungisida dapat dikurangi, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan. Ini juga membantu petani dalam menjaga hasil panen dan mengurangi kerugian yang sering terjadi akibat infeksi

penyakit, serta membuka peluang untuk peningkatan produksi kentang yang lebih stabil dan berkelanjutan di masa depan.

3. Peningkatan Kualitas dan Kandungan Gizi Tanaman

CRISPR dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas gizi tanaman, yang sangat penting dalam mengatasi masalah kekurangan gizi global. Misalnya, dengan mengedit gen tanaman untuk meningkatkan kandungan vitamin atau meningkatkan kualitas protein.

a. Golden Rice

Golden Rice merupakan contoh sukses penerapan teknologi CRISPR untuk meningkatkan kandungan gizi dalam tanaman. Dengan menggunakan CRISPR, ilmuwan berhasil memodifikasi gen-gen pada padi untuk meningkatkan produksi beta-karoten, prekursor vitamin A. Beta-karoten ini kemudian dapat diubah menjadi vitamin A dalam tubuh manusia. Kekurangan vitamin A, terutama di negara-negara berkembang, dapat menyebabkan masalah kesehatan serius, seperti kebutaan dan gangguan sistem imun. Golden Rice diharapkan dapat menjadi solusi untuk masalah gizi yang krusial ini (Bouis, 2013).

Penerapan CRISPR pada Golden Rice memberikan harapan besar dalam meningkatkan kesehatan masyarakat yang bergantung pada padi sebagai makanan pokok. Dengan meningkatkan kandungan vitamin A dalam padi, Golden Rice dapat membantu mengatasi kekurangan gizi tanpa memerlukan perubahan besar dalam pola makan atau produksi pertanian. Proyek ini menunjukkan bagaimana bioteknologi dapat berperan dalam memecahkan masalah kesehatan global yang terkait dengan defisiensi mikronutrien, menjadikannya salah satu inovasi penting dalam bidang pertanian dan kesehatan.

b. Kedelai dengan Protein Lebih Tinggi

Penerapan teknologi CRISPR pada kedelai memungkinkan peningkatan kandungan protein yang lebih tinggi, menjadikannya sumber protein nabati yang lebih bergizi. Dengan mengedit gen-gen yang terlibat dalam biosintesis asam amino, ilmuwan dapat meningkatkan kadar protein dalam biji kedelai. Hal ini sangat bermanfaat untuk meningkatkan kualitas gizi kedelai, yang merupakan salah satu bahan pangan utama di

banyak negara, terutama sebagai pengganti protein hewani (Zhang et al., 2020).

Modifikasi genetik ini memberikan potensi besar dalam memenuhi kebutuhan protein di seluruh dunia, khususnya di negara-negara berkembang, di mana kedelai merupakan sumber protein utama. Dengan meningkatkan kandungan proteinnya, kedelai yang dimodifikasi ini dapat membantu mengurangi masalah kekurangan protein di populasi yang mengandalkan sumber daya alam ini sebagai bagian dari dietnya. Inovasi ini juga membuka jalan bagi pengembangan tanaman lain dengan kualitas gizi yang lebih baik melalui teknologi CRISPR.

D. Etika dan Isu Keamanan dalam Bioteknologi

Bioteknologi pertanian telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir, memberikan solusi untuk berbagai masalah dalam produksi pangan global. Dengan kemajuan teknologi seperti CRISPR/Cas9, rekayasa genetika, dan teknik bioteknologi lainnya, banyak tanaman yang dapat dimodifikasi untuk meningkatkan hasil, ketahanan terhadap penyakit, dan toleransi terhadap kondisi lingkungan yang ekstrem. Meskipun manfaatnya sangat besar, penggunaan bioteknologi dalam pertanian juga menimbulkan berbagai isu etika dan keamanan yang perlu dipertimbangkan dengan hati-hati.

1. Isu Etika dalam Bioteknologi Pertanian

a. Keamanan Genetik dan Dampak Terhadap Keanekaragaman Hayati

Isu etika terkait bioteknologi pertanian, terutama dalam hal keamanan genetik dan dampaknya terhadap keanekaragaman hayati, telah menjadi perdebatan yang cukup serius. Salah satu risiko utama yang sering dikemukakan adalah potensi tanaman hasil rekayasa genetika (GM) untuk menyebar ke alam liar dan berinteraksi dengan tanaman liar atau tanaman sejenis. Jika ini terjadi, ada kemungkinan terbentuknya hibrida yang memiliki sifat lebih agresif atau merugikan. Contohnya, tanaman GM yang lebih tahan terhadap hama atau penyakit bisa menciptakan ketidakseimbangan dalam ekosistem alami. Tanaman-tanaman ini dapat dengan mudah mengalahkan tanaman lokal, yang

berpotensi menyebabkan penurunan keragaman spesies dan mengganggu rantai makanan alami (Tsatsakis et al., 2017).

Meskipun demikian, para pendukung bioteknologi pertanian berpendapat bahwa tanaman GM juga dapat memberikan keuntungan dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Misalnya, tanaman yang lebih tahan terhadap kekeringan atau hama dapat mengurangi kebutuhan akan pestisida dan pupuk kimia yang berlebihan, yang justru dapat merusak tanah dan air. Dalam konteks ini, tanaman GM dapat berfungsi untuk mengurangi kerusakan yang disebabkan oleh pertanian konvensional yang mengandalkan bahan kimia berbahaya. Oleh karena itu, bioteknologi berpotensi mengurangi dampak negatif terhadap keanekaragaman hayati dengan mengurangi ketergantungan pada bahan kimia.

b. Manipulasi Genetik dalam Skala Besar: Masalah Kekuasaan dan Akses

Manipulasi genetik dalam skala besar, terutama terkait dengan tanaman rekayasa genetika, menimbulkan masalah etika yang signifikan terkait dengan distribusi dan kontrol atas teknologi tersebut. Sebagian besar perusahaan besar yang memiliki kapasitas untuk mengembangkan, mematenkan, dan mendistribusikan teknologi ini, seperti tanaman GM, sering kali memonopoli pasar. Akibatnya, petani kecil dan negara-negara berkembang yang tidak memiliki sumber daya untuk membeli teknologi ini menjadi semakin terpinggirkan. Ketergantungan pada perusahaan besar dapat memperburuk ketidaksetaraan sosial dan ekonomi, di mana petani kecil akan kesulitan untuk mengakses benih dan teknologi yang dibutuhkan untuk meningkatkan hasil pertanian. Hal ini berpotensi memperburuk ketergantungan pada bahan baku yang dikendalikan oleh pihak swasta, yang bisa menaikkan harga dan mengurangi ketersediaan produk pertanian.

Paten pada tanaman dan benih GM memunculkan masalah etika mengenai keadilan dan hak atas sumber daya alam. Beberapa pihak berpendapat bahwa mematenkan kehidupan tanaman atau organisme lainnya adalah bentuk pengambilalihan yang tidak adil atas kekayaan alam yang seharusnya dapat diakses oleh semua orang. Patenting ini dapat membatasi akses petani di

negara-negara berkembang terhadap benih berkualitas tinggi dan teknologi yang dibutuhkan untuk meningkatkan hasil pertanian. Dampaknya adalah menurunnya ketahanan pangan global karena hanya segelintir perusahaan besar yang menguasai pasokan benih dan teknologi yang sangat penting.

c. Modifikasi Genetik pada Manusia dan Hewan: Pengaruh Terhadap Keanekaragaman Genetik

Modifikasi genetik, baik pada tanaman maupun hewan, telah membuka banyak potensi dalam bidang bioteknologi, namun hal ini juga menimbulkan perdebatan etis yang mendalam, terutama terkait penerapannya pada manusia dan hewan. Teknologi CRISPR, yang memungkinkan perubahan genetik yang lebih tepat dan efisien, memunculkan kemungkinan besar untuk mengobati penyakit genetik pada manusia. Meskipun demikian, aplikasi teknologi ini pada manusia memicu perdebatan tentang apakah perubahan tersebut dapat diterima secara etis. Bagi sebagian kalangan, pengeditan genetik manusia bisa menjadi solusi untuk mengatasi berbagai penyakit keturunan, seperti fibrosis kistik atau hemofilia, memberikan kehidupan yang lebih baik bagi individu yang terpengaruh oleh kondisi-kondisi tersebut (Doxzen & Halpern, 2020). Namun, hal ini juga menimbulkan kekhawatiran terkait dampak jangka panjang dan perubahan genetik yang dapat diturunkan kepada generasi berikutnya, yang berpotensi mengubah keanekaragaman genetik manusia secara permanen.

Potensi penyalahgunaan teknologi ini juga menjadi sorotan, terutama dalam konteks penciptaan "*designer babies*" atau bayi yang dimodifikasi secara genetik untuk memiliki sifat-sifat tertentu yang diinginkan, seperti kecerdasan atau penampilan fisik. Praktik semacam ini berpotensi meningkatkan ketidaksetaraan sosial, di mana hanya yang memiliki sumber daya yang cukup dapat memilih dan memperbaiki genetik anak, sementara kelompok yang kurang mampu mungkin tidak memiliki akses terhadap teknologi yang sama. Hal ini berisiko menciptakan ketimpangan genetik yang lebih dalam, di mana perbedaan antara individu yang dimodifikasi dan yang tidak dapat memperburuk kesenjangan sosial dan ekonomi.

2. Isu Keamanan dalam Bioteknologi Pertanian

a. Keamanan Pangan dan Pengaruh terhadap Kesehatan Manusia

Salah satu kekhawatiran utama terkait dengan tanaman yang dimodifikasi secara genetik adalah dampaknya terhadap keamanan pangan. Meskipun tanaman rekayasa genetika telah melalui berbagai uji keamanan dan banyak yang dianggap aman oleh badan-badan seperti FDA (*Food and Drug Administration*) dan EFSA (*European Food Safety Authority*), beberapa kalangan masyarakat masih meragukan potensi risiko jangka panjang terhadap kesehatan manusia.

1) Alergi

Isu alergi yang terkait dengan tanaman rekayasa genetika (GM) menjadi perhatian utama dalam diskusi mengenai keamanan pangan. Salah satu contoh yang sering dibahas adalah kemungkinan tanaman kedelai yang dimodifikasi untuk tahan terhadap pestisida dapat mengandung protein atau senyawa baru yang tidak ada dalam kedelai konvensional. Protein baru ini berpotensi menyebabkan reaksi alergi pada individu yang sensitif terhadap zat tersebut. Meskipun tanaman GM telah melalui pengujian yang ketat, masih ada kemungkinan protein baru tersebut dapat memicu reaksi alergi yang tidak terdeteksi sebelumnya.

Pentingnya evaluasi yang cermat terhadap potensi risiko ini memunculkan seruan agar setiap tanaman GM yang dikembangkan untuk konsumsi manusia harus melalui serangkaian uji keamanan yang lebih ketat. Para ilmuwan kini berfokus pada pengujian lebih lanjut untuk memastikan bahwa tanaman GM tidak membawa risiko baru bagi konsumen, terutama bagi yang memiliki riwayat alergi. Dengan teknologi yang terus berkembang, pengawasan dan regulasi yang ketat diharapkan dapat mencegah dampak kesehatan negatif akibat konsumsi tanaman GM.

2) Resistensi terhadap Antibiotik

Kekhawatiran mengenai resistensi antibiotik yang berasal dari tanaman rekayasa genetika muncul karena penggunaan gen resistensi antibiotik sebagai penanda dalam proses modifikasi genetik. Meskipun gen ini seharusnya tidak ada

dalam produk pangan akhir, ada kemungkinan gen tersebut dapat lolos ke lingkungan melalui polusi genetik atau dalam bentuk tanaman yang tidak terkelola dengan baik. Briefs (2017) mengingatkan bahwa apabila gen resistensi antibiotik ini berinteraksi dengan mikroorganisme di tanah atau air, dapat menyebar dan meningkatkan resistensi terhadap antibiotik, yang dapat mempersulit pengobatan penyakit pada manusia.

Ada juga kekhawatiran bahwa penggunaan gen resistensi antibiotik dalam pertanian dapat memperburuk masalah kesehatan global terkait dengan bakteri yang kebal terhadap antibiotik. Jika resistensi ini berkembang di lingkungan pertanian dan kemudian memasuki rantai pangan, potensi risiko terhadap kesehatan manusia akan semakin tinggi. Oleh karena itu, penting untuk mengawasi dan mengatur dengan ketat penggunaan gen resistensi antibiotik dalam bioteknologi pertanian guna mencegah dampak yang tidak diinginkan terhadap kesehatan masyarakat.

b. Penyebaran Genetik yang Tidak Diinginkan

Penyebaran genetik yang tidak terkendali merupakan salah satu isu utama dalam bioteknologi pertanian, yang dapat menimbulkan dampak ekologis yang serius. Tanaman rekayasa genetika (GM) berisiko saling bersilangan dengan tanaman liar atau varietas non-GM, yang pada gilirannya dapat menghasilkan tanaman hibrida yang mengandung gen yang telah dimodifikasi. Gen-gen ini, yang telah diperkenalkan ke dalam tanaman untuk tujuan tertentu seperti ketahanan terhadap pestisida atau penyakit, bisa menyebar ke populasi tanaman liar dan menghasilkan tanaman dengan sifat yang lebih agresif atau bahkan lebih sulit dikendalikan dibandingkan dengan tanaman asli. Dalam jangka panjang, hal ini dapat mengganggu keseimbangan ekosistem dan mengurangi keragaman hayati di alam bebas.

Salah satu risiko terbesar dari penyebaran genetik yang tidak diinginkan adalah munculnya tanaman invasif yang lebih tangguh dari tanaman asli. Tanaman hibrida yang lebih kuat dan tahan terhadap kondisi ekstrem bisa mengancam spesies tanaman lokal yang lebih rentan. Selain itu, penyebaran genetik ini juga

dapat mempengaruhi keberlanjutan pertanian itu sendiri, dengan tanaman yang tidak terkendali dapat menjadi masalah baru bagi petani, baik dari segi pengelolaan maupun dari aspek produksi.

c. Dampak Lingkungan

Dampak lingkungan menjadi perhatian utama dalam penerapan bioteknologi pertanian, terutama ketika tanaman rekayasa genetika (GM) dilepaskan ke alam bebas. Salah satu masalah yang muncul adalah kemungkinan penyebaran sifat tahan herbisida pada tanaman GM ke tanaman non-GM yang berada di sekitarnya. Tanaman GM yang telah dimodifikasi untuk tahan terhadap herbisida memungkinkan petani untuk menggunakan bahan kimia ini dengan lebih bebas tanpa merusak tanaman utama. Namun, penggunaan herbisida yang lebih intensif dapat berisiko mengkontaminasi tanaman liar atau varietas tanaman non-GM di sekitar area pertanian. Hal ini berpotensi mengurangi keanekaragaman hayati karena tanaman liar yang terpapar herbisida dapat menjadi lebih rentan, sementara tanaman GM yang tahan herbisida berkembang lebih pesat.

Penggunaan herbisida yang semakin meningkat pada tanaman GM juga dapat memicu masalah baru di lapangan. Gulma yang sebelumnya tidak terpengaruh oleh herbisida kini dapat menjadi lebih tahan terhadap bahan kimia tersebut, menciptakan kondisi yang dikenal sebagai resistensi herbicida. Gulma yang resisten ini dapat berkembang biak dengan cepat dan menjadi lebih sulit untuk dikendalikan, memperburuk masalah dalam pengelolaan pertanian. Keberadaan gulma yang resisten ini tidak hanya mengganggu hasil panen tetapi juga meningkatkan penggunaan bahan kimia yang lebih kuat, yang pada gilirannya dapat mencemari tanah dan air.

BAB VIII
KEBERLANJUTAN DALAM AGROTEKNOLOGI

Konsep keberlanjutan dalam agroteknologi, yang semakin penting dalam konteks pertanian modern. Keberlanjutan dalam agroteknologi tidak hanya terkait dengan efisiensi dan produktivitas pertanian, tetapi juga mempertimbangkan dampak sosial dan lingkungan dari praktik pertanian. Agroteknologi berkelanjutan bertujuan untuk menciptakan sistem pertanian yang tidak hanya memenuhi kebutuhan pangan masa kini tetapi juga menjaga kualitas sumber daya alam untuk generasi mendatang. Penerapan teknologi yang ramah lingkungan, efisien dalam penggunaan sumber daya, dan berorientasi pada kesejahteraan petani menjadi landasan utama dalam pembangunan pertanian yang berkelanjutan.

Transformasi pertanian berkelanjutan melalui agroteknologi mencakup berbagai inovasi yang mendukung efisiensi penggunaan energi, air, dan bahan kimia dalam produksi pangan. Salah satu tantangan terbesar adalah bagaimana teknologi dapat diintegrasikan dengan prinsip keberlanjutan yang meliputi ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dalam hal ini, agroteknologi menawarkan solusi untuk mengurangi limbah, meningkatkan ketahanan pangan, serta memperbaiki kesejahteraan petani. Selain itu, keberlanjutan dalam agroteknologi tidak hanya mengacu pada penggunaan teknologi yang ramah lingkungan, tetapi juga pada integrasi kebijakan dan regulasi yang mendukung inisiatif ini.

A. Indikator Keberlanjutan dalam Teknologi Pertanian

Keberlanjutan dalam pertanian adalah konsep yang mencakup tiga dimensi utama, yaitu ekonomi, sosial, dan lingkungan. Penerapan

teknologi pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan menjadi kunci dalam meningkatkan produktivitas pertanian tanpa merusak keseimbangan ekosistem atau menguras sumber daya alam. Oleh karena itu, penting untuk memiliki indikator keberlanjutan yang dapat mengukur seberapa efektif teknologi pertanian dalam mencapai tujuan tersebut. Indikator-indikator ini digunakan untuk mengevaluasi dampak teknologi terhadap ketahanan pangan, konservasi sumber daya alam, keadilan sosial, dan pertumbuhan ekonomi. Keberlanjutan dalam teknologi pertanian dapat dianalisis melalui tiga dimensi utama, yang dikenal dengan triple bottom line: lingkungan, ekonomi, dan sosial. Dalam setiap dimensi ini, terdapat indikator-indikator yang spesifik untuk menilai sejauh mana suatu teknologi dapat mendukung pertanian berkelanjutan.

1. Indikator Keberlanjutan Lingkungan

Keberlanjutan lingkungan dalam pertanian berfokus pada pengelolaan sumber daya alam yang efisien dan minimnya dampak negatif terhadap ekosistem. Beberapa indikator utama dalam dimensi ini termasuk:

a. Penggunaan Sumber Daya Alam

Penggunaan sumber daya alam yang efisien merupakan salah satu indikator utama dalam keberlanjutan lingkungan pertanian. Salah satu contoh yang signifikan adalah penggunaan teknologi irigasi tetes, yang memungkinkan penggunaan air secara lebih efisien dan terarah, mengurangi pemborosan dan memastikan bahwa tanaman mendapatkan pasokan air yang cukup. Di daerah yang rawan kekeringan, teknologi ini sangat bermanfaat karena dapat meningkatkan hasil pertanian meskipun dalam kondisi terbatasnya ketersediaan air. Dengan mengoptimalkan penggunaan air, pertanian dapat lebih berkelanjutan dalam jangka panjang tanpa merusak ekosistem sekitar (Kanna et al., 2020).

Pengurangan ketergantungan pada energi fosil juga penting dalam upaya mencapai keberlanjutan pertanian. Salah satu inovasi yang mendukung hal ini adalah penggunaan energi terbarukan, seperti panel surya untuk mengoperasikan pompa air irigasi. Teknologi ini tidak hanya mengurangi emisi karbon, tetapi juga menurunkan biaya energi dalam jangka panjang.

Penggunaan energi terbarukan mendukung pertanian yang lebih ramah lingkungan, mengurangi dampak negatif terhadap perubahan iklim, serta meningkatkan ketahanan sektor pertanian terhadap fluktuasi harga energi fosil.

b. Kualitas Tanah

Kualitas tanah merupakan indikator penting dalam mencapai keberlanjutan pertanian, karena tanah yang sehat mendukung produktivitas jangka panjang. Teknologi yang meningkatkan kualitas tanah, seperti penggunaan pupuk organik, berperan kunci dalam keberlanjutan. Pupuk organik meningkatkan kandungan bahan organik tanah, memperbaiki struktur tanah, dan meningkatkan daya tahan terhadap erosi serta degradasi. Selain itu, penggunaan sistem rotasi tanaman juga dapat menjaga kesuburan tanah dengan meminimalkan risiko penurunan kualitas tanah akibat monoculture. Sistem ini mencegah penurunan kandungan nutrisi tanah dan mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia. Sebaliknya, penggunaan pupuk kimia yang berlebihan dapat merusak kualitas tanah dan menyebabkan pencemaran air tanah. Penggunaan pupuk yang tidak terkendali dapat mengakibatkan akumulasi bahan kimia berbahaya di dalam tanah, yang mengganggu keseimbangan ekosistem tanah dan menurunkan kesuburan dalam jangka panjang.

c. Pengendalian Polusi dan Limbah

Pengelolaan limbah pertanian secara ramah lingkungan adalah salah satu indikator penting dalam keberlanjutan lingkungan. Teknologi seperti biogas yang dihasilkan dari limbah organik tidak hanya membantu mengurangi polusi tetapi juga dapat menghasilkan sumber energi terbarukan yang berguna bagi petani. Selain itu, penggunaan mikroorganisme untuk mengurai limbah organik menjadi kompos atau produk yang lebih bermanfaat dapat mengurangi dampak negatif terhadap tanah dan air, serta meningkatkan kualitas lingkungan secara keseluruhan (Sindhu et al., 2017).

Teknologi untuk mengurangi penggunaan pestisida kimia juga sangat berperan dalam pengendalian polusi pertanian. Penggunaan pestisida berbasis biologi, yang memanfaatkan mikroorganisme atau bahan alami untuk mengendalikan hama,

dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia berbahaya yang dapat mencemari lingkungan dan memengaruhi keanekaragaman hayati.

d. Biodiversitas

Keanekaragaman hayati atau biodiversitas merupakan indikator penting dalam menilai keberlanjutan lingkungan dalam sektor pertanian. Keanekaragaman spesies tanaman dan hewan tidak hanya menjaga keseimbangan ekosistem, tetapi juga meningkatkan ketahanan sistem pertanian terhadap gangguan seperti penyakit, hama, dan perubahan iklim. Teknologi pertanian yang mendukung pelestarian habitat alami serta penggunaan varietas tanaman lokal membantu menjaga keragaman genetik yang sangat berharga untuk adaptasi jangka panjang.

Salah satu pendekatan yang mendukung biodiversitas adalah sistem pertanian polikultur, yaitu praktik menanam beberapa jenis tanaman secara bersamaan dalam satu lahan. Dibandingkan dengan sistem monokultur yang mengandalkan satu jenis tanaman saja, polikultur dapat memperkuat stabilitas ekosistem dan menyediakan tempat tinggal bagi berbagai spesies serangga, burung, dan organisme tanah.

2. Indikator Keberlanjutan Sosial

Keberlanjutan sosial dalam pertanian melibatkan aspek keadilan sosial, akses terhadap teknologi, dan peningkatan kesejahteraan petani. Beberapa indikator yang relevan adalah:

a. Akses terhadap Teknologi

Akses terhadap teknologi merupakan indikator penting dalam keberlanjutan sosial pertanian. Ketika teknologi pertanian, seperti alat pertanian modern, varietas unggul tahan iklim, atau sistem irigasi hemat air, tersedia secara merata dan terjangkau, maka petani kecil dan marginal memiliki peluang yang lebih besar untuk meningkatkan produktivitas serta ketahanan terhadap perubahan cuaca dan fluktuasi pasar. Akses yang inklusif ini juga memperkuat keadilan sosial, mengurangi kesenjangan ekonomi antar petani, serta memungkinkan untuk bersaing dalam rantai pasok yang lebih luas.

Kenyataannya masih banyak tantangan dalam mewujudkan pemerataan akses teknologi, terutama di daerah terpencil yang infrastruktur dan dukungan institusionalnya masih lemah. Oleh karena itu, perlu ada intervensi kebijakan, pelatihan, dan kemitraan antara pemerintah, lembaga riset, serta sektor swasta untuk memastikan bahwa teknologi pertanian tidak hanya dinikmati oleh segelintir pihak saja. Dengan memperluas akses, kita mendorong pembangunan pertanian yang lebih adil, inklusif, dan berkelanjutan secara sosial.

b. Peningkatan Kesejahteraan Petani

Peningkatan kesejahteraan petani menjadi salah satu indikator utama keberlanjutan sosial dalam pertanian. Teknologi yang mampu meningkatkan hasil panen dan efisiensi produksi, seperti benih unggul, sistem pertanian presisi, dan irigasi hemat air, dapat secara langsung menaikkan pendapatan petani. Ketika pendapatan meningkat, petani memiliki daya beli yang lebih besar dan mampu memenuhi kebutuhan dasar seperti pendidikan dan kesehatan, yang pada akhirnya berkontribusi pada pengurangan kemiskinan di komunitas pedesaan (Pretty et al., 2018). Selain aspek ekonomi, teknologi yang memperhatikan aspek kesehatan dan keselamatan kerja juga sangat penting. Inovasi yang mengurangi penggunaan pestisida kimia atau menggantikannya dengan pestisida hayati tidak hanya mengurangi pencemaran lingkungan, tetapi juga mengurangi risiko kesehatan yang dihadapi petani.

c. Pendidikan dan Pelatihan Petani

Pendidikan dan pelatihan bagi petani merupakan elemen penting dalam menunjang keberlanjutan sosial dalam sektor pertanian. Penguasaan teknologi modern saja tidak cukup tanpa pemahaman yang baik tentang penggunaannya. Oleh karena itu, setiap penerapan inovasi pertanian harus dibarengi dengan program pelatihan yang mudah diakses oleh petani. Dengan mengikuti pelatihan, petani dapat memahami cara kerja alat dan teknik baru, sehingga mampu mengoptimalkan produktivitas lahan serta meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan (Davis & Sulaiman, 2014). Selain meningkatkan keterampilan teknis, pendidikan juga memperluas wawasan petani terhadap praktik pertanian berkelanjutan, seperti konservasi tanah,

manajemen air, dan diversifikasi tanaman. Ini memberikan kontribusi pada pengambilan keputusan yang lebih baik dan penggunaan sumber daya yang bijaksana.

3. Indikator Keberlanjutan Ekonomi

Keberlanjutan ekonomi dalam pertanian berkaitan dengan kemampuan teknologi untuk menciptakan sistem pertanian yang dapat bertahan lama dan menguntungkan secara finansial. Beberapa indikator yang digunakan untuk menilai keberlanjutan ekonomi adalah:

a. Produktivitas dan Efisiensi Ekonomi

Produktivitas dan efisiensi ekonomi menjadi indikator utama dalam menilai keberlanjutan ekonomi di sektor pertanian. Teknologi modern seperti sensor tanah dan tanaman memungkinkan deteksi dini terhadap kebutuhan air, pupuk, dan perlindungan tanaman, sehingga penggunaan input dapat disesuaikan secara presisi. Hal ini tidak hanya meningkatkan hasil panen, tetapi juga mengurangi pemborosan sumber daya, menjadikan produksi lebih efisien dan ramah lingkungan (Farooq & Pisante, 2019). Otomatisasi pertanian melalui penggunaan mesin dan drone, serta pemanfaatan *big data* dalam perencanaan dan pemantauan produksi, telah menurunkan biaya operasional secara signifikan. Petani kini dapat mengambil keputusan berbasis data yang akurat, yang berdampak pada peningkatan keuntungan dan stabilitas ekonomi jangka panjang.

b. Ketahanan terhadap Guncangan Ekonomi

Ketahanan terhadap guncangan ekonomi merupakan aspek penting dalam keberlanjutan pertanian. Teknologi pertanian yang mendukung diversifikasi usaha memberikan alternatif sumber pendapatan bagi petani, sehingga tidak terlalu bergantung pada satu jenis komoditas saja. Misalnya, teknologi hidroponik atau aquaponik memungkinkan petani untuk membudidayakan berbagai jenis tanaman bernilai tinggi di lahan terbatas, sementara pemanfaatan teknologi pengolahan hasil pertanian membuka peluang usaha pascapanen yang lebih menguntungkan (Hernández-Mogollón et al., 2011).

Diversifikasi yang difasilitasi oleh teknologi juga membantu petani mengurangi risiko akibat fluktuasi harga pasar atau dampak perubahan iklim yang ekstrem. Dengan memiliki lebih

dari satu sumber penghasilan berbasis pertanian, petani dapat menjaga kestabilan ekonomi rumah tangganya. Pendekatan ini memperkuat daya tahan sistem pertanian terhadap krisis dan menjadikan pertanian lebih adaptif terhadap ketidakpastian ekonomi global maupun lokal.

c. Nilai Tambah dan Inovasi

Nilai tambah dan inovasi merupakan indikator penting dalam keberlanjutan ekonomi di sektor pertanian. Teknologi seperti bioteknologi memungkinkan pengembangan varietas tanaman unggul yang tidak hanya tahan terhadap penyakit dan iklim ekstrem, tetapi juga memiliki kualitas gizi yang lebih baik. Hal ini meningkatkan nilai jual produk pertanian di pasar, baik lokal maupun internasional. Selain itu, inovasi dalam pengemasan, pengolahan hasil pertanian, dan pemanfaatan limbah pertanian juga menciptakan produk turunan yang memiliki nilai ekonomi lebih tinggi (Klerkx et al., 2019).

Sistem pertanian presisi yang mengandalkan teknologi seperti sensor, drone, dan *big data* mampu meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi pemborosan. Dengan mengelola sumber daya secara tepat, petani dapat menekan biaya sekaligus meningkatkan produktivitas. Inovasi ini tidak hanya menciptakan peluang usaha baru di sektor teknologi pertanian, tetapi juga memperkuat daya saing produk pertanian nasional dalam pasar global yang semakin kompetitif.

B. Peran Kebijakan dan Regulasi dalam Mendukung Inovasi

Keberlanjutan dalam agroteknologi tidak hanya bergantung pada pengembangan teknologi itu sendiri, tetapi juga pada kebijakan dan regulasi yang mendukung penerapannya. Kebijakan pemerintah dan regulasi berperan kunci dalam mendorong adopsi teknologi pertanian yang berkelanjutan dan inovatif. Tanpa dukungan yang tepat dari kebijakan dan regulasi, bahkan teknologi yang sangat canggih pun mungkin tidak dapat diimplementasikan secara efektif di lapangan. Oleh karena itu, penting untuk memahami bagaimana kebijakan dan regulasi mempengaruhi inovasi dalam sektor pertanian, khususnya dalam konteks keberlanjutan.

Kebijakan yang mendukung inovasi dalam agroteknologi biasanya mencakup berbagai aspek, seperti riset dan pengembangan, pendanaan untuk petani dan perusahaan agribisnis, serta pengaturan pasar dan standarisasi produk. Beberapa peran kebijakan utama dalam mendukung inovasi agroteknologi adalah sebagai berikut:

1. Riset dan Pengembangan (R&D) dalam Pertanian

Pemerintah berperan penting dalam mendorong riset dan pengembangan di sektor pertanian. Kebijakan yang mendukung R&D, seperti pendanaan untuk penelitian tentang bioteknologi, pertanian presisi, dan pengelolaan sumber daya alam, memungkinkan para ilmuwan dan praktisi untuk mengembangkan teknologi yang dapat meningkatkan efisiensi pertanian dan keberlanjutan. Menurut World Bank (2018), negara-negara yang berinvestasi dalam R&D pertanian dapat melihat peningkatan produktivitas dan pengurangan kerugian akibat faktor-faktor eksternal seperti perubahan iklim. Beberapa kebijakan yang mendukung R&D adalah:

a. Pendanaan untuk Inovasi Teknologi

   Pendanaan untuk riset dan pengembangan (R&D) dalam sektor pertanian berperan penting dalam mendorong inovasi teknologi yang berkelanjutan. Pemerintah dan lembaga donor dapat berkontribusi secara signifikan dengan menyediakan dana untuk penelitian yang bertujuan mengembangkan teknologi ramah lingkungan, seperti pestisida biologis, pupuk organik, dan teknik pengelolaan tanah yang tidak merusak ekosistem. Fokus pada efisiensi irigasi, misalnya melalui sistem irigasi tetes atau pemanenan air hujan, juga dapat didorong melalui dukungan finansial bagi lembaga riset dan universitas.

   Investasi dalam teknologi digital seperti *big data* dan kecerdasan buatan (AI) membuka peluang besar dalam mengoptimalkan hasil pertanian. Analisis data cuaca, kelembapan tanah, dan kebutuhan nutrisi tanaman secara real time memungkinkan petani untuk mengambil keputusan berbasis informasi yang akurat. Dukungan pendanaan untuk sektor ini tidak hanya mempercepat adopsi teknologi modern, tetapi juga memperkuat daya saing pertanian nasional dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim dan pertumbuhan populasi.

b. Kemitraan antara Pemerintah dan Sektor Swasta

Kemitraan antara pemerintah dan sektor swasta dalam riset dan pengembangan pertanian menjadi salah satu strategi penting untuk mendorong inovasi yang aplikatif dan berdampak luas. Melalui kolaborasi ini, perusahaan teknologi dapat berkontribusi dalam menciptakan solusi berbasis data seperti pertanian presisi, sensor tanah, drone pemantau lahan, dan perangkat lunak manajemen tanaman. Sementara itu, pemerintah dapat menyediakan dukungan berupa infrastruktur, regulasi yang kondusif, serta pendanaan awal untuk mengurangi risiko investasi. Sinergi ini mempercepat proses adopsi teknologi modern oleh petani, khususnya di daerah-daerah dengan akses terbatas terhadap informasi dan inovasi.

Contoh nyata dari kemitraan ini adalah pengembangan teknologi berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan kelembapan dan suhu tanah, yang digunakan untuk mengoptimalkan irigasi dan meningkatkan efisiensi produksi. Ketika sektor swasta membawa keunggulan teknologinya dan pemerintah menyediakan jangkauan ke petani melalui program penyuluhan, maka hasilnya adalah ekosistem pertanian yang lebih tangguh, adaptif, dan produktif.

2. Pengelolaan Sumber Daya Alam

Kebijakan yang mendukung pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan sangat penting untuk mendorong keberlanjutan dalam agroteknologi. Pengelolaan air, tanah, dan energi yang efisien akan mendukung penerapan teknologi pertanian yang berkelanjutan. Sebagai contoh, kebijakan yang mendorong penggunaan irigasi hemat air atau energi terbarukan untuk operasional pertanian dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan menjamin ketahanan pangan dalam jangka panjang.

a. Regulasi Pengelolaan Air dan Energi

Regulasi dalam pengelolaan air dan energi menjadi krusial dalam mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Air dan energi adalah dua sumber daya utama yang sering kali mengalami tekanan akibat pertumbuhan sektor pertanian yang pesat. Kebijakan yang membatasi penggunaan air secara berlebihan, seperti pengaturan kuota irigasi atau pemantauan penggunaan air berbasis sensor, dapat membantu mencegah eksploitasi

berlebihan terhadap sumber daya ini. Demikian pula, regulasi dalam penggunaan energi mendorong transisi dari energi fosil ke sumber energi terbarukan, seperti penggunaan panel surya untuk sistem pompa air atau penerangan di area pertanian.

Untuk mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan, pemerintah perlu menyediakan insentif fiskal seperti pengurangan pajak, subsidi, atau akses pembiayaan murah bagi petani yang mengimplementasikan teknologi hemat energi dan air. Irigasi presisi yang berbasis sensor dan otomatisasi, misalnya, mampu meningkatkan efisiensi air hingga 30–50%, dan penggunaannya dapat menjadi syarat untuk memperoleh bantuan pemerintah. Dukungan kebijakan ini tidak hanya menyeimbangkan antara produktivitas pertanian dan konservasi lingkungan, tetapi juga meningkatkan daya saing petani di era perubahan iklim.

b. Pengelolaan Tanah dan Keanekaragaman Hayati

Pengelolaan tanah yang berkelanjutan adalah salah satu aspek vital dalam pertanian berkelanjutan. Kebijakan yang mendorong penggunaan pupuk organik dan teknologi ramah lingkungan, seperti bioteknologi, dapat meningkatkan kesuburan tanah tanpa merusak ekosistem atau mengurangi kualitas tanah. Misalnya, kebijakan yang membatasi penggunaan pupuk kimia berlebihan mendorong petani untuk beralih ke metode pertanian yang lebih alami dan ramah lingkungan, seperti sistem rotasi tanaman dan penggunaan kompos. Praktik-praktik ini berkontribusi pada peningkatan kesehatan tanah dan ketahanan tanah terhadap erosi, yang pada gilirannya meningkatkan produktivitas pertanian dalam jangka panjang.

Kebijakan yang mendukung pelestarian keanekaragaman hayati penting untuk menjaga keseimbangan ekosistem pertanian. Tanpa keanekaragaman hayati yang sehat, pertanian dapat menjadi lebih rentan terhadap serangan hama dan penyakit. Oleh karena itu, kebijakan yang melarang atau membatasi penggunaan pestisida berbahaya dapat mendorong penerapan bioteknologi yang mengurangi ketergantungan pada bahan kimia, sekaligus mempertahankan atau bahkan meningkatkan keanekaragaman spesies yang mendukung ketahanan ekosistem. Hal ini memperkuat prinsip pertanian berkelanjutan yang

mengutamakan keseimbangan antara produktivitas dan konservasi alam.

3. Peningkatan Akses dan Infrastruktur

Kebijakan yang mendukung peningkatan akses terhadap teknologi dan infrastruktur pertanian sangat penting dalam memastikan bahwa inovasi dapat diterapkan secara merata. Akses yang lebih baik terhadap teknologi pertanian, seperti aplikasi mobile untuk pertanian presisi atau platform digital untuk pasar hasil pertanian, dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan. Infrastruktur yang memadai, seperti jalan raya yang baik untuk distribusi hasil pertanian atau pusat-pusat penelitian yang tersebar di daerah-daerah pertanian, juga merupakan bagian dari kebijakan yang penting untuk mendukung inovasi.

a. Penyuluhan dan Pendidikan untuk Petani

   Penyuluhan dan pendidikan bagi petani berperanan penting dalam meningkatkan adopsi teknologi pertanian yang berkelanjutan. Program penyuluhan yang menggunakan teknologi digital, seperti aplikasi mobile dan platform online, memungkinkan petani mendapatkan informasi terbaru secara langsung dan mudah diakses. Hal ini membantu memahami dan menerapkan praktik pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan, seperti teknik irigasi presisi atau pengelolaan tanah yang berkelanjutan. Selain itu, pendidikan ini juga memberikan keterampilan yang dibutuhkan petani untuk memanfaatkan teknologi dalam meningkatkan hasil pertanian, mengurangi biaya, dan menjaga keberlanjutan lingkungan (Davis & Sulaiman, 2014).

   Dengan kebijakan yang mendukung pendidikan dan pelatihan teknologi pertanian, petani di daerah terpencil atau yang kurang akses terhadap informasi juga dapat memperoleh kesempatan yang sama dalam mengadopsi teknologi baru. Program penyuluhan ini dapat mempercepat proses inovasi dalam sektor pertanian dengan meningkatkan keterampilan teknis petani dan mengurangi kesenjangan pengetahuan di lapangan. Melalui pendekatan ini, diharapkan petani dapat lebih mandiri dan siap menghadapi tantangan pertanian masa depan yang semakin kompleks.

b. Infrastruktur Pasar dan Distribusi

Pengembangan infrastruktur pasar dan distribusi yang berbasis digital dapat membantu petani mengakses pasar yang lebih luas dan meningkatkan pendapatan. Platform e-commerce pertanian dan marketplace berbasis digital memungkinkan petani untuk menjual produknya langsung ke konsumen tanpa perantara, yang seringkali mengurangi harga jual yang diterima petani. Selain itu, teknologi ini juga memberi petani kesempatan untuk menjangkau pasar yang sebelumnya sulit dijangkau, baik di tingkat nasional maupun internasional. Hal ini memungkinkan untuk mendapatkan harga yang lebih adil dan meningkatkan daya saing produk pertanian.

Kebijakan yang mendukung pengembangan infrastruktur digital ini tidak hanya meningkatkan efisiensi distribusi tetapi juga mempermudah akses informasi tentang permintaan pasar dan harga yang berlaku. Dengan adanya platform digital, petani dapat lebih cepat beradaptasi dengan tren pasar, serta mengurangi pemborosan dan kerugian yang disebabkan oleh ketidaktepatan dalam penjualan atau distribusi. Ini semua berkontribusi pada keberlanjutan ekonomi pertanian dengan memberikan petani peluang untuk memperbaiki taraf hidup dan meningkatkan daya saing produk lokal.

4. Regulasi dan Standarisasi Produk

Regulasi yang mendukung standarisasi produk pertanian yang inovatif sangat penting untuk menjamin kualitas dan keamanan produk. Selain itu, kebijakan yang mengatur penggunaan teknologi tertentu, seperti bioteknologi atau genetika tanaman, dapat memastikan bahwa teknologi yang digunakan aman bagi konsumen dan tidak membahayakan lingkungan.

a. Regulasi Keamanan Pangan

Regulasi keamanan pangan yang ketat sangat penting untuk memastikan bahwa produk pertanian yang dihasilkan aman untuk dikonsumsi. Kebijakan yang mengatur penggunaan bahan kimia dalam pertanian, seperti pestisida dan pupuk, serta regulasi terkait dengan bioteknologi, dapat mencegah kontaminasi bahan berbahaya dalam produk pangan. Standarisasi yang jelas dan konsisten mengenai penggunaan bahan kimia dan teknik

modifikasi genetik juga membantu memastikan bahwa produk yang beredar di pasar tidak membahayakan kesehatan konsumen, sekaligus memberikan jaminan bahwa produk tersebut memenuhi standar kualitas yang diakui.

Penerapan teknologi pertanian yang ramah lingkungan dan aman dapat meningkatkan reputasi pasar produk pertanian, baik di pasar domestik maupun internasional. Dengan adanya standar yang jelas, konsumen lebih percaya terhadap produk yang dibeli, sementara petani dan produsen dapat mengakses pasar yang lebih luas. Kebijakan semacam ini juga mendorong inovasi berkelanjutan dalam industri pertanian, karena memberikan insentif bagi pengembangan dan penerapan teknologi yang mendukung keberlanjutan dan keselamatan pangan.

b. Kebijakan Penggunaan Bioteknologi

Kebijakan yang ketat mengenai penggunaan bioteknologi dalam pertanian sangat penting untuk memastikan bahwa produk yang dihasilkan aman bagi konsumen dan lingkungan. Regulasi yang mengatur penggunaan organisme hasil rekayasa genetika (GMO) dan teknologi canggih seperti CRISPR, bertujuan untuk menghindari risiko yang mungkin timbul dari potensi dampak negatif terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Dalam banyak negara, prosedur pengujian yang ketat dan persetujuan dari lembaga pengawas diperlukan sebelum produk bioteknologi dipasarkan. Hal ini tidak hanya memberikan jaminan keamanan tetapi juga memperkuat kepercayaan konsumen terhadap produk yang menggunakan teknologi ini (Panesar & Marwaha, 2017).

Kebijakan yang mendukung penelitian bioteknologi dapat mempercepat inovasi dalam sektor pertanian, memberikan solusi untuk tantangan besar seperti ketahanan terhadap perubahan iklim, peningkatan hasil panen, dan pengurangan penggunaan pestisida. Kebijakan ini mendorong pengembangan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap penyakit atau kondisi lingkungan ekstrem, yang pada akhirnya dapat meningkatkan ketahanan pangan global.

C. Edukasi dan Kesadaran Masyarakat tentang Agroteknologi

Agroteknologi adalah elemen kunci dalam pengembangan sektor pertanian yang berkelanjutan, terutama dalam menghadapi tantangan global seperti perubahan iklim, ketahanan pangan, dan degradasi sumber daya alam. Namun, potensi teknologi ini hanya bisa dimanfaatkan secara maksimal jika diiringi dengan tingkat edukasi dan kesadaran masyarakat yang memadai. Edukasi dan peningkatan kesadaran publik menjadi krusial agar masyarakat tidak hanya menjadi pengguna pasif, tetapi juga agen perubahan dalam transformasi sistem pertanian yang lebih cerdas dan berkelanjutan.

Menurut FAO (2021), transformasi digital dan bioteknologi di bidang pertanian harus dilengkapi dengan pendekatan yang inklusif dalam bentuk edukasi publik, pelatihan petani, serta komunikasi risiko yang terbuka dan transparan. Edukasi bukan hanya untuk petani, tetapi juga konsumen, pelaku pasar, pembuat kebijakan, dan generasi muda yang akan menjadi pemimpin pertanian masa depan.

1. Penyuluhan dan Pelatihan Petani

Penyuluhan dan pelatihan petani merupakan pendekatan utama dalam meningkatkan pengetahuan dan keterampilan petani, terutama dalam mengadopsi teknologi pertanian yang lebih modern dan ramah lingkungan. Di daerah pedesaan, penyuluhan yang efektif menggunakan metode partisipatif yang memungkinkan petani untuk terlibat langsung dalam proses belajar dan berbagi pengalaman. Pendekatan berbasis lokal yang memperhatikan kondisi setempat, serta berorientasi pada solusi nyata, sangat penting untuk memastikan keberhasilan program penyuluhan. Hal ini memungkinkan petani untuk memahami dan mengimplementasikan teknologi dengan cara yang relevan dengan kebutuhan.

Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) telah mempermudah penyebarluasan informasi pertanian ke seluruh pelosok, terutama di daerah terpencil. Di Indonesia, aplikasi seperti AgriON, iGrow, e-Smart, serta penggunaan WhatsApp kelompok tani telah terbukti efektif dalam meningkatkan literasi teknologi pertanian di kalangan petani. TIK memungkinkan petani untuk mengakses informasi dengan cepat, seperti prediksi cuaca, harga pasar, dan teknik budidaya terbaru, yang dapat meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Melalui platform digital ini,

petani juga dapat berkonsultasi langsung dengan ahli atau sesama petani mengenai masalah yang dihadapi.

Pelatihan berbasis praktik sangat penting dalam meningkatkan kemampuan teknis petani. Tidak cukup hanya dengan penyuluhan teori semata, karena pelatihan praktis memberikan kesempatan bagi petani untuk belajar melalui pengalaman langsung. Demonstrasi lapangan, kunjungan studi ke lokasi yang sudah sukses menerapkan teknologi baru, serta percontohan alat agroteknologi dapat memberikan gambaran nyata tentang cara mengoperasikan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan melibatkan petani dalam praktek nyata, dapat merasakan langsung manfaat dan tantangan yang mungkin timbul dalam mengadopsi teknologi baru.

2. Kampanye dan Sosialisasi Publik

Kampanye dan sosialisasi publik adalah salah satu cara efektif untuk meningkatkan kesadaran masyarakat tentang pentingnya pertanian berkelanjutan dan inovasi teknologi dalam sektor pertanian. Dalam era digital saat ini, media sosial menjadi alat yang sangat powerful untuk menyebarkan informasi secara luas. Platform seperti Instagram, YouTube, dan TikTok memiliki audiens yang sangat besar, terutama kalangan muda, yang cenderung lebih responsif terhadap konten visual dan interaktif. Kampanye berbasis media sosial yang menampilkan praktik pertanian berkelanjutan, bioteknologi, atau pertanian urban dapat meningkatkan pemahaman dan minat generasi muda untuk terlibat dalam sektor pertanian. Melalui video, infografis, dan tutorial praktis, media sosial mampu menyampaikan pesan yang tidak hanya informatif, tetapi juga menginspirasi (Goswami et al., 2018).

Salah satu keuntungan dari kampanye di media sosial adalah kemampuannya untuk menjangkau audiens yang lebih luas dalam waktu singkat. Dengan menggunakan tagar atau kolaborasi dengan influencer pertanian atau petani muda, pesan tentang teknologi pertanian yang ramah lingkungan atau praktik pertanian berkelanjutan dapat viral dan menjadi perbincangan publik. Ini membuka kesempatan bagi petani untuk berbagi pengalaman dengan audiens yang lebih luas, serta mendapatkan dukungan dari komunitas global yang semakin peduli terhadap isu keberlanjutan dan ketahanan pangan.

Siaran radio komunitas di daerah terpencil juga tetap relevan sebagai alat edukasi. Radio komunitas memiliki jangkauan yang luas dan

dapat dijangkau oleh masyarakat di daerah-daerah rural yang mungkin tidak memiliki akses internet yang stabil atau cepat. Melalui siaran radio, informasi tentang teknik pertanian baru, cara mengelola lahan secara berkelanjutan, serta pentingnya konservasi sumber daya alam dapat disampaikan kepada petani di wilayah yang lebih terpencil. Program-program yang disiarkan dapat berupa wawancara dengan ahli pertanian, kisah sukses petani lokal, serta diskusi tentang isu-isu pertanian yang sedang berkembang.

3. Integrasi Agroteknologi dalam Kurikulum Pendidikan

Integrasi agroteknologi dalam kurikulum pendidikan formal sangat penting untuk mempersiapkan generasi muda menghadapi tantangan global dalam sektor pertanian. Pendidikan formal di sekolah dan perguruan tinggi harus mencakup sains dasar yang mendalam tentang bioteknologi, genetika, serta sistem pertanian modern. Penguasaan konsep-konsep dasar ini sangat penting untuk membekali siswa dan mahasiswa dengan pengetahuan yang diperlukan dalam memahami cara-cara baru dalam meningkatkan produktivitas pertanian dengan memanfaatkan teknologi terbaru. Mengajarkan prinsip-prinsip ini sejak dini dapat mendorong pemahaman yang lebih luas tentang bagaimana inovasi ilmiah dapat meningkatkan ketahanan pangan global dan keberlanjutan pertanian.

Kewirausahaan agribisnis berbasis teknologi menjadi komponen penting dalam pendidikan pertanian yang modern. Pengembangan kemampuan kewirausahaan di kalangan mahasiswa pertanian sangat relevan, mengingat semakin banyak peluang bisnis yang berkembang di sektor ini. Program-program yang mengajarkan mahasiswa untuk tidak hanya menjadi petani tetapi juga pengusaha yang mengintegrasikan teknologi dalam usahanya akan melahirkan petani milenial yang lebih siap untuk menghadapi tantangan pasar yang dinamis. Dengan keterampilan ini, dapat menciptakan bisnis agribisnis yang lebih efisien dan berkelanjutan, serta mendorong inovasi dalam sektor pertanian.

Salah satu hal yang sangat mendukung keberhasilan integrasi agroteknologi dalam kurikulum pendidikan adalah pengenalan inovasi digital dan konsep pertanian 4.0. Pemanfaatan *big data*, kecerdasan buatan (AI), dan sistem informasi geografis (GIS) dalam pengelolaan pertanian dapat memberikan wawasan dan alat yang lebih canggih bagi mahasiswa untuk mengelola pertanian dengan cara yang lebih presisi dan

efisien. Pengajaran tentang teknologi ini harus dimasukkan dalam kurikulum untuk mempersiapkan mahasiswa menghadapi tantangan era digital di sektor pertanian. Mengajarkan mahasiswa untuk menggunakan data dan teknologi terkini juga dapat meningkatkan daya saing di pasar global.

4. Pendidikan Berbasis Komunitas

Pendidikan berbasis komunitas menjadi salah satu pendekatan yang efektif dalam meningkatkan kapasitas petani dan memperkenalkan teknologi pertanian yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Model ini berfokus pada penguatan kapasitas lokal dan pembelajaran berbasis kolaborasi antara petani, masyarakat lokal, dan tenaga ahli. Salah satu bentuk kegiatan pendidikan berbasis komunitas yang populer adalah sekolah lapang, yang memungkinkan petani untuk langsung terlibat dalam proses belajar melalui pengalaman praktis di lapangan. Dalam kegiatan ini, petani tidak hanya belajar tentang teknologi pertanian terbaru, tetapi juga dapat bertukar pengalaman dengan petani lain serta menerima bimbingan langsung dari ahli pertanian dan riset.

Sekolah Lapang Iklim (SLI) yang diluncurkan oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) di Indonesia merupakan contoh nyata dari kolaborasi antara lembaga riset dan petani dalam meningkatkan literasi iklim untuk pertanian. Program ini bertujuan untuk memberikan pengetahuan kepada petani mengenai perubahan iklim dan dampaknya terhadap sektor pertanian, serta cara-cara untuk mengadaptasi praktik pertanian dalam menghadapi kondisi iklim yang berubah. Dengan meningkatkan pemahaman petani tentang pola iklim dan cuaca, program ini membantu petani dalam membuat keputusan yang lebih baik dalam hal penanaman, pemupukan, dan pengelolaan sumber daya alam lainnya.

Kelompok tani dan koperasi digital juga memiliki peran penting dalam memperkuat kapasitas petani melalui pembelajaran bersama. Kelompok tani memungkinkan petani untuk belajar dari satu sama lain, mengembangkan keterampilan praktis, dan berbagi pengetahuan mengenai teknologi baru yang telah diterapkan di lapangan. Di sisi lain, koperasi digital dapat memfasilitasi akses petani terhadap berbagai informasi teknologi pertanian terbaru dan memberikan platform untuk saling bertukar ide serta mencari solusi bersama atas tantangan yang dihadapi.

D. Studi Kasus: Implementasi Agroteknologi Berkelanjutan di Indonesia

Penerapan agroteknologi berkelanjutan di Indonesia merupakan langkah penting dalam menjawab tantangan sektor pertanian nasional, termasuk produktivitas yang rendah, degradasi lingkungan, dan kerentanan terhadap perubahan iklim. Dalam dekade terakhir, berbagai inisiatif telah dilaksanakan oleh pemerintah, swasta, perguruan tinggi, hingga komunitas lokal guna memperkenalkan praktik pertanian cerdas dan ramah lingkungan.

1. Studi Kasus 1: *Smart Farming* di Kabupaten Banyuwangi

Kabupaten Banyuwangi menjadi pelopor dalam penerapan smart farming di Indonesia melalui program "Smart Kampung" yang mengintegrasikan teknologi digital ke dalam sektor pertanian. Program ini memanfaatkan teknologi canggih seperti *Internet of Things* (IoT) untuk memantau kondisi lahan secara real-time, termasuk kelembapan tanah, suhu, dan kebutuhan nutrisi tanaman. Inovasi ini memungkinkan petani mengelola lahan secara lebih efisien dan hemat biaya dengan mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan menghindari pemborosan dalam proses produksi pertanian.

Sebagai pendukung program tersebut, pemerintah daerah meluncurkan aplikasi Android bernama "Petani Smart" yang memberikan informasi penting seperti harga pasar, prakiraan cuaca, dan panduan pengendalian hama. Aplikasi ini membantu petani dalam mengambil keputusan yang lebih tepat dan ramah lingkungan dengan menyesuaikan jadwal tanam dan perawatan tanaman berdasarkan data yang tersedia. Kemudahan akses informasi ini turut meningkatkan peluang petani untuk meraih hasil pertanian yang lebih menguntungkan dan berkelanjutan.

Hasil studi Universitas Brawijaya pada tahun 2020 menunjukkan bahwa penerapan smart farming di Banyuwangi mampu meningkatkan produktivitas lahan hingga 20% dan mengurangi penggunaan air sebanyak 30% berkat sistem irigasi presisi. Pendekatan ini tidak hanya menguntungkan petani dari segi hasil dan efisiensi, tetapi juga mendukung keberlanjutan sektor pertanian dengan konservasi sumber daya alam. Melalui pelatihan dan penyuluhan yang diberikan pemerintah daerah, para petani dapat memanfaatkan teknologi ini secara optimal

untuk menghadapi tantangan pertanian modern seperti perubahan iklim dan fluktuasi harga pasar.

2. Studi Kasus 2: Pertanian Organik Berbasis Komunitas di Bali

Desa Subak Guliang di Gianyar, Bali, merupakan contoh nyata keberhasilan penerapan pertanian berkelanjutan berbasis kearifan lokal melalui sistem Subak yang telah diakui UNESCO sebagai warisan budaya dunia. Sistem ini mengatur pengelolaan air secara kolektif dan adil antar petani, sekaligus menjaga keseimbangan antara kebutuhan produksi dan pelestarian lingkungan. Pendekatan gotong royong dalam pengelolaan sumber daya ini memperkuat nilai-nilai sosial dan budaya lokal, sekaligus mendorong pertanian organik yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Petani di Subak Guliang juga berinovasi dengan bekerja sama bersama universitas dan LSM dalam mengembangkan teknologi ramah lingkungan, seperti pupuk hayati dan pestisida nabati. Penggunaan bahan alami ini tidak hanya menjaga kesuburan tanah dan kualitas air, tetapi juga lebih aman bagi kesehatan manusia dan ekosistem sekitar. Selain berdampak positif terhadap lingkungan, pendekatan ini juga mengurangi biaya produksi, menjadikan pertanian organik sebagai pilihan yang lebih menguntungkan secara ekonomi bagi para petani.

Dari sisi teknologi, Subak Guliang mengadopsi sistem pemantauan irigasi berbasis sensor untuk mengatur kelembapan tanah secara efisien dan menghindari pemborosan air. Di samping itu, penggunaan drone untuk pemetaan lahan memberikan petani gambaran yang lebih akurat mengenai kondisi sawah, sehingga perencanaan tanam dan pengendalian hama dapat dilakukan lebih efektif. Kombinasi antara kearifan lokal dan teknologi modern ini menjadikan Subak Guliang sebagai model ideal pertanian berkelanjutan yang menjaga warisan budaya sekaligus menjawab tantangan pertanian masa kini.

3. Studi Kasus 3: Budidaya Lele dalam Sistem Bioflok di Jawa Barat

Di Jawa Barat, penerapan teknologi budidaya lele berbasis sistem bioflok telah menjadi solusi inovatif untuk mengatasi keterbatasan lahan dan air dalam sektor perikanan. Sistem ini memanfaatkan mikroorganisme dan aerasi untuk mendaur ulang limbah organik menjadi flok, yang berfungsi ganda sebagai pakan tambahan dan

pembersih air. Kabupaten Cianjur dan Bogor menjadi contoh wilayah yang sukses menerapkan teknologi ini, karena mampu mengoptimalkan penggunaan sumber daya terbatas dan meningkatkan efisiensi budidaya ikan di lahan sempit.

Sistem bioflok tidak hanya menjaga kualitas air secara berkelanjutan, tetapi juga membantu menekan biaya operasional dengan mengurangi kebutuhan pergantian air dan pakan tambahan. Untuk mendukung efisiensi lebih lanjut, para petani di Jawa Barat juga memanfaatkan aplikasi eFishery, yang mengotomatiskan pemberian pakan berdasarkan kondisi dan kebutuhan ikan. Dengan bantuan teknologi ini, proses pemeliharaan menjadi lebih terkontrol, hemat tenaga kerja, serta mampu meningkatkan pertumbuhan ikan secara optimal dan terukur di setiap tahap pembesaran.

Menurut data Kementerian Kelautan dan Perikanan (2021), penerapan sistem bioflok mampu meningkatkan produktivitas ikan lele hingga tiga kali lipat dibanding metode konvensional. Selain hasil yang meningkat, teknologi ini juga lebih ramah lingkungan karena menghasilkan limbah minimal dan menghemat air secara signifikan. Kombinasi antara sistem bioflok dan digitalisasi manajemen pakan menjadi model budidaya perikanan modern yang layak diterapkan di wilayah lain, khususnya untuk meningkatkan ketahanan pangan dan keberlanjutan sektor perikanan di masa depan.

4. Studi Kasus 4: Sistem Pertanian Terintegrasi (*Integrated Farming*) di Sleman, Yogyakarta

Di Kabupaten Sleman, Yogyakarta, sistem pertanian terintegrasi (*integrated farming*) yang dikembangkan oleh Dinas Pertanian bersama Universitas Gadjah Mada telah menjadi solusi inovatif dalam meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan lingkungan. Sistem ini menggabungkan sektor pertanian, peternakan, dan perikanan dalam satu ekosistem yang saling mendukung. Limbah dari satu sektor dimanfaatkan sebagai input bagi sektor lain, menciptakan hubungan simbiotik yang meningkatkan efisiensi sumber daya dan pendapatan petani kecil, terutama di tengah tantangan keterbatasan lahan dan kebutuhan produktivitas yang tinggi.

Teknologi biodigester menjadi komponen utama dalam sistem ini, mengolah limbah kotoran ternak menjadi biogas dan pupuk cair. Biogas digunakan sebagai sumber energi terbarukan untuk kebutuhan

rumah tangga dan pertanian, sedangkan pupuk cair dimanfaatkan untuk menyuburkan tanaman secara organik. Selain itu, penerapan pertanian vertikal juga memperkuat efisiensi penggunaan ruang, memungkinkan petani menanam berbagai jenis sayuran dalam lahan sempit, sekaligus mengurangi ketergantungan pada lahan pertanian baru yang semakin terbatas akibat urbanisasi.

Pendekatan *integrated farming* di Sleman tidak hanya memberikan diversifikasi pendapatan melalui kombinasi hasil pertanian, peternakan, dan perikanan, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada satu komoditas dan menurunkan risiko ekonomi petani. Sistem ini terbukti mampu meningkatkan hasil produksi tanpa memperluas lahan, mengurangi emisi karbon melalui pemanfaatan biogas, serta menjaga kesuburan tanah dengan pupuk organik. Keberhasilan Sleman menjadi bukti bahwa pertanian terintegrasi adalah solusi strategis untuk ketahanan pangan, keberlanjutan lingkungan, dan peningkatan kesejahteraan petani secara berkelanjutan.

5. Studi Kasus 5: Pertanian Presisi Padi di Karawang

Karawang, sebagai salah satu lumbung padi utama di Indonesia, menjadi lokasi strategis dalam penerapan program pertanian presisi yang dikembangkan oleh Balitbangtan bersama PT Pupuk Indonesia. Program ini mengintegrasikan teknologi drone mapping untuk melakukan pemetaan lahan secara akurat, sehingga petani dapat memahami kondisi tanah, kelembapan, dan topografi lahan secara lebih detail. Informasi ini menjadi dasar penting dalam perencanaan budidaya padi, memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat dan efisien dalam pengelolaan lahan dan tanaman.

Teknologi pendukung lain yang diterapkan adalah aplikasi SiPinter (Sistem Informasi Pemupukan Terpadu), yang memberikan rekomendasi pemupukan berdasarkan data tanah hasil pemetaan. Dengan pendekatan berbasis data ini, petani dapat melakukan pemupukan secara lebih tepat sasaran, mengurangi penggunaan pupuk berlebihan, dan sekaligus menekan biaya produksi. Selain itu, integrasi dengan sistem informasi cuaca dari BMKG memungkinkan petani untuk menentukan waktu tanam, pemupukan, dan pengairan secara lebih optimal, meminimalkan risiko gagal panen akibat cuaca yang tidak menentu.

Penerapan teknologi pertanian presisi di Karawang menunjukkan hasil yang signifikan, dengan peningkatan produktivitas padi hingga hampir 34% dan pengurangan penggunaan pupuk sebesar 20%. Keberhasilan ini menegaskan bahwa inovasi berbasis teknologi dapat secara nyata meningkatkan efisiensi dan kesejahteraan petani, sekaligus menjaga kelestarian lingkungan. Studi kasus Karawang dapat menjadi model bagi daerah lain di Indonesia dalam mengadopsi teknologi digital di sektor pertanian, sebagai langkah konkret menuju pertanian yang modern, berkelanjutan, dan berdaya saing tinggi.

BAB IX
PROSPEK MASA DEPAN AGROTEKNOLOGI

Prospek masa depan agroteknologi, sebuah topik yang semakin relevan di tengah tantangan global dalam sektor pertanian. Agroteknologi tidak hanya mencakup inovasi dalam bidang teknik pertanian, tetapi juga teknologi yang mendukung keberlanjutan dan ketahanan pangan. Dengan terus berkembangnya teknologi, sektor pertanian diperkirakan akan mengalami transformasi besar yang dapat meningkatkan efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan terhadap perubahan iklim.

Masa depan agroteknologi sangat terkait dengan kemampuan teknologi untuk mengatasi tantangan besar dalam pertanian, seperti keterbatasan sumber daya alam, perubahan iklim, dan kebutuhan pangan yang terus meningkat. Teknologi-teknologi inovatif, seperti drone untuk pemantauan, sistem pertanian presisi, dan penggunaan energi terbarukan dalam pertanian, berpotensi besar dalam menciptakan sistem pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Kemajuan ini tidak hanya bermanfaat untuk produktivitas, tetapi juga bagi keberlanjutan pertanian dalam jangka panjang.

A. Tren Teknologi Pertanian di Era Society 5.0

Society 5.0 merupakan konsep masyarakat masa depan yang pertama kali diperkenalkan oleh pemerintah Jepang. Dalam konsep ini, teknologi digital seperti *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), *big data*, dan robotik berperan aktif dalam menyelesaikan masalah sosial, termasuk tantangan dalam sektor pertanian. Society 5.0 melampaui Revolusi Industri 4.0 karena mengintegrasikan inovasi teknologi dengan nilai-nilai humanistik untuk mencapai masyarakat

berkelanjutan dan inklusif (Hitachi-UTokyo Laboratory, 2020). Dalam konteks pertanian, Society 5.0 mendorong digitalisasi penuh ekosistem pangan: mulai dari produksi, pengolahan, distribusi, hingga konsumsi. Tren ini membuka prospek baru bagi agroteknologi untuk menjawab tantangan populasi global yang meningkat, perubahan iklim, degradasi lahan, dan permintaan pangan yang semakin kompleks.

1. *Internet of Things* (IoT) dan Sensor Pertanian

Internet of Things (IoT) dalam pertanian, yang sering disebut sebagai *smart farming*, adalah salah satu inovasi teknologi yang memungkinkan petani untuk mengontrol dan memonitor kondisi lahan secara real-time. Dengan menggunakan perangkat sensor yang dipasang di tanah dan udara, IoT dapat memberikan data yang sangat akurat mengenai berbagai parameter penting dalam pertanian, seperti tingkat kelembapan, suhu, pH tanah, serta kebutuhan pupuk. Data ini kemudian dikirim ke perangkat mobile atau dashboard berbasis cloud, yang memungkinkan petani untuk mengambil keputusan yang lebih tepat dan tepat waktu, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan lahan pertanian.

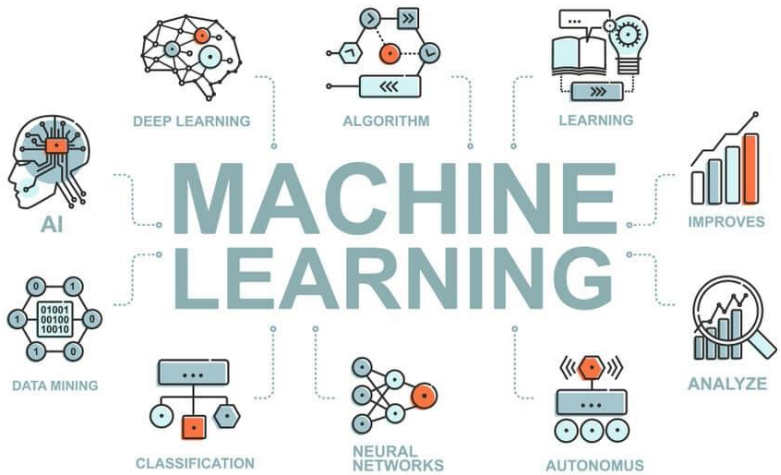
Di Indonesia, proyek percontohan penerapan IoT dalam pertanian telah berhasil dilaksanakan di beberapa daerah, seperti Banyuwangi dan Sleman. Di Banyuwangi, program Smart Kampung menggunakan teknologi IoT untuk memantau kondisi irigasi dan tanaman secara presisi. Hal ini telah terbukti meningkatkan efisiensi penggunaan air dan memperbaiki manajemen pertanian secara keseluruhan. Demikian pula, di Sleman, teknologi IoT digunakan untuk memonitor kelembapan tanah dan cuaca, yang membantu petani dalam menentukan waktu tanam yang optimal dan mengurangi risiko kerugian akibat faktor cuaca yang tidak terduga.

Dengan keberhasilan yang telah terbukti di berbagai daerah, penerapan IoT dalam pertanian diharapkan dapat diperluas ke lebih banyak wilayah di Indonesia. Teknologi ini tidak hanya menawarkan solusi efisiensi, tetapi juga membuka jalan bagi pertanian yang lebih berkelanjutan. Ke depan, adopsi teknologi seperti IoT dapat membantu Indonesia mencapai ketahanan pangan yang lebih baik, mengurangi pemborosan sumber daya alam, dan meningkatkan kesejahteraan petani melalui peningkatan hasil pertanian yang lebih stabil dan menguntungkan.

2. Kecerdasan Buatan (AI) dan Pembelajaran Mesin

Kecerdasan Buatan (AI) dan pembelajaran mesin (*machine learning*) semakin diterapkan dalam sektor pertanian untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas. AI memiliki kemampuan untuk memproses data besar yang diperoleh dari berbagai sumber, seperti sensor tanah, satelit, dan perangkat IoT, untuk memprediksi cuaca, mendeteksi penyakit tanaman, serta menganalisis pola pertumbuhan tanaman. Teknologi ini memungkinkan petani untuk membuat keputusan yang lebih akurat mengenai waktu tanam, pengelolaan irigasi, serta waktu panen, berdasarkan data yang lebih tepat dan terperinci.

Gambar 5. *Machine Learning*



Sumber: *Codepolitan*

Salah satu aplikasi utama AI dalam pertanian adalah kemampuannya dalam mendeteksi hama dan penyakit tanaman lebih awal. Dengan memanfaatkan data satelit dan sensor yang terhubung dengan teknologi AI, petani dapat mengidentifikasi potensi ancaman hama atau penyakit sebelum menyebar luas. Misalnya, sistem berbasis AI dapat mengidentifikasi pola suhu dan kelembapan yang mendukung perkembangan hama, serta menganalisis gambar atau citra dari tanaman untuk mendeteksi gejala penyakit secara dini. Hal ini memungkinkan tindakan pencegahan yang lebih cepat, mengurangi kerugian hasil pertanian.

Penggunaan AI dalam pertanian dapat secara signifikan meningkatkan ketepatan pengambilan keputusan petani, mengurangi

kerugian yang disebabkan oleh kesalahan manajemen, dan meningkatkan hasil pertanian. Dengan AI, petani tidak hanya mendapatkan informasi yang lebih cepat dan akurat, tetapi juga dapat merespons masalah yang muncul dengan cara yang lebih terukur dan efisien. Teknologi ini juga dapat mengotomatisasi beberapa proses, seperti pengaturan irigasi dan pemupukan, yang sebelumnya memerlukan keputusan manual berdasarkan pengalaman.

3. *Big Data Analytics*

Big data analytics berperan kunci dalam revolusi pertanian modern, terutama dalam kerangka Society 5.0, yang mengedepankan integrasi teknologi dengan kehidupan sehari-hari. Dalam konteks pertanian, *big data* mengacu pada pengumpulan dan analisis data besar yang berasal dari berbagai sumber, seperti sensor, drone, satelit, serta data pasar. Data ini mencakup informasi tentang cuaca, kondisi tanah, pola pertumbuhan tanaman, dan bahkan tren harga pasar. Dengan kapasitas pemrosesan data yang besar, *big data* memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan lebih tepat, baik oleh petani, perusahaan pertanian, maupun pemerintah.

Salah satu manfaat utama *big data* dalam pertanian adalah kemampuannya untuk meramalkan tren permintaan pangan dan pergerakan harga pasar. Dengan menganalisis data historis dan pola yang ada, *big data* dapat memberikan prediksi yang lebih akurat mengenai kapan dan di mana permintaan produk pertanian akan meningkat. Hal ini sangat penting bagi petani untuk menentukan strategi tanam dan produksi yang tepat, menghindari surplus atau kekurangan pasokan, serta mengoptimalkan harga jual produk.

Big data juga mendukung perencanaan tanam berbasis cuaca, yang memungkinkan petani untuk menyesuaikan waktu tanam dan jenis tanaman yang dipilih berdasarkan prediksi cuaca yang lebih akurat. Ini membantu meminimalkan risiko kerugian akibat cuaca ekstrem, seperti kekeringan atau banjir, yang dapat mempengaruhi hasil pertanian secara signifikan. Dengan menggunakan data dari satelit dan sensor yang terus diperbarui, sistem *big data* dapat memberikan rekomendasi personalisasi yang lebih sesuai dengan kondisi lokal dan kebutuhan spesifik petani.

4. Teknologi Drone dan Satelit

Teknologi drone dan satelit menjadi bagian penting dalam modernisasi sektor pertanian, khususnya dalam mendukung praktik pertanian presisi. Drone berperan sebagai alat pemantauan dan analisis lahan yang efisien dan akurat. Dilengkapi dengan kamera multispektral dan inframerah, drone dapat mendeteksi kondisi tanaman secara detail, termasuk identifikasi dini terhadap serangan hama, kekurangan nutrisi, atau stres akibat kekeringan. Informasi visual ini sangat berguna untuk menentukan intervensi tepat waktu tanpa harus melakukan inspeksi manual di seluruh area pertanian.

Drone juga dimanfaatkan untuk pemetaan lahan dan penyemprotan pestisida atau pupuk cair secara presisi. Penggunaan drone dalam proses ini bukan hanya meningkatkan efisiensi kerja, tetapi juga mengurangi paparan bahan kimia terhadap manusia serta mengoptimalkan jumlah input yang digunakan. Di sisi lain, teknologi satelit menawarkan cakupan data yang lebih luas dan periodik, terutama terkait iklim, vegetasi, dan kelembapan tanah. Data ini penting untuk analisis perubahan musim, prediksi cuaca ekstrem, serta mitigasi risiko bencana seperti banjir atau kekeringan. Dalam konteks perubahan iklim, citra satelit membantu pemerintah dan lembaga pertanian merancang kebijakan adaptasi berbasis data dan pemetaan zona rawan bencana secara real-time.

5. Robot Pertanian (AgriBots)

Robot pertanian atau AgriBots merupakan inovasi penting dalam otomasi sektor pertanian yang dirancang untuk menangani berbagai tugas seperti penanaman, pemupukan, penyemprotan pestisida, hingga pemanenan secara otomatis. Teknologi ini menjadi solusi strategis terhadap menurunnya jumlah tenaga kerja pertanian akibat urbanisasi, migrasi ke sektor industri, dan bertambahnya usia petani. Dengan kemampuan bekerja tanpa henti dan presisi tinggi, robot pertanian memungkinkan peningkatan efisiensi dan produktivitas, terutama dalam skala industri dan pertanian intensif seperti hortikultura.

AgriBots dilengkapi dengan sistem navigasi otomatis, sensor kamera, serta perangkat lunak berbasis kecerdasan buatan yang memungkinkan untuk mengenali kondisi tanaman, menghindari rintangan, dan menyesuaikan perlakuan sesuai kebutuhan tanaman secara individual. Hal ini menjadikan proses pertanian lebih terukur dan

minim kesalahan. Misalnya, robot pemetik buah dapat menentukan tingkat kematangan buah berdasarkan warna dan ukuran, sehingga hanya buah yang siap panen yang diambil, mengurangi kerusakan hasil panen.

Di Indonesia, penggunaan robot pertanian masih dalam tahap awal, namun potensinya sangat besar terutama untuk komoditas bernilai tinggi seperti sayuran dan buah-buahan. Dukungan riset, pelatihan teknis, serta insentif kebijakan diperlukan agar petani kecil dan menengah dapat mengakses teknologi ini. Kolaborasi antara perguruan tinggi, swasta, dan pemerintah menjadi kunci untuk mempercepat transformasi menuju pertanian modern berbasis otomasi yang tangguh, efisien, dan adaptif terhadap tantangan masa depan.

B. Tantangan dan Peluang di Sektor Pertanian Modern

Sektor pertanian menghadapi dinamika luar biasa di era modern. Globalisasi, perubahan iklim, pertumbuhan populasi, dan perkembangan teknologi menciptakan tantangan sekaligus peluang yang sangat besar. Inovasi agroteknologi mulai dari *Internet of Things* (IoT), *Artificial Intelligence* (AI), bioteknologi, hingga pertanian presisi merupakan jawaban terhadap tantangan ketahanan pangan dan keberlanjutan lingkungan. Namun, adopsi teknologi ini dihadapkan pada hambatan struktural, sosial, dan kebijakan.

1. Tantangan di Sektor Pertanian Modern

a. Perubahan Iklim

Perubahan iklim telah menjadi tantangan utama dalam sektor pertanian modern, karena mempengaruhi seluruh siklus produksi tanaman dan ternak. Fenomena seperti peningkatan suhu global, curah hujan yang tidak menentu, dan meningkatnya frekuensi bencana alam seperti banjir dan kekeringan berdampak langsung pada produktivitas lahan. Menurut Wheeler dan von Braun (2013), perubahan iklim berkontribusi terhadap kerentanan sistem pangan global, terutama di negara-negara berkembang yang sangat bergantung pada pertanian tradisional dan curah hujan alami. Tanaman menjadi lebih rentan terhadap serangan hama dan penyakit, serta mengalami penurunan kualitas dan kuantitas hasil.

Di Indonesia, dampak perubahan iklim sangat nyata, terutama saat terjadi El Niño. Badan Pusat Statistik (2022) melaporkan bahwa gangguan pola musim tanam akibat El Niño menyebabkan penurunan produksi padi sebesar 10–15% di beberapa wilayah utama. Hal ini tidak hanya mengancam ketahanan pangan nasional, tetapi juga merugikan petani secara ekonomi. Adaptasi teknologi pertanian tahan iklim, seperti varietas unggul, sistem irigasi hemat air, dan peringatan dini cuaca, sangat diperlukan untuk menghadapi tantangan ini secara berkelanjutan.

b. Degradasi Lahan dan Sumber Daya Alam

Degradasi lahan merupakan salah satu tantangan serius dalam pertanian modern yang berdampak langsung pada produktivitas jangka panjang. Praktik intensifikasi pertanian yang berlebihan, seperti penggunaan pupuk dan pestisida kimia secara masif serta pengolahan tanah yang tidak berkelanjutan, mempercepat penurunan kualitas tanah. Tanah yang semula subur menjadi keras, miskin unsur hara, dan kehilangan kemampuan menyimpan air. Foley et al. (2011) menegaskan bahwa eksploitasi sumber daya alam tanpa mempertimbangkan daya dukung ekosistem mempercepat kerusakan lingkungan, termasuk pencemaran air tanah akibat limbah kimia pertanian.

Laporan FAO (2019) mencatat bahwa sekitar 33% lahan subur global telah mengalami degradasi sedang hingga parah, sebuah angka yang mencemaskan karena menyangkut masa depan produksi pangan dunia. Di negara-negara agraris seperti Indonesia, praktik pembakaran lahan, deforestasi, dan alih fungsi tanah pertanian memperparah kondisi ini. Untuk mengatasi tantangan tersebut, dibutuhkan adopsi sistem pertanian berkelanjutan seperti agroforestry, penggunaan pupuk organik, serta teknologi konservasi tanah dan air.

c. Keterbatasan Akses Teknologi oleh Petani Kecil

Keterbatasan akses terhadap teknologi merupakan tantangan besar bagi petani kecil di negara berkembang, termasuk Indonesia. Sebagian besar petani masih mengandalkan metode tradisional karena keterbatasan modal, pendidikan, serta infrastruktur digital. Kurangnya akses ke alat pertanian modern, sistem irigasi cerdas, dan informasi pasar yang relevan membuat produktivitas petani kecil tertinggal jauh dibandingkan pertanian

berbasis teknologi. Hal ini berdampak langsung pada efisiensi produksi, kualitas hasil pertanian, dan daya saing petani di pasar. Kesenjangan digital semakin memperlebar jurang antara petani kecil dan sistem pertanian modern. Meskipun teknologi seperti aplikasi pertanian berbasis Android, drone, dan sensor tanah telah tersedia, pemanfaatannya masih rendah di kalangan petani kecil karena kurangnya pelatihan teknis dan dukungan institusi lokal. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan intervensi pemerintah dan sektor swasta dalam bentuk subsidi teknologi, pelatihan lapangan, serta penyediaan infrastruktur digital yang merata hingga ke pedesaan.

d. Fragmentasi Rantai Pasok

Fragmentasi rantai pasok pertanian merupakan tantangan utama dalam sistem agribisnis modern, terutama di negara berkembang. Rantai distribusi yang panjang, melibatkan banyak perantara, dan tidak terdigitalisasi sering kali membuat petani hanya memperoleh sebagian kecil dari nilai akhir produk. Akibatnya, meskipun harga di tingkat konsumen tinggi, petani tetap berada dalam posisi lemah secara ekonomi. Selain itu, proses logistik yang tidak efisien juga menyebabkan pemborosan hasil panen, keterlambatan distribusi, dan fluktuasi harga yang merugikan produsen maupun konsumen (Joshi et al., 2023).

Kurangnya integrasi data dalam sistem rantai pasok menyebabkan minimnya transparansi dan kendali mutu produk pertanian. Petani, pengumpul, pedagang, hingga distributor bekerja secara terpisah tanpa sistem informasi yang saling terhubung, sehingga sulit dilakukan pelacakan asal produk (*traceability*) dan pengendalian kualitas.

e. Ketergantungan pada Input Eksternal

Ketergantungan pada input eksternal seperti pupuk kimia, pestisida sintetis, dan benih hibrida merupakan ciri utama sistem pertanian modern yang menimbulkan banyak konsekuensi jangka panjang. Meskipun penggunaan input ini dapat meningkatkan hasil panen dalam jangka pendek, namun ketergantungan yang berlebihan membuat sistem pertanian menjadi tidak berkelanjutan. Ketika harga input tersebut melonjak di pasar global, petani kecil menjadi kelompok paling

rentan karena biaya produksi meningkat tajam sementara harga jual hasil pertanian sering tidak sebanding.

Penggunaan input kimia secara terus-menerus merusak kesuburan tanah, mengurangi keanekaragaman hayati, dan mencemari sumber daya air. Menurut Altieri & Nicholls (2017), sistem ini juga melemahkan kemampuan petani untuk mengembangkan praktik pertanian lokal yang lebih ramah lingkungan dan berbasis agroekologi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang mendorong kemandirian petani melalui diversifikasi input lokal, pupuk organik, dan teknologi pertanian berkelanjutan.

f. Regulasi dan Kebijakan yang Belum Mendukung

Salah satu tantangan utama dalam modernisasi pertanian adalah regulasi dan kebijakan pemerintah yang belum adaptif terhadap perkembangan teknologi. Banyak kebijakan yang dibuat masih bersifat konvensional dan belum mendukung adopsi inovasi digital seperti bioteknologi, kecerdasan buatan, atau sistem pertanian presisi. Proses perizinan yang lambat, birokrasi yang berbelit, serta kurangnya koordinasi antar-lembaga sering kali menjadi penghambat utama dalam penerapan teknologi baru di sektor pertanian.

Sebagai contoh, penggunaan teknologi genetik seperti tanaman hasil rekayasa genetika (GMO) sering kali terhambat oleh isu etika, keterbatasan regulasi yang jelas, dan kekhawatiran publik yang tidak berdasarkan bukti ilmiah. Padahal, teknologi ini berpotensi meningkatkan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim dan penyakit. Kurangnya dukungan kebijakan ini juga menciptakan ketimpangan antara negara yang cepat mengadopsi inovasi dan negara berkembang yang tertinggal. Diperlukan regulasi yang progresif, akuntabel, dan berbasis sains untuk mendorong inovasi pertanian yang inklusif dan berkelanjutan.

2. Peluang di Sektor Pertanian Modern

a. Adopsi Teknologi Digital dan IoT

Adopsi teknologi digital dan *Internet of Things* (IoT) di sektor pertanian menghadirkan peluang besar untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Melalui sensor yang terpasang di tanah atau tanaman, petani dapat memantau kelembaban, suhu,

tingkat pH, dan kandungan nutrisi secara real time. Data ini memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih tepat, seperti waktu penyiraman, jenis pupuk yang dibutuhkan, serta langkah pengendalian hama dan penyakit. Hal ini tidak hanya menghemat input produksi tetapi juga meningkatkan kualitas hasil panen secara signifikan.

Menurut Liakos et al. (2018), penerapan teknologi presisi berbasis IoT dapat menurunkan biaya produksi sekaligus meningkatkan hasil panen secara berkelanjutan. McKinsey (2020) juga memperkirakan bahwa transformasi digital di sektor pertanian berpotensi meningkatkan produktivitas hingga 67%. Di Indonesia, beberapa daerah seperti Banyuwangi dan Sleman telah menjadi contoh sukses penerapan IoT dalam praktik pertanian, memberikan harapan bagi perluasan teknologi ini ke skala nasional.

b. Pemanfaatan Kecerdasan Buatan (AI)

Pemanfaatan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*/AI) di sektor pertanian membuka peluang besar dalam meningkatkan presisi, efisiensi, dan ketepatan pengambilan keputusan. AI mampu mengolah data dalam jumlah besar dari berbagai sumber, seperti sensor, drone, dan citra satelit, untuk memberikan rekomendasi terkait pola tanam, jadwal irigasi, hingga pendeteksian dini terhadap serangan hama dan penyakit tanaman. Platform berbasis AI seperti Plantix dan PEAT telah digunakan secara luas untuk membantu petani mendiagnosis penyakit tanaman melalui foto yang diunggah dari ponsel cerdas, memberikan solusi cepat dan berbasis data.

Studi oleh Kamilaris et al. (2017) menunjukkan bahwa integrasi AI dalam pertanian tidak hanya mempercepat respons terhadap tantangan lapangan, tetapi juga membantu mengoptimalkan penggunaan input pertanian seperti pupuk dan pestisida secara lebih hemat dan ramah lingkungan. Di negara berkembang, teknologi ini juga dapat menjembatani kesenjangan pengetahuan petani kecil dengan menyediakan informasi berbasis algoritma yang mudah diakses.

c. Teknologi Pertanian Vertikal dan Urban Farming

Teknologi pertanian vertikal merupakan solusi inovatif untuk menghadapi keterbatasan lahan di daerah perkotaan. Dengan

menggunakan sistem hidroponik dan teknologi LED, tanaman dapat ditanam secara bertingkat di ruang terbatas, memungkinkan produksi pangan di lingkungan urban yang padat penduduk. Model pertanian ini mengurangi ketergantungan pada lahan pertanian luas, menghemat air, dan mengoptimalkan penggunaan energi. Selain itu, teknologi ini mengurangi kebutuhan akan pestisida dan herbisida, menjadikannya pilihan yang lebih ramah lingkungan.

Pada konteks urban farming, pertanian vertikal juga mengurangi jejak karbon dengan meminimalkan jarak distribusi antara tempat produksi dan konsumsi. Dengan demikian, pangan dapat diproduksi lebih dekat dengan konsumen, mengurangi kebutuhan transportasi yang berkontribusi terhadap emisi gas rumah kaca. Beacham et al. (2019) menyebutkan bahwa teknologi ini memberikan peluang bagi masyarakat kota untuk terlibat dalam pertanian dan memanfaatkan ruang terbatas secara efisien.

d. Bioteknologi untuk Tanaman Tahan Iklim

Bioteknologi berperan penting dalam pengembangan varietas tanaman yang lebih tangguh terhadap perubahan iklim. Dengan menggunakan teknologi seperti CRISPR-Cas9, para ilmuwan dapat melakukan penyuntingan gen dengan tingkat presisi yang tinggi, memungkinkan penciptaan tanaman yang lebih tahan terhadap kekeringan, banjir, atau serangan hama. Inovasi ini membuka peluang untuk menciptakan varietas tanaman yang lebih adaptif terhadap kondisi iklim ekstrem yang semakin sering terjadi, seperti yang disebabkan oleh perubahan iklim global.

Dengan pemuliaan tanaman yang berbasis bioteknologi, petani dapat memperoleh bibit unggul yang tidak hanya meningkatkan hasil panen, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada input eksternal seperti pestisida dan pupuk kimia. Bioteknologi ini dapat mempercepat proses pemuliaan tanaman, memberikan solusi jangka panjang dalam menghadapi tantangan ketahanan pangan, serta memitigasi dampak negatif yang ditimbulkan oleh perubahan iklim.

e. Energi Terbarukan di Pertanian

Penerapan energi terbarukan, seperti energi surya dan biogas, semakin populer di sektor pertanian sebagai upaya untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan

mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Salah satu contoh implementasi yang berhasil adalah di Banyuwangi, di mana petani memanfaatkan panel surya untuk sistem irigasi otomatis. Penggunaan energi surya memungkinkan petani untuk mengoperasikan sistem irigasi tanpa memerlukan sumber daya listrik konvensional, yang tidak hanya mengurangi biaya operasional, tetapi juga memperbaiki efisiensi penggunaan air. Penggunaan biogas sebagai sumber energi juga semakin banyak diterapkan di beberapa daerah. Biogas yang dihasilkan dari limbah pertanian atau peternakan dapat dimanfaatkan untuk menggantikan penggunaan bahan bakar fosil dalam pengolahan atau pemanasan, serta mengurangi emisi gas rumah kaca.

f. Sistem Informasi Pasar Digital

Sistem informasi pasar digital telah membuka peluang besar bagi petani untuk mengakses pasar yang lebih luas dan mengoptimalkan pemasaran produk. Platform digital seperti TaniHub, iGrow, dan Sayurbox memungkinkan petani untuk langsung menjual hasil pertanian kepada konsumen atau pengecer, tanpa harus melalui perantara seperti tengkulak. Hal ini secara signifikan mengurangi biaya distribusi dan meningkatkan pendapatan petani dengan memberikan harga yang lebih adil dan transparan.

E-commerce pertanian ini juga memberikan keuntungan dalam hal efisiensi logistik dan pemasaran. Dengan adanya platform digital, petani dapat memanfaatkan teknologi untuk memantau tren pasar, mengelola stok, dan mengatur pengiriman produk dengan lebih mudah. Digitalisasi pasar pertanian dapat mempercepat aliran informasi, meningkatkan daya saing petani, serta memungkinkan untuk memperoleh harga yang lebih baik bagi produk.

g. Dukungan Kebijakan Nasional dan Global

Pemerintah Indonesia telah menunjukkan komitmennya untuk memperkuat modernisasi sektor pertanian melalui program-program strategis seperti Program Food Estate dan revitalisasi penyuluhan pertanian. Program Food Estate bertujuan untuk meningkatkan kapasitas produksi pangan di lahan-lahan kritis, sementara penyuluhan pertanian yang lebih modern diharapkan dapat memberikan pengetahuan dan keterampilan kepada petani

untuk mengadopsi teknologi pertanian terbaru. Upaya ini diharapkan dapat meningkatkan produktivitas, ketahanan pangan, dan kesejahteraan petani di seluruh Indonesia.

Di tingkat global, Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) memberikan kerangka kerja yang jelas untuk memastikan keberlanjutan dalam sektor pertanian. Salah satu fokus utama SDGs adalah mencapai ketahanan pangan yang berkelanjutan, meningkatkan produktivitas pertanian, serta menjaga keberlanjutan lingkungan. SDGs menyediakan landasan bagi kebijakan internasional yang mendorong adopsi teknologi ramah lingkungan, pengurangan kemiskinan, dan peningkatan kesejahteraan petani secara global (Sachs, 2022). Integrasi prinsip-prinsip SDGs dalam kebijakan nasional akan memperkuat sistem pertanian berkelanjutan di Indonesia.

C. Kolaborasi Antar Stakeholder untuk Pertanian Berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan adalah konsep yang melibatkan produksi pangan yang dapat memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi masa depan untuk memenuhi kebutuhan sendiri. Agar dapat mencapainya, kolaborasi antar berbagai pihak atau stakeholder sangat penting, mengingat bahwa tantangan yang dihadapi oleh sektor pertanian sangat kompleks dan saling terkait. Stakeholder utama dalam sektor pertanian meliputi pemerintah, petani, perusahaan agribisnis, lembaga riset, dan masyarakat sipil. Semua pihak ini harus bekerja sama untuk mengatasi tantangan global, seperti perubahan iklim, degradasi lahan, ketahanan pangan, dan ketimpangan sosial-ekonomi. Melalui kolaborasi yang efektif, sektor pertanian bisa memanfaatkan teknologi terkini dan kebijakan yang mendukung untuk mencapai keberlanjutan. Kolaborasi ini harus mencakup berbagai aspek, dari kebijakan dan regulasi, teknologi, pendidikan, hingga penyuluhan kepada petani.

1. Pemerintah

Pemerintah berperanan penting dalam menciptakan kebijakan dan regulasi yang mendukung pertanian berkelanjutan. Ini mencakup penyusunan kebijakan yang memberikan insentif bagi petani untuk

menerapkan praktik pertanian ramah lingkungan, seperti penggunaan pupuk organik, irigasi efisien, dan pengelolaan limbah pertanian. Beberapa kebijakan yang dapat mendukung kolaborasi dalam pertanian berkelanjutan antara lain:

a. Kebijakan Subsidi dan Insentif

   Pemerintah dapat berperan penting dalam mempercepat adopsi teknologi ramah lingkungan melalui kebijakan subsidi dan insentif. Subsidi untuk teknologi yang mendukung keberlanjutan, seperti sistem irigasi hemat air atau alat pertanian berbasis energi terbarukan, akan meringankan beban petani dalam berinvestasi pada solusi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, subsidi untuk pemanfaatan pupuk organik dan pestisida alami dapat mengurangi ketergantungan pada bahan kimia yang merusak lingkungan, sehingga menciptakan pertanian yang lebih berkelanjutan.

   Pemerintah juga dapat memberikan insentif untuk penelitian dan pengembangan dalam bidang pertanian berkelanjutan. Pendanaan yang memadai untuk penelitian akan memungkinkan pengembangan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap perubahan iklim, serta inovasi dalam sistem pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dengan menyediakan dukungan finansial dan kebijakan yang tepat, pemerintah dapat mendorong adopsi teknologi pertanian modern yang meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga keberlanjutan sumber daya alam.

b. Regulasi yang Mendukung Inovasi

   Pemerintah perlu mengembangkan regulasi yang mendukung inovasi teknologi di sektor pertanian tanpa menghambat kemajuan ilmiah. Salah satu contohnya adalah teknologi CRISPR dalam pemuliaan tanaman yang memungkinkan penyuntingan gen untuk menciptakan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap perubahan iklim, penyakit, dan hama. Dengan adanya kebijakan yang jelas dan mendukung, petani dan ilmuwan dapat memanfaatkan teknologi ini secara optimal tanpa terhalang oleh birokrasi yang berlebihan.

   Regulasi yang mendukung harus melibatkan pembentukan standar keamanan yang jelas dan proses persetujuan yang efisien. Pemerintah perlu memastikan bahwa teknologi baru tidak hanya

aman bagi konsumen dan lingkungan, tetapi juga memberikan manfaat yang signifikan bagi sektor pertanian secara keseluruhan. Dengan regulasi yang tepat, inovasi seperti CRISPR dapat diterapkan dengan aman dan efektif, mempercepat perbaikan hasil pertanian dan menciptakan ketahanan pangan yang lebih baik.

c. Kemitraan Internasional

Kemitraan internasional berperan penting dalam menghadapi tantangan global, khususnya perubahan iklim yang berdampak pada sektor pertanian. Indonesia, sebagai negara agraris, dapat memanfaatkan kolaborasi dengan negara-negara maju untuk mendapatkan akses terhadap teknologi ramah lingkungan dan riset pertanian terbaru. Kerja sama ini dapat mencakup transfer teknologi efisien dalam penggunaan air, pengelolaan limbah pertanian, serta teknologi pertanian presisi yang dapat membantu meningkatkan produktivitas tanpa merusak lingkungan.

Dengan kemitraan internasional, Indonesia juga dapat memperkuat kapasitas penelitiannya dalam bidang pertanian berkelanjutan, serta memanfaatkan pengalaman negara-negara lain dalam mengatasi dampak perubahan iklim. Selain itu, kolaborasi ini membuka peluang untuk mendapatkan dana penelitian dan pengembangan yang dapat mempercepat adopsi teknologi inovatif. Kemitraan semacam ini juga dapat meningkatkan keterlibatan Indonesia dalam kerangka kerja internasional, seperti Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), yang bertujuan untuk menciptakan ketahanan pangan global dan mengurangi kerusakan lingkungan.

2. Petani

Petani adalah aktor utama dalam implementasi pertanian berkelanjutan. Oleh karena itu, harus dilibatkan dalam setiap tahap kebijakan dan teknologi yang diperkenalkan. Pembekalan pengetahuan dan keterampilan melalui penyuluhan pertanian, pelatihan tentang teknologi pertanian terbaru, dan pemahaman tentang pentingnya keberlanjutan sangat diperlukan. Beberapa contoh peran petani dalam kolaborasi adalah:

a. Pengadopsian Teknologi Baru

Pengadopsian teknologi baru di sektor pertanian sangat penting untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi. Petani harus diberikan pelatihan yang komprehensif mengenai teknologi-teknologi terbaru, seperti pertanian presisi dan penggunaan sistem irigasi hemat air. Dengan pemahaman yang baik tentang cara mengaplikasikan teknologi ini, petani dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya, mengurangi pemborosan, serta meningkatkan hasil panen dengan biaya yang lebih rendah. Pelatihan ini juga perlu mencakup penerapan teknologi yang ramah lingkungan untuk menjaga keberlanjutan pertanian dalam jangka panjang.

Pengadopsian teknologi baru tidak hanya tentang memperkenalkan perangkat atau alat, tetapi juga membekali petani dengan pemahaman teknis dan pemecahan masalah. Hal ini akan membantu petani dalam mengatasi tantangan yang dihadapi, seperti kekurangan air atau serangan hama. Dengan dukungan pelatihan yang tepat, petani akan lebih siap untuk mengadopsi teknologi yang mendukung efisiensi, keberlanjutan, dan ketahanan pangan di masa depan.

b. Partisipasi dalam Riset

Partisipasi petani dalam riset pertanian sangat penting untuk memastikan relevansi dan efektivitas teknologi yang dikembangkan. Dengan melibatkan petani dalam uji coba varietas tanaman baru atau praktik pertanian yang lebih ramah lingkungan, riset dapat lebih sesuai dengan kondisi nyata di lapangan. Petani memiliki pengetahuan lokal yang sangat berharga tentang tantangan dan kebutuhan spesifik di wilayah. Oleh karena itu, umpan balik langsung darinya dapat membantu peneliti untuk menyempurnakan teknologi atau metode yang sedang diuji.

Keterlibatan petani dalam riset memberikan peluang untuk memperkenalkan inovasi lebih cepat dan memudahkan proses adopsi teknologi. Petani yang terlibat langsung dalam uji coba akan lebih mudah memahami manfaat dan cara kerja teknologi baru, sehingga meningkatkan kemungkinan penerimaan dan pengaplikasian teknologi tersebut di masa depan. Dengan kolaborasi ini, riset pertanian dapat menghasilkan solusi yang

lebih efektif dan efisien untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan sektor pertanian.

3. Perusahaan Agribisnis

Perusahaan agribisnis berperan krusial dalam memperkenalkan dan menyediakan teknologi yang dapat meningkatkan produktivitas pertanian. Sebagai penghasil benih, pupuk, dan alat pertanian, perusahaan besar memiliki kapasitas untuk mengembangkan teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, serta menyediakan pelatihan kepada petani dalam penggunaan teknologi tersebut. Misalnya, perusahaan dapat menyediakan alat pertanian canggih seperti drone atau sensor tanah yang dapat membantu petani mengelola lahan secara lebih presisi dan efisien. Hal ini tidak hanya meningkatkan hasil pertanian tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Perusahaan agribisnis dapat menghubungkan petani dengan pasar secara lebih langsung. Biasanya, petani harus bergantung pada perantara atau tengkulak untuk menjual hasil pertanian, yang sering kali mengurangi keuntungan. Dengan dukungan perusahaan, petani dapat memiliki akses langsung ke pasar konsumen atau pengolah produk, yang mengurangi peran tengkulak dan meningkatkan nilai jual produk. Model distribusi yang lebih transparan ini tidak hanya menguntungkan petani, tetapi juga memberikan konsumen produk yang lebih segar dan dengan harga yang lebih terjangkau.

Perusahaan agribisnis juga berperan penting dalam menyediakan pembiayaan untuk petani yang ingin mengadopsi teknologi baru. Banyak petani, terutama yang kecil, tidak memiliki modal untuk berinvestasi dalam alat atau teknologi yang lebih canggih. Dengan adanya kemitraan dengan perusahaan, petani dapat memperoleh akses ke pembiayaan atau kredit yang memadai untuk memodernisasi praktik pertanian. Dengan dukungan ini, perusahaan agribisnis tidak hanya menguntungkan dirinya sendiri, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan pertanian yang lebih produktif dan berkelanjutan.

4. Lembaga Riset dan Universitas

Lembaga riset dan universitas berperan penting dalam pengembangan dan penyebaran teknologi baru untuk pertanian berkelanjutan. Kolaborasi dengan petani dan sektor swasta dalam penelitian dan pengembangan (R&D) dapat mempercepat terciptanya

teknologi yang sesuai dengan kebutuhan lokal. Beberapa kontribusi lembaga riset dalam kolaborasi adalah:

a. Riset dan Pengembangan

   Lembaga riset dan universitas memiliki peran penting dalam pengembangan inovasi pertanian yang dapat meningkatkan ketahanan pangan di masa depan. Melalui riset yang intensif, lembaga-lembaga ini dapat mengembangkan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap perubahan iklim, kekeringan, atau serangan hama, yang merupakan tantangan utama dalam sektor pertanian modern. Pengembangan tanaman tahan iklim, seperti padi atau jagung yang lebih tahan terhadap cuaca ekstrem, sangat penting untuk menjaga stabilitas hasil pertanian dan ketahanan pangan di seluruh dunia.

   Lembaga riset juga terlibat dalam pengembangan teknologi pertanian presisi, seperti penggunaan sensor dan drone untuk memantau kondisi tanaman dan tanah. Teknologi ini memungkinkan petani untuk melakukan pemupukan dan irigasi secara efisien, mengurangi penggunaan bahan kimia yang berlebihan, serta meminimalkan kerugian akibat hama dan penyakit. Melalui riset dan pengembangan yang terus menerus, lembaga-lembaga ini membantu menciptakan solusi pertanian yang lebih berkelanjutan, efisien, dan ramah lingkungan, yang pada gilirannya meningkatkan produktivitas pertanian secara global.

b. Penyuluhan dan Pendidikan

   Universitas dan lembaga riset berperan kunci dalam penyuluhan dan pendidikan bagi petani, terutama dalam mengenalkan praktik pertanian yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Melalui program pelatihan dan seminar, dapat membekali petani dengan pengetahuan terbaru tentang teknologi pertanian modern, seperti pertanian presisi, manajemen air yang efisien, dan pengendalian hama terintegrasi. Pelatihan ini tidak hanya meningkatkan keterampilan teknis petani, tetapi juga membantu mengadopsi pendekatan yang lebih berkelanjutan untuk mengelola lahan.

   Penyuluh pertanian yang bekerja di lapangan juga dapat memperoleh manfaat besar dari pendidikan berkelanjutan yang disediakan oleh universitas dan lembaga riset. Penyuluh berperan sebagai penghubung antara petani dan teknologi terbaru. Dengan

memberikan penyuluhan yang tepat, dapat membantu petani memahami pentingnya inovasi dalam pertanian dan memastikan bahwa teknologi dan praktik baru diterapkan dengan benar di lapangan. Ini berkontribusi pada peningkatan hasil pertanian dan keberlanjutan jangka panjang sektor pertanian.

5. Masyarakat Sipil dan Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM)

Masyarakat sipil dan Lembaga Swadaya Masyarakat (LSM) berperan penting dalam memajukan pertanian berkelanjutan dengan mengadvokasi kebijakan yang mendukung kesejahteraan petani kecil dan perlindungan terhadap sumber daya alam. LSM sering kali menjadi suara bagi petani kecil yang kesulitan mengakses kebijakan atau sumber daya yang dibutuhkan untuk berkembang. Melalui pendekatan advokasi, LSM dapat mendukung perubahan kebijakan yang lebih inklusif, seperti subsidi untuk teknologi ramah lingkungan atau peraturan yang lebih fleksibel terkait penggunaan bahan kimia dalam pertanian, juga berperan dalam memastikan bahwa kebijakan yang ada memperhatikan keseimbangan antara kebutuhan pertanian dan kelestarian alam.

Masyarakat sipil dan LSM berperan dalam meningkatkan kesadaran publik tentang pentingnya pertanian berkelanjutan dan dampaknya terhadap ketahanan pangan jangka panjang. Melalui kampanye informasi dan program pendidikan, LSM dapat menjangkau petani dan konsumen untuk mempromosikan pertanian yang lebih ramah lingkungan, seperti penggunaan pupuk organik atau sistem pertanian tanpa pembakaran. Kesadaran yang lebih tinggi akan mendorong adopsi praktik pertanian yang lebih bertanggung jawab dan mendukung keberlanjutan sektor pertanian di masa depan.

D. Visi Pertanian Berbasis Teknologi di Masa Depan

Pada beberapa dekade terakhir, sektor pertanian mengalami transformasi signifikan berkat penerapan teknologi yang berkembang pesat. Terutama di tengah tantangan global seperti perubahan iklim, ketahanan pangan, dan keterbatasan lahan serta sumber daya alam, pertanian berbasis teknologi diharapkan dapat memberikan solusi inovatif untuk mencapainya. Visi pertanian berbasis teknologi di masa depan sangat bergantung pada pemanfaatan teknologi canggih seperti

pertanian presisi, sistem informasi geospasial, bioteknologi, *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan blockchain.

Penerapan teknologi dalam pertanian, khususnya di negara berkembang, menawarkan peluang untuk mengoptimalkan produksi pangan secara efisien, mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, dan meningkatkan kesejahteraan petani. Visi ini juga mencakup pencapaian sistem pertanian yang lebih cerdas, berkelanjutan, dan inklusif, di mana teknologi tidak hanya berfokus pada hasil produksi, tetapi juga pada kesejahteraan masyarakat pertanian secara keseluruhan.

1. Teknologi Pertanian Presisi: Masa Depan Produksi yang Cerdas

Pertanian presisi merupakan pendekatan yang revolusioner dalam sektor pertanian yang memanfaatkan teknologi canggih untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan produksi pertanian. Konsep ini mengintegrasikan berbagai alat seperti sensor tanah, drone, dan citra satelit untuk memantau dan mengelola kondisi lahan dan tanaman secara lebih akurat. Dengan memanfaatkan teknologi tersebut, petani dapat mengumpulkan data yang sangat spesifik mengenai kelembaban tanah, pH, kandungan nutrisi, serta kondisi tanaman secara keseluruhan. Data ini memungkinkan petani untuk membuat keputusan yang lebih tepat mengenai penggunaan input seperti air, pupuk, dan pestisida, serta mengoptimalkan hasil pertanian (Oliver et al., 2018).

Salah satu teknologi utama dalam pertanian presisi adalah penggunaan sensor tanah yang dapat memberikan informasi real-time tentang kondisi tanah. Sensor ini membantu petani memantau kelembaban tanah secara kontinu, sehingga dapat menyesuaikan sistem irigasi sesuai kebutuhan tanaman. Teknologi irigasi pintar ini tidak hanya mengurangi penggunaan air yang berlebihan tetapi juga menghindari pemborosan dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Dengan menggunakan data yang lebih akurat, petani dapat memastikan bahwa tanaman mendapatkan jumlah air yang optimal, yang pada akhirnya meningkatkan hasil panen secara signifikan.

Pertanian presisi juga berpotensi mengurangi penggunaan pestisida dan pupuk secara berlebihan. Dengan memanfaatkan sensor dan citra satelit, teknologi ini dapat mendeteksi area yang memerlukan perlakuan khusus, sehingga petani tidak perlu menyemprotkan pestisida atau pupuk secara merata ke seluruh lahan. Sebagai hasilnya, penggunaan bahan kimia dapat dikurangi, yang tidak hanya mengurangi

biaya produksi tetapi juga mengurangi dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Dengan demikian, pertanian presisi memberikan solusi untuk meningkatkan hasil pertanian sambil menjaga keberlanjutan lingkungan.

2. *Internet of Things* (IoT) dan Konektivitas Global dalam Pertanian

Internet of Things (IoT) telah menjadi salah satu inovasi teknologi terpenting dalam sektor pertanian modern. IoT merujuk pada jaringan perangkat yang saling terhubung, yang mampu mengumpulkan dan bertukar data secara otomatis. Dalam konteks pertanian, IoT memungkinkan pemantauan kondisi lahan dan tanaman secara real-time melalui sensor-sensor yang terpasang di berbagai titik strategis di lahan pertanian. Sensor-sensor ini dapat mengukur berbagai variabel penting, seperti kelembaban tanah, suhu udara, kualitas air, dan tingkat pH. Data yang diperoleh kemudian dikirim ke platform yang dapat diakses oleh petani melalui perangkat mobile atau komputer, memberikan informasi yang lebih akurat dan terkini mengenai kondisi pertanian.

Dengan adanya sistem IoT, petani dapat membuat keputusan yang lebih cepat dan tepat berdasarkan data yang real-time. Misalnya, sensor kelembaban tanah dapat memberikan informasi apakah tanaman membutuhkan irigasi atau tidak, sehingga petani dapat mengatur irigasi secara lebih efisien. Ini sangat mengurangi pemborosan air dan energi, serta mengoptimalkan penggunaan pupuk dan pestisida. Selain itu, IoT memungkinkan pengendalian hama yang lebih presisi, karena data yang terkumpul dapat membantu petani untuk mengetahui area mana yang rentan terhadap serangan hama, sehingga dapat segera mengambil tindakan preventif.

Penggunaan IoT dalam pertanian tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga memungkinkan integrasi yang lebih baik di seluruh rantai pasok pertanian. Dengan adanya data yang lebih transparan dan terperinci, hubungan antara petani, distributor, dan konsumen akhir menjadi lebih terhubung. Misalnya, sistem yang terhubung dapat memberikan informasi tentang status produk pertanian kepada distributor dan konsumen, mempercepat alur distribusi dan mengurangi ketidakpastian dalam rantai pasok.

3. Bioteknologi dan Pemuliaan Tanaman di Masa Depan

Bioteknologi telah membawa transformasi besar dalam sektor pertanian, memberikan peluang untuk meningkatkan kualitas dan ketahanan tanaman. Salah satu perkembangan terpenting dalam bioteknologi pertanian adalah teknik rekayasa genetika, yang memungkinkan para ilmuwan untuk memodifikasi tanaman dengan cara yang lebih presisi dan efisien. Dengan menggunakan teknologi seperti CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*), perubahan genetik dapat dilakukan pada tingkat yang sangat tepat, memungkinkan peningkatan ketahanan tanaman terhadap berbagai ancaman seperti hama, penyakit, dan perubahan iklim. Ini sangat penting, terutama ketika kita menghadapi tantangan besar terkait ketahanan pangan global dan perubahan iklim yang semakin ekstrem (Zhang et al., 2014).

Di masa depan, penggunaan bioteknologi untuk pemuliaan tanaman diprediksi akan menghasilkan varietas tanaman yang lebih unggul. Tanaman-tanaman ini tidak hanya akan memiliki hasil yang lebih tinggi, tetapi juga akan lebih tahan terhadap stres lingkungan seperti kekeringan, suhu ekstrem, dan pola cuaca yang tidak menentu. Teknologi CRISPR dapat digunakan untuk mengubah gen tanaman sehingga dapat bertahan lebih baik dalam kondisi kekeringan atau panas, yang akan menjadi semakin penting mengingat perubahan iklim yang semakin memengaruhi pola cuaca global. Tanaman yang lebih tahan terhadap kondisi ini dapat meningkatkan ketahanan pangan di daerah yang paling rentan terhadap dampak perubahan iklim.

Salah satu manfaat besar dari bioteknologi adalah kemampuannya untuk menghasilkan produk pertanian dengan nilai gizi yang lebih tinggi. Sebagai contoh, beras yang diperkaya dengan vitamin A atau jagung yang kaya akan protein dapat membantu mengatasi masalah kekurangan gizi di banyak negara berkembang. Inovasi semacam ini tidak hanya mendukung keberlanjutan produksi pangan, tetapi juga berkontribusi pada pemenuhan kebutuhan gizi global. Di negara-negara dengan tingkat kekurangan gizi yang tinggi, produk-produk ini bisa menjadi solusi yang efektif dan praktis untuk meningkatkan status gizi penduduk.

4. Kecerdasan Buatan (AI) dan Otomatisasi dalam Pertanian

Kecerdasan buatan (AI) dan otomatisasi semakin berperan penting dalam dunia pertanian modern, memberikan kemajuan besar dalam cara kita memanage dan meningkatkan hasil pertanian. AI memungkinkan pengolahan data besar yang dikumpulkan melalui teknologi pertanian presisi dan IoT (*Internet of Things*), serta membantu dalam membuat prediksi yang lebih akurat mengenai kondisi tanaman, cuaca, dan potensi hasil pertanian. Dengan kemampuan untuk menganalisis sejumlah besar data dalam waktu singkat, AI dapat memberikan wawasan yang lebih tepat dan relevan bagi petani, meningkatkan kemampuan untuk merencanakan dan mengelola aktivitas pertanian dengan lebih efektif (Kamilaris et al., 2017).

Salah satu penerapan yang paling signifikan dari AI dalam pertanian adalah dalam otomatisasi proses pertanian itu sendiri. Misalnya, penggunaan robot pertanian yang dilengkapi dengan kemampuan pengenalan gambar untuk mendeteksi hama atau penyakit pada tanaman secara otomatis, serta sistem yang dapat melakukan pemupukan atau penyiraman tanaman berdasarkan data yang diperoleh melalui sensor dan analisis AI. Teknologi ini memungkinkan petani untuk mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manusia, yang semakin sulit ditemukan, terutama di negara-negara dengan populasi petani yang menurun. Dengan demikian, AI tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional, tetapi juga memberikan solusi untuk tantangan ketenagakerjaan dalam sektor pertanian.

Traktor dan mesin pertanian yang dilengkapi dengan AI dapat bekerja secara mandiri, mengoptimalkan penggunaan waktu dan sumber daya. Misalnya, traktor otonom yang dilengkapi dengan AI dapat melakukan pengolahan tanah, penanaman, dan pengairan dengan sedikit atau tanpa intervensi manusia. Ini tidak hanya menghemat biaya tenaga kerja, tetapi juga mengurangi kesalahan manusia yang sering terjadi dalam pengelolaan pertanian. Dengan kemampuan untuk bekerja secara mandiri, alat-alat ini dapat beroperasi lebih lama dalam sehari dan meningkatkan produktivitas pertanian secara keseluruhan.

5. Blockchain untuk Transparansi dan Keamanan Rantai Pasok Pertanian

Blockchain merupakan salah satu teknologi digital yang potensial untuk mentransformasi sektor pertanian, terutama dalam meningkatkan transparansi dan keamanan rantai pasok. Teknologi ini bekerja dengan menyimpan data dalam jaringan yang terdesentralisasi dan tidak dapat diubah, menjadikannya sangat andal dalam mencatat setiap transaksi atau aktivitas dalam rantai pasokan pangan. Dalam konteks pertanian, blockchain memungkinkan pelacakan produk mulai dari tahap produksi di lahan pertanian hingga ke tangan konsumen, termasuk proses distribusi, pengemasan, hingga penyimpanan. Setiap pihak yang terlibat dalam rantai pasok dapat mengakses informasi ini secara real-time, sehingga risiko manipulasi atau pemalsuan data dapat diminimalkan.

Dengan implementasi blockchain, petani dan pelaku usaha agribisnis dapat menciptakan sistem yang lebih terbuka dan dapat dipercaya. Konsumen, misalnya, dapat memindai kode QR pada produk pertanian untuk melihat informasi detail mengenai asal-usul produk tersebut—apakah berasal dari pertanian organik, kapan dipanen, dan bagaimana proses pengemasannya dilakukan. Transparansi ini meningkatkan kepercayaan konsumen terhadap produk lokal maupun ekspor. Selain itu, blockchain juga dapat mendukung sertifikasi digital, seperti sertifikasi organik atau fair trade, yang dapat ditampilkan dan diverifikasi secara otomatis dalam sistem.

Penggunaan blockchain dalam rantai pasok pertanian juga membantu mengurangi risiko penipuan dan kontaminasi produk. Dengan adanya pencatatan data yang akurat dan terstandar, apabila terjadi insiden seperti keracunan makanan atau produk cacat, pihak terkait dapat dengan cepat mengidentifikasi dan menarik produk dari pasar, serta melacak sumber masalahnya. Hal ini tidak hanya meningkatkan keamanan pangan, tetapi juga melindungi reputasi produsen dan mempercepat respons terhadap insiden.

6. Pembangunan Infrastruktur dan Kebijakan yang Mendukung

Pembangunan infrastruktur dan kebijakan yang mendukung merupakan fondasi utama dalam menciptakan ekosistem pertanian yang modern dan berbasis teknologi. Tanpa infrastruktur yang memadai, penerapan teknologi canggih seperti pertanian presisi, *Internet of Things*

(IoT), dan kecerdasan buatan (AI) sulit dilakukan secara optimal. Salah satu bentuk infrastruktur krusial adalah ketersediaan jaringan internet berkecepatan tinggi di daerah pedesaan, yang menjadi penghubung utama antara teknologi digital dan aktivitas pertanian di lapangan. Selain itu, jalan raya dan transportasi yang baik memastikan distribusi hasil pertanian berjalan lancar dari ladang ke pasar (FAO, 2017).

Fasilitas penyimpanan modern juga menjadi bagian penting dari infrastruktur pendukung, terutama untuk produk-produk segar yang mudah rusak. Dengan penyimpanan yang tepat seperti cold storage atau gudang berpendingin, hasil pertanian dapat dijaga kualitasnya dan nilai jualnya tetap tinggi, mengurangi potensi kerugian petani akibat pembusukan. Di sisi lain, sistem irigasi berbasis teknologi seperti irigasi tetes otomatis juga membutuhkan infrastruktur yang baik, termasuk jaringan pipa air dan sensor tanah yang terintegrasi, untuk memastikan efisiensi penggunaan air dan energi.

Kebijakan pemerintah memiliki peran kunci dalam mendukung pembangunan ekosistem ini. Pemerintah dapat mendorong adopsi teknologi dengan memberikan subsidi bagi petani yang ingin berinvestasi dalam alat pertanian modern atau perangkat digital. Selain itu, insentif pajak dan pendanaan riset untuk lembaga-lembaga yang mengembangkan inovasi pertanian juga dapat mempercepat kemajuan teknologi. Dalam hal ini, kemitraan antara sektor publik dan swasta juga sangat penting, agar teknologi yang dikembangkan tidak hanya canggih, tetapi juga relevan dengan kebutuhan petani.

BAB X

KESIMPULAN

Pertanian merupakan sektor penting bagi keberlangsungan hidup manusia, bukan hanya sebagai penyedia pangan, tetapi juga sebagai penggerak ekonomi berbagai negara. Dalam beberapa dekade terakhir, sektor ini telah mengalami transformasi besar melalui kehadiran teknologi yang meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan. Buku ini mengupas peran agroteknologi modern dalam menjawab tantangan global seperti perubahan iklim, peningkatan kebutuhan pangan, serta degradasi sumber daya alam. Agroteknologi modern mengedepankan penggunaan teknologi untuk meningkatkan produktivitas pertanian tanpa merusak lingkungan dan sosial. Teknologi seperti pertanian presisi, bioteknologi, dan pemanfaatan big data membantu petani mengoptimalkan produksi sambil mengurangi dampak negatif terhadap alam. Salah satu inovasi penting adalah bioteknologi dalam pemuliaan tanaman, termasuk penggunaan CRISPR untuk menciptakan varietas tahan hama, penyakit, dan cuaca ekstrem.

Keberlanjutan menjadi fokus utama dalam pengembangan teknologi pertanian. Agroteknologi memungkinkan penggunaan sumber daya secara efisien, seperti air dan tanah, melalui sistem irigasi cerdas dan sensor tanaman. Untuk mewujudkan pertanian berkelanjutan, diperlukan kolaborasi antara pemerintah, lembaga pendidikan, sektor swasta, dan masyarakat petani, termasuk penyusunan kebijakan yang mendorong inovasi dan edukasi petani agar mampu mengadopsi teknologi dengan baik. Meskipun teknologi menawarkan banyak keuntungan, penerapannya tidak selalu mudah. Banyak petani menghadapi kendala akses, pengetahuan, dan infrastruktur. Oleh karena itu, pelatihan dan pendampingan sangat diperlukan untuk meningkatkan kapasitas petani dalam memahami dan menggunakan teknologi. Teknologi digital seperti AI, IoT, dan drone semakin penting dalam pengambilan keputusan berbasis data di bidang pertanian.

Dampak sosial dari penerapan teknologi juga perlu diperhatikan. Teknologi dapat meningkatkan kesejahteraan petani dan efisiensi kerja, namun juga berpotensi menimbulkan kesenjangan jika tidak dikelola dengan bijak. Edukasi menjadi kunci agar petani, termasuk generasi muda, memahami pentingnya agroteknologi dalam meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan. Visi masa depan pertanian adalah sistem yang lebih cerdas, efisien, dan ramah lingkungan. Dengan sinergi antara teknologi, kebijakan, dan partisipasi petani, pertanian global dapat menjawab tantangan ketahanan pangan dan lingkungan. Buku ini menegaskan bahwa agroteknologi modern bukan sekadar inovasi teknis, tetapi juga sarana membangun pertanian yang lebih inklusif dan berkelanjutan bagi dunia.

DAFTAR PUSTAKA

Abbasi, E., & Dehghanisanich, H. (2013). Precision Irrigation and Its Impact on Water Use Efficiency of Apricot. *Journal of Water Research in Agriculture*, *27*(1), 41–52.

Abdelhamid, M. A., Abdelkader, T. K., Sayed, H. A. A., Zhang, Z., Zhao, X., & Atia, M. F. (2025). Design and evaluation of a solar powered smart irrigation system for sustainable urban agriculture. *Scientific Reports*, *15*(1), 11761.

Abdulquadri, A. O., Olokonla, A. A., Suleiman, W. O., & Yahaya, B. O. (2024). Transforming Nigeria's Agricultural Value Chains: The Role of Digital Platforms in Market Access and Price Transparency. *UNIZIK Journal of Marketing*, *1*(2), 37–57.

Abu, N. S., Bukhari, W. M., Ong, C. H., Kassim, A. M., Izzuddin, T. A., Sukhaimie, M. N., Norasikin, M. A., & Rasid, A. F. A. (2022). *Internet of things* applications in precision agriculture: A review. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, *3*(3), 338–347.

Agrios, G. (2012). *Plant Pathology*. Academic Press. https://books.google.co.id/books?id=xLdSrKhThNEC

Akhtar, A., Krepl, V., & Ivanova, T. (2018). A combined overview of combustion, pyrolysis, and gasification of biomass. *Energy & Fuels*, *32*(7), 7294–7318.

Al-Chalabi, M. (2015). Vertical farming: Skyscraper sustainability? *Sustainable Cities and Society*, *18*, 74–77.

Alengebawy, A., Ran, Y., Osman, A. I., Jin, K., Samer, M., & Ai, P. (2024). Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production and sustainable bioenergy recovery: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 1–28.

Ali, Q., Shabaan, M., Ashraf, S., Rehman, A., & Asghar, H. N. (2020). Genetically modified rice stacked with antioxidants for nutrient enhancement and stress tolerance. *Rice Research for Quality Improvement: Genomics and Genetic Engineering: Volume 2: Nutrient Biofortification and Herbicide and Biotic Stress Resistance in Rice*, 433–467.

Altieri, M. A. (2018). *Agroecology: The Science Of Sustainable Agriculture, Second Edition*. CRC Press.

https://books.google.co.id/books?id=vwTFDwAAQBAJ
Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2017). Agroecology: a brief account of its origins and currents of thought in Latin America. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, *41*(3–4), 231–237.
Altieri, M. A., & Nicholls, C. I. (2020). Agroecology and the emergence of a post COVID-19 agriculture. *Agriculture and Human Values*, *37*, 525–526.
Anandajayasekaram, P. (2019). The role of agricultural R&D within the agricultural innovation systems framework. *Gates Open Res*, *3*(1129), 1129.
Aprilia, T., Rakhmawati, R., Bokau, R. J. M., Fitri, A., Nursandi, J., & Marlina, E. (2024). Bimtek Budidaya dan Marketing Ikan Lele dengan Teknologi Bioflok di Pondok Pesantren Mardhiyatul Qomariyah Pesawaran. *Jurnal Pengabdian Nasional*, *5*(2), 143–147.
Banker, R. D., Mitra, S., Sambamurthy, V., & Mitra, S. (2011). The effects of digital trading platforms on commodity prices in agricultural supply chains. *MIS Quarterly*, 599–611.
Barrett, C. B., Benton, T. G., Cooper, K. A., Fanzo, J., Gandhi, R., Herrero, M., James, S., Kahn, M., Mason-D'Croz, D., & Mathys, A. (2020). Bundling innovations to transform agri-food systems. *Nature Sustainability*, *3*(12), 974–976.
Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. *Nature Sustainability*, *3*(4), 254–256.
Batwa, A., & Norrman, A. (2021). Blockchain technology and trust in supply chain management: A literature review and research agenda. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, *14*(2), 203–220.
Beacham, A. M., Vickers, L. H., & Monaghan, J. M. (2019). Vertical farming: a summary of approaches to growing skywards. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *94*(3), 277–283.
Beckman, J., & Countryman, A. M. (2021). The importance of agriculture in the economy: impacts from COVID-19. *American Journal of Agricultural Economics*, *103*(5), 1595–1611.
Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, *13*(1), 13–26.

Bhatt, R., Singh, P., Hossain, A., & Timsina, J. (2021). Rice–wheat system in the northwest Indo-Gangetic plains of South Asia: Issues and technological interventions for increasing productivity and sustainability. *Paddy and Water Environment*, *19*(3), 345–365.

Bhatt, S., Kalamkar, S. S., & Makwana, M. (2019). Solarisation of agricultural water pumps in Gujarat. *Agric Water Manag*, *221*, 81–89.

Bingzhang, L., & Zirianov, V. (2021). Blockchain in agricultural supply chain management. *E3S Web of Conferences*, *273*, 8029.

Bolfe, E. L., Barbedo, J. G. A., Massruhá, S. M. F. S., de Souza, K. X. S., & Assad, E. D. (2023). *Challenges, trends and opportunities in digital agriculture in Brazil.*

Booth, A. (1989). *Agricultural development in Indonesia.*

Bouis, H. E. (2013). The potential of genetically modified food crops to improve human nutrition in developing countries 1. In *Transgenics and the Poor* (pp. 79–96). Routledge.

Bray, F. (2023). *The Rice Economies: Technology and Development in Asian Societies*. University of California Press. https://books.google.co.id/books?id=9nxkQQCxjlgC

Briefs, I. (2017). Global status of commercialized biotech/GM crops in 2017: Biotech crop adoption surges as economic benefits accumulate in 22 years. *ISAAA Brief*, *53*, 25–26.

Broekhof, S. (2010). Building a Common Vision: from allotment garden to sustainable food system. *Wageningen: Wur*.

Brookes, G., & Barfoot, P. (2020). GM crops: global socio-economic and environmental impacts 1996-2018. *PG Econ. Ltd, UK*, 1–213.

Caro, M. P., Ali, M. S., Vecchio, M., & Giaffreda, R. (2018). Blockchain-based traceability in Agri-Food supply chain management: A practical implementation. *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture-Tuscany (IOT Tuscany)*, 1–4.

Chaiprasert, P. (2011). Biogas production from agricultural wastes in Thailand. *J. Sustainable Energ. Environ. Spec. Issue*, 63–65.

Chatterjee, J., & Kanitkar, T. (2024). A Shift to Solar Irrigation Pump-Sets: A Case Study from Uttar Pradesh, India. *Review of Agrarian Studies*, *14*(1), 82–104.

Cheng, C., Zhang, Y., Chen, X., Song, J., Guo, Z., Li, K., & Zhang, K. (2018). Co-expression of AtNHX1 and TsVP improves the salt tolerance of transgenic cotton and increases seed cotton yield in a

saline field. *Molecular Breeding*, *38*, 1–15.
Coimbra-Araújo, C. H., Mariane, L., Júnior, C. B., Frigo, E. P., Frigo, M. S., Araújo, I. R. C., & Alves, H. J. (2014). Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *40*, 826–839.
Cominelli, E., Conti, L., Tonelli, C., & Galbiati, M. (2013). Challenges and perspectives to improve crop drought and salinity tolerance. *New Biotechnology*, *30*(4), 355–361.
Conway, G. R., & Barbie, E. B. (1988). After the green revolution: sustainable and equitable agricultural development. *Futures*, *20*(6), 651–670.
Davis, K., Nkonya, E., Kato, E., Mekonnen, D. A., Odendo, M., Miiro, R., & Nkuba, J. (2012). Impact of farmer field schools on agricultural productivity and poverty in East Africa. *World Development*, *40*(2), 402–413.
Davis, K., & Sulaiman V, R. (2014). The New Extensionist: Roles and Cap acities to Strengthen Extension and Advisory Services. *Journal of International Agricultural and Extension Education*, *21*(3), 6–18.
Dayıoğlu, M. A., & Turker, U. (2021). Digital transformation for sustainable future-agriculture 4.0: A review. *Journal of Agricultural Sciences*, *27*(4), 373–399.
Doolotkeldieva, T., Konurbaeva, M., & Bobusheva, S. (2018). Microbial communities in pesticide-contaminated soils in Kyrgyzstan and bioremediation possibilities. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(32), 31848–31862.
Doxzen, K., & Halpern, J. (2020). Focusing on Human Rights: a framework for CRISPR germline genome editing ethics and regulation. *Perspectives in Biology and Medicine*, *63*(1), 44–53.
Ducasse, V., Capowiez, Y., & Peigné, J. (2022). Vermicomposting of municipal solid waste as a possible lever for the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *42*(5), 89.
Duncan, E., Abdulai, A.-R., & Fraser, E. D. G. (2021). Modernizing agriculture through digital technologies: Prospects and challenges. *Handbook on the Human Impact of Agriculture*, 138–161.
Edvardsson Björnberg, K., Jonas, E., Marstorp, H., & Tidåker, P. (2015). The role of biotechnology in sustainable agriculture: views and

perceptions among key actors in the Swedish food supply chain. *Sustainability*, *7*(6), 7512–7529.

El Enshasy, H. A., Ambehabati, K. K., El Baz, A. F., Ramchuran, S., Sayyed, R. Z., Amalin, D., Dailin, D. J., & Hanapi, S. Z. (2020). Trichoderma: biocontrol agents for promoting plant growth and soil health. *Agriculturally Important Fungi for Sustainable Agriculture: Volume 2: Functional Annotation for Crop Protection*, 239–259.

Elbehri, A. (2015). *Climate change and food systems: global assessments and implications for food security and trade.*

Erickson, B., & Fausti, S. W. (2021). The role of precision agriculture in food security. *Agronomy Journal*, *113*(6), 4455–4462.

Etzkowitz, H., & Zhou, C. (2017). *The Triple Helix: University–Industry–Government Innovation and Entrepreneurship*. Taylor & Francis. https://books.google.co.id/books?id=JGgPEAAAQBAJ

Evenson, R. E., & Gollin, D. (2003). Assessing the impact of the *Green Revolution*, 1960 to 2000. *Science*, *300*(5620), 758–762.

FAO. (2017). *The state of food and agriculture 2017: leveraging food systems for inclusive rural transformation.*

FAO. (2020). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets*. FAO. https://books.google.co.id/books?id=09zyDwAAQBAJ

Farooq, M., & Pisante, M. (2019). *Innovations in Sustainable Agriculture*. Springer International Publishing. https://books.google.co.id/books?id=tCa7DwAAQBAJ

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., & West, P. C. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, *478*(7369), 337–342.

Fountas, S., Mylonas, N., Malounas, I., Rodias, E., Hellmann Santos, C., & Pekkeriet, E. (2020). Agricultural robotics for field operations. *Sensors*, *20*(9), 2672.

Fuglie, K., Gautam, M., Goyal, A., & Maloney, W. F. (2019). *Harvesting Prosperity: Technology and Productivity Growth in Agriculture*. World Bank. https://books.google.co.id/books?id=PZ6-DwAAQBAJ

Fuller, D. Q., Denham, T., Arroyo-Kalin, M., Lucas, L., Stevens, C. J., Qin, L., Allaby, R. G., & Purugganan, M. D. (2014). Convergent evolution and parallelism in plant domestication revealed by an

expanding archaeological record. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *111*(17), 6147–6152.

Gabrieli, F., & Almubaroq, H. Z. (2022). The Potential of The Hydroponic Vegetables to Support Food Security in Defense Management Perspective. *JESS (Journal of Education on Social Science)*, *5*(2), 194–206.

Garnett, T., Appleby, M. C., Balmford, A., Bateman, I. J., Benton, T. G., Bloomer, P., Burlingame, B., Dawkins, M., Dolan, L., & Fraser, D. (2013). Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. *Science*, *341*(6141), 33–34.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, *327*(5967), 828–831.

Gliessman, S. R. (2021). *Package Price Agroecology: The Ecology of Sustainable Food Systems, Third Edition*. CRC Press. https://books.google.co.id/books?id=rYUfEAAAQBAJ

Goedde, L., Katz, J., Ménard, A., & Revellat, J. (2020). Agriculture's connected future: How technology can yield new growth. *McKinsey and Company*.

Goswami, A., Ghadei, K., Singh, A. K., & Chaudhary, S. (2018). Awareness on issues related to extension in social media by the agricultural extension students of Uttar Pradesh. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *7*(6), 2119–2123.

Gruhn, P. (2000). *Integrated Nutrient Management, Soil Fertility, and Sustainable Agriculture: Current Issues and Future Challenges*. International Food Policy Research Institute. https://books.google.co.id/books?id=wgPhCXJ04cgC

Gurr, G. M., Wratten, S. D., Landis, D. A., & You, M. (2017). Habitat management to suppress pest populations: progress and prospects. *Annual Review of Entomology*, *62*(1), 91–109.

Haris, M., Ajmal, H. M. N., & Bashir, H. (2023). Impacts of genetically modified organisms (GMOs) on environment and agriculture: a comprehensive review. *Trends Anim Plant Sci*, *1*, 92–99.

He, L. (2023). Variable rate technologies for precision agriculture. In *Encyclopedia of Digital Agricultural Technologies* (pp. 1533–1542). Springer.

Hernández-Mogollón, J.-M., Campón-Cerro, A. M., Leco-Berrocal, F., & Pérez-Díaz, A. (2011). Agricultural diversification and the sustainability of agricultural systems: Possibilities for the

development of agrotourism. *Environmental Engineering and Management Journal*, *10*(12), 1911–1921.

Hirakawa, S., Masuyama, H., Sudiarta, I. P., Suprapta, D. N., & Shiotsu, F. (2024). Initiatives and Prospects for Sustainable Agricultural Production in Karangasem Regency, Bali, Indonesia. *Sustainability*, *16*(2), 517.

Hitachi-UTokyo Laboratory. (2020). *Society 5.0: A People-centric Super-smart Society*. Springer Nature Singapore. https://books.google.co.id/books?id=6SjoDwAAQBAJ

Hnin, K. K., Zhang, M., Mujumdar, A. S., & Zhu, Y. (2019). Emerging food drying technologies with energy-saving characteristics: A review. *Drying Technology*.

Höfte, M. (2021). The use of Pseudomonas spp. as bacterial biocontrol agents to control plant disease. In *Microbial bioprotectants for plant disease management*. Burleigh Dodds.

Hu, H., & Xiong, L. (2014). Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. *Annual Review of Plant Biology*, *65*(1), 715–741.

IEA, P. (2022). World energy outlook 2022. *Paris, France: International Energy Agency (IEA)*.

Joshi, P., Tewari, V., Kumar, S., & Singh, A. (2023). Blockchain technology for sustainable development: a systematic literature review. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, *16*(3), 683–717.

Joshi, R., Sahoo, K. K., Singh, A. K., Anwar, K., Pundir, P., Gautam, R. K., Krishnamurthy, S. L., Sopory, S. K., Pareek, A., & Singla-Pareek, S. L. (2020). Enhancing trehalose biosynthesis improves yield potential in marker-free transgenic rice under drought, saline, and sodic conditions. *Journal of Experimental Botany*, *71*(2), 653–668.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A review on the practice of *big data* analysis in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, *143*, 23–37.

Kanna, R. R., Baranidharan, M., Singh, R. R., & Indragandhi, V. (2020). Solar energy application in Indian irrigation system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *937*(1), 12016.

Karunathilake, E., Le, A. T., Heo, S., Chung, Y. S., & Mansoor, S.

(2023). The path to smart farming: Innovations and opportunities in precision agriculture. *Agriculture*, *13*(8), 1593.

Katuwal, H. (2022). Biogas adoption in Nepal: empirical evidence from a nationwide survey. *Heliyon*, *8*(8).

Kay, M., Bunning, S., Burke, J., Boerger, V., Bojic, D., Bosc, P.-M., Clark, M., Dale, D., England, M., & Hoogeveen, J. (2022). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture 2021. Systems at breaking point*. FAO.

Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, *90*, 100315.

Kogan, M. (1998). Integrated pest management: historical perspectives and contemporary developments. *Annual Review of Entomology*, *43*(1), 243–270.

Koniuszewska, I., Korzeniewska, E., Harnisz, M., & Czatzkowska, M. (2020). Intensification of biogas production using various technologies: A review. *International Journal of Energy Research*, *44*(8), 6240–6258.

Kosior, K. (2018). Digital transformation in the agri-food sector–opportunities and challenges. *Roczniki (Annals)*, *2018*(2).

Kouhizadeh, M., & Sarkis, J. (2018). Blockchain practices, potentials, and perspectives in greening supply chains. *Sustainability*, *10*(10), 3652.

Kumbhar, V., Patil, A., Kumari, S., & Bharti, N. (2023). Systematic Review on Growth of E-Agriculture in Context of Android-Based Mobile Applications. *International Conference on ICT for Sustainable Development*, 545–553.

Lajoie-O'Malley, A., Bronson, K., van der Burg, S., & Klerkx, L. (2020). The future (s) of digital agriculture and sustainable food systems: An analysis of high-level policy documents. *Ecosystem Services*, *45*, 101183.

Lansing, J. S. (2012). *Perfect Order: Recognizing Complexity in Bali*. Princeton University Press. https://books.google.co.id/books?id=f6H-kCvCCwgC

Lawrence, I. D., Agnishwar, J., & Vijayakumar, R. (2023). Drone technology in agriculture for surveillance and inspection. *Eur. Chem. Bull*, *12*(Special Issue 12), 1253–1263.

Lee, B. X., Kjaerulf, F., Turner, S., Cohen, L., Donnelly, P. D., Muggah, R., Davis, R., Realini, A., Kieselbach, B., & MacGregor, L. S. (2016). Transforming our world: implementing the 2030 agenda through sustainable development goal indicators. *Journal of Public Health Policy*, *37*, 13–31.

Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). *Machine learning* in agriculture: A review. *Sensors*, *18*(8), 2674.

Lindblom, J., Lundström, C., Ljung, M., & Jonsson, A. (2017). Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. *Precision Agriculture*, *18*, 309–331.

Liu, T., McConkey, B., Huffman, T., Smith, S., MacGregor, B., Yemshanov, D., & Kulshreshtha, S. (2014). Potential and impacts of renewable energy production from agricultural biomass in Canada. *Applied Energy*, *130*, 222–229.

Liu, X., Xie, C., Si, H., & Yang, J. (2017). CRISPR/Cas9-mediated genome editing in plants. *Methods*, *121*, 94–102.

Lobell, D. B., & Gourdji, S. M. (2012). The influence of climate change on global crop productivity. *Plant Physiology*, *160*(4), 1686–1697.

Lobell, D. B., Schlenker, W., & Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, *333*(6042), 616–620.

Mahmud, M. S. A., Abidin, M. S. Z., Emmanuel, A. A., & Hasan, H. S. (2020). Robotics and automation in agriculture: present and future applications. *Applications of Modelling and Simulation*, *4*, 130–140.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., & Gomis, M. I. (2021). Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, *2*(1), 2391.

Mazoyer, M., & Roudart, L. (2006). *A History of World Agriculture: From the Neolithic Age to the Current Crisis*. Monthly Review Press. https://books.google.co.id/books?id=vt0VCgAAQBAJ

Megeto, G. A. S., Silva, A. G. da, Bulgarelli, R. F., Bublitz, C. F., Valente, A. C., & Costa, D. A. G. da. (2020). Artificial intelligence applications in the agriculture 4.0. *Revista Ciência Agronômica*, *51*(spe), e20207701.

Mir, M. S., Naikoo, N. B., Kanth, R. H., Bahar, F. A., Bhat, M. A., Nazir, A., Mahdi, S. S., Amin, Z., Singh, L., & Raja, W. (2022). Vertical farming: The future of agriculture: A review. *The Pharma Innovation Journal*, *11*(2), 1175–1195.

Mishra, K. N., Kumar, S., & Patel, N. R. (2021). Survey on Internet of Things and its Application in Agriculture. *Journal of Physics: Conference Series*, *1714*(1), 12025.

Mistry, J. (2015). Vermicompost, a best superlative for organic farming: a review. *Journal of Advanced Studies in Agricultural, Biological and Environmental Sciences*, *2*(3), 38–46.

Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, *114*(4), 358–371.

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, *59*(1), 651–681.

Mustafa, M. F. M. S., Namasivayam, N., & Demirovic, A. (2024). Food Cold Chain Logistics and Management: A Review of Current Development and Emerging Trends. *Journal of Agriculture and Food Research*, 101343.

Mwangi, M., & Kariuki, S. (2015). Factors determining adoption of new agricultural technology by smallholder farmers in developing countries. *Journal of Economics and Sustainable Development*, *6*(5).

Nordlee, J. A., Taylor, S. L., Townsend, J. A., Thomas, L. A., & Bush, R. K. (1996). Identification of a Brazil-nut allergen in transgenic soybeans. *New England Journal of Medicine*, *334*(11), 688–692.

Oelviani, R., & Utomo, B. (2015). Sistem pertanian terpadu di lahan pekarangan mendukung ketahanan pangan keluarga berkelanjutan: Studi kasus di Desa Plukaran, Kecamatan Gembong, Kabupaten Pati, Jawa Tengah. *Pros Sem Nas Masy Biodiv Indon*, *1*(5), 1197–1202.

Oktavianus, A., Afrianti, S., Sulastri, Y. S., Tarigan, A. A., & Pratomo, B. (2025). *Pengaruh Pupuk Organik Cair (POC) Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) terhadap Biomassa Mucuna braceata DC*.

Oliver, M., Bishop, T., & Marchant, B. (2018). *Precision Agriculture for Sustainability and Environmental Protection*. Taylor & Francis. https://books.google.co.id/books?id=731zuAEACAAJ

Ortiz, A., & Sansinenea, E. (2022). Bacillus thuringiensis based biopesticides for integrated crop management. In *Biopesticides* (pp. 1–6). Elsevier.

Ouda, S., & Zohry, A. E. H. (2022). *Climate-Smart Agriculture: Reducing Food Insecurity*. Springer International Publishing. https://books.google.co.id/books?id=jG1XEAAAQBAJ

Panesar, P. S., & Marwaha, S. S. (2017). *Biotechnology in Agriculture and Food Processing: Opportunities and Challenges*. Taylor & Francis Group. https://books.google.co.id/books?id=jarlAQAACAAJ

Parmesan, C., Morecroft, M. D., & Trisurat, Y. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. GIEC.

Pennock, D., McKenzie, N., & Montanarella, L. (2015). Status of the world's soil resources. *Technical Summary FAO, Rome, Italy*.

Pernapati, K. (2018). IoT based low cost smart irrigation system. *2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, 1312–1315.

Pingali, P. L. (2012). Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(31), 12302–12308.

Pingali, P. L., Aiyar, A., Abraham, M., & Rahman, A. (2019). *Transforming food systems for a rising India*. Springer Nature.

Pretty, J. (2018). Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Science*, *362*(6417), eaav0294.

Pretty, J., Benton, T. G., Bharucha, Z. P., Dicks, L. V, Flora, C. B., Godfray, H. C. J., Goulson, D., Hartley, S., Lampkin, N., & Morris, C. (2018). Global assessment of agricultural system redesign for sustainable intensification. *Nature Sustainability*, *1*(8), 441–446.

Puranik, V., Ranjan, A., & Kumari, A. (2019). Automation in agriculture and IoT. *2019 4th International Conference on Internet of Things: Smart Innovation and Usages (IoT-SIU)*, 1–6.

Puri, V., Nayyar, A., & Raja, L. (2017). Agriculture drones: A modern breakthrough in precision agriculture. *Journal of Statistics and Management Systems*, *20*(4), 507–518.

Rachmawati, R. R. (2020). Smart farming 4.0 untuk mewujudkan pertanian Indonesia maju, mandiri, dan modern. *Forum Penelitian Agro Ekonomi*, *38*(2), 137–154.

Rajaseger, G., Chan, K. L., Tan, K. Y., Ramasamy, S., Khin, M. C.,

Amaladoss, A., & Haribhai, P. K. (2023). Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformation*, *19*(9), 925.

Reganold, J. P., & Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, *2*(2), 1–8.

Resh, H. M. (2022). *Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower*. CRC Press. https://books.google.co.id/books?id=GKNjEAAAQBAJ

Rose, D. C., Sutherland, W. J., Parker, C., Lobley, M., Winter, M., Morris, C., Twining, S., Ffoulkes, C., Amano, T., & Dicks, L. V. (2016). Decision support tools for agriculture: Towards effective design and delivery. *Agricultural Systems*, *149*, 165–174.

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, *57*(7), 2117–2135.

Sachs, J. (2022). *Sustainable Development Report 2022*. Cambridge University Press. https://books.google.co.id/books?id=N5h-EAAAQBAJ

Sami, A., Xue, Z., Tazein, S., Arshad, A., He Zhu, Z., Ping Chen, Y., Hong, Y., Tian Zhu, X., & Jin Zhou, K. (2021). CRISPR–Cas9-based genetic engineering for crop improvement under drought stress. *Bioengineered*, *12*(1), 5814–5829.

Savelli, A., Atieno, M. O., Giles, J., Santos, J., Leyte, J. E. D., Nguyen, N. V. B., Koostanto, H., Sulaeman, Y., Douxchamps, S., & Grosjean, G. (2021). *Climate-Smart Agriculture in Indonesia*.

Schreefel, L., Schulte, R. P. O., De Boer, I. J. M., Schrijver, A. P., & Van Zanten, H. H. E. (2020). Regenerative agriculture–the soil is the base. *Global Food Security*, *26*, 100404.

Sekher, T., & Govil, D. (2022). World population day-2022 symposium & launch of united nations world population prospects-2022. *Columbia University*.

Sepúlveda-Muñoz, C. A., de Godos, I., & Muñoz, R. (2023). Wastewater treatment using photosynthetic microorganisms. *Symmetry*, *15*(2), 525.

Shinwari, Z. K., Jan, S. A., Nakashima, K., & Yamaguchi-Shinozaki, K. (2020). Genetic engineering approaches to understanding drought tolerance in plants. *Plant Biotechnology Reports*, *14*(2), 151–162.

Sindhu, S. S., Sehrawat, A., Sharma, R., & Khandelwal, A. (2017). Biological control of insect pests for sustainable agriculture. *Advances in Soil Microbiology: Recent Trends and Future Prospects: Volume 2: Soil-Microbe-Plant Interaction*, 189–218.

Soedarto, T., & Ainiyah, R. K. (2022). *Teknologi Pertanian Menjadi Petani Inovatif 5.0: Transisi Menuju Pertanian Modern*. Uwais Inspirasi Indonesia. https://books.google.co.id/books?id=6FuKEAAAQBAJ

Soemarie, Y. B., Milanda, T., & Barliana, M. I. (2021). Fermented foods as probiotics: A review. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, *12*(4), 335–339.

Sourav, A. I., & Emanuel, A. W. R. (2021). Recent trends of big data in precision agriculture: a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1096*(1), 12081.

Sriwahyuni, P., & Parmila, P. (2019). Peran Bioteknologi Dalam Pembuatan Pupuk Hayati. *Agro Bali: Agricultural Journal*, *2*(1), 46–57. https://doi.org/10.37637/ab.v2i1.369

Sun, D. W. (2014). *Emerging Technologies for Food Processing*. Academic Press. https://books.google.co.id/books?id=mgJ0AwAAQBAJ

Syahputra, R., & Soesanti, I. (2021). Renewable energy systems based on micro-hydro and solar photovoltaic for rural areas: A case study in Yogyakarta, Indonesia. *Energy Reports*, *7*, 472–490.

Thompson, A. K., Prange, R. K., Bancroft, R., & Puttongsiri, T. (2018). *Controlled Atmosphere Storage of Fruit and Vegetables, 3rd Edition*. CABI. https://books.google.co.id/books?id=myKADwAAQBAJ

Thornton, P. K., Boone, R. B., & Ramirez-Villegas, J. (2015). Climate change impacts on livestock. *SBSTA Submission for the AGN*.

Tilman, D., Balzer, C., Hill, J., & Befort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *108*(50), 20260–20264.

Tsatsakis, A. M., Nawaz, M. A., Kouretas, D., Balias, G., Savolainen, K., Tutelyan, V. A., Golokhvast, K. S., Lee, J. D., Yang, S. H., & Chung, G. (2017). Environmental impacts of genetically modified plants: A review. *Environmental Research*, *156*, 818–833.

Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. G. (2019). A review on

UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, *10*(11), 349.

Tzounis, A., Katsoulas, N., Bartzanas, T., & Kittas, C. (2017). Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. *Biosystems Engineering*, *164*, 31–48.

Vallejo-Gomez, D., Osorio, M., & Hincapie, C. A. (2023). Smart irrigation systems in agriculture: A systematic review. *Agronomy*, *13*(2), 342.

Van Ittersum, M. K., Van Bussel, L. G. J., Wolf, J., Grassini, P., Van Wart, J., Guilpart, N., Claessens, L., De Groot, H., Wiebe, K., & Mason-D'Croz, D. (2016). Can sub-Saharan Africa feed itself? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(52), 14964–14969.

Verma, A. (2024). Integration of Solar Energy in Agriculture Leads to Green Energy and Golden Crop Production. *Educational Administration: Theory and Practice, 30 (7), 261-266 Doi: 10.53555/Kuey. V30i7*, *6626*.

von Grebmer, K., Bernstein, J., Wiemers, M., Reiner, L., Bachmeier, M., Hanano, A., Towey, O., Chéilleachair, R. N., Foley, C., & Gitter, S. (2022). *2022 global Hunger Index: Food systems Transformation and local governance*.

Wang, Y., Han, J. H., & Beynon-Davies, P. (2019). Understanding blockchain technology for future supply chains: a systematic literature review and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal*, *24*(1), 62–84.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., & David, C. (2009). Agroecology as a science, a movement and a practice. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *29*, 503–515.

Wheeler, T., & Von Braun, J. (2013). Climate change impacts on global food security. *Science*, *341*(6145), 508–513.

Wiradinata, M. A., & Malik, A. (2024). INOVASI DAN TEKNOLOGI UNTUK MENDUKUNG PEMBANGUNAN EKONOMI BERKELANJUTAN DI ERA DIGITAL INDONESIA. *Jurnal Media Akademik (JMA)*, *2*(12).

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M.-J. (2017). Big data in smart farming–a review. *Agricultural Systems*, *153*, 69–80.

Wolt, J. D., Wang, K., & Yang, B. (2016). The regulatory status of genome-edited crops. *Plant Biotechnology Journal*, *14*(2), 510–

518.
Yadav, P., Yadav, S., Singh, D., & Giri, B. S. (2022). Sustainable rural waste management using biogas technology: An analytical hierarchy process decision framework. *Chemosphere*, *301*, 134737.
You, J., & Xiong, L. (2016). Genetic improvement of drought resistance in rice. In *Genetic manipulation in plants for mitigation of climate change* (pp. 73–102). Springer.
Zhang, B., & Mohammad, J. (2024). Sustainability of perishable food cold chain logistics: a systematic literature review. *SAGE Open*, *14*(3), 21582440241280456.
Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, *13*, 693–712.
Zhang, F., Wen, Y., & Guo, X. (2014). CRISPR/Cas9 for genome editing: progress, implications and challenges. *Human Molecular Genetics*, *23*(R1), R40–R46.
Zhang, N., Wang, M., & Wang, N. (2002). Precision agriculture—a worldwide overview. *Computers and Electronics in Agriculture*, *36*(2–3), 113–132.
Zhang, P., Du, H., Wang, J., Pu, Y., Yang, C., Yan, R., Yang, H., Cheng, H., & Yu, D. (2020). Multiplex CRISPR/Cas9-mediated metabolic engineering increases soya bean isoflavone content and resistance to soya bean mosaic virus. *Plant Biotechnology Journal*, *18*(6), 1384–1395.
Zhao, H., Di, L., Guo, L., Zhang, C., & Lin, L. (2023). An automated data-driven irrigation scheduling approach using model simulated soil moisture and evapotranspiration. *Sustainability*, *15*(17), 12908.
Zhou, R., & Yin, Y. (2023). Digital agriculture: Mapping knowledge structure and trends. *IEEE Access*, *11*, 103863–103880.

GLOSARIUM

Agroekologi	Pendekatan ilmiah dan praktis yang menggabungkan prinsip-prinsip ekologi dengan sistem pertanian untuk menciptakan keseimbangan antara produktivitas, konservasi lingkungan, dan kesejahteraan sosial.
Agroindustri	Sektor industri berbasis pertanian yang mencakup proses pengolahan, pengemasan, distribusi, dan pemasaran produk pertanian menjadi komoditas bernilai tambah.
Agroteknologi	Penerapan teknologi mutakhir dalam bidang pertanian yang mencakup alat, sistem, dan metode untuk meningkatkan efisiensi produksi, kualitas hasil, serta kelestarian sumber daya alam.
Bioteknologi	Cabang ilmu yang memanfaatkan prinsip biologi dan rekayasa genetika untuk mengembangkan varietas tanaman unggul, meningkatkan ketahanan terhadap hama, serta mengoptimalkan hasil pertanian secara berkelanjutan.
Drone	Perangkat udara nirawak yang digunakan dalam pertanian untuk pemetaan lahan, pemantauan tanaman, dan penyemprotan presisi guna meningkatkan efisiensi dan efektivitas kerja lapangan.
Ekosistem	Kesatuan dinamis antara makhluk hidup (biotik) dan lingkungan fisiknya (abiotik) dalam suatu wilayah tertentu yang saling berinteraksi dan membentuk sistem penunjang kehidupan.

Greenhouse	Bangunan tertutup yang dirancang untuk menciptakan iklim mikro ideal bagi tanaman, memungkinkan pengendalian suhu, kelembaban, dan pencahayaan guna mendukung produksi pertanian yang intensif dan berkelanjutan.
Irigasi	Sistem penyediaan dan pengelolaan air buatan yang digunakan untuk menunjang kebutuhan air tanaman secara tepat waktu dan tepat jumlah, terutama di lahan pertanian yang kurang menerima curah hujan.
IoT	Singkatan dari *Internet of Things*, yaitu integrasi teknologi digital melalui sensor dan perangkat pintar yang terhubung untuk mengumpulkan data dan mengelola proses pertanian secara otomatis dan efisien.
Kompos	Pupuk organik hasil dekomposisi bahan-bahan organik seperti limbah tanaman atau sisa makanan yang digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertanian berkelanjutan.
Pascapanen	Tahapan kegiatan setelah panen yang meliputi penyortiran, pembersihan, pengemasan, penyimpanan, dan distribusi hasil pertanian guna menjaga kualitas dan memperpanjang umur simpan produk.
Pemupukan	Proses pemberian unsur hara tambahan kepada tanaman melalui media tanam dengan tujuan meningkatkan pertumbuhan, perkembangan, dan hasil produksi tanaman.
Pestisida	Zat kimia atau biologis yang digunakan untuk mengendalikan hama, penyakit, dan gulma yang

	dapat mengganggu produktivitas tanaman, dengan tetap mempertimbangkan dampak lingkungan dan kesehatan.
Presisi	Konsep manajemen pertanian berbasis data spasial dan teknologi informasi yang bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan input secara akurat sesuai kondisi spesifik lahan dan tanaman.
Sensor	Perangkat elektronik yang mendeteksi dan merekam kondisi lingkungan seperti suhu, kelembaban, kadar air tanah, atau intensitas cahaya untuk mendukung pengambilan keputusan pertanian berbasis data.
Sustainabilitas	Prinsip keberlanjutan dalam pengelolaan sumber daya alam dan sistem produksi pertanian yang menjamin pemenuhan kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang.
Tanaman	Organisme hidup yang dibudidayakan dalam sistem pertanian untuk menghasilkan pangan, pakan, bahan baku industri, atau produk lain yang memiliki nilai ekonomi dan ekologis.
Traktor	Mesin pertanian bertenaga tinggi yang digunakan untuk membantu pengolahan tanah, penanaman, atau kegiatan mekanis lainnya guna meningkatkan efisiensi kerja di lahan pertanian.
Varietas	Jenis tanaman hasil seleksi alam atau rekayasa genetika yang memiliki karakteristik tertentu seperti ketahanan terhadap penyakit, produktivitas tinggi, dan adaptasi terhadap kondisi lingkungan tertentu.

Weather	Kondisi atmosfer harian seperti suhu, kelembaban, angin, dan curah hujan yang berpengaruh langsung terhadap pertumbuhan dan hasil produksi tanaman.

INDEKS

A

akademik · 18, 20
aksesibilitas · 59

B

big data · 4, 8, 9, 27, 30, 43, 62, 99, 100, 101, 102, 146, 147, 148, 156, 163, 166, 197, 203
blockchain · 62, 99, 103, 104, 105, 106, 107, 182, 186, 204

C

cloud · 36, 62, 164

D

digitalisasi · 2, 18, 20, 99, 163
distribusi · 6, 12, 16, 17, 18, 24, 29, 31, 32, 34, 36, 38, 47, 56, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 69, 77, 80, 88, 101, 105, 107, 113, 115, 116, 117, 136, 151, 152, 163, 170, 173, 174, 179, 184, 186, 187, 207, 208
domestik · 16, 153

E

e-commerce · 152
ekonomi · 1, 7, 8, 12, 17, 18, 36, 59, 69, 84, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 94, 96, 104, 133, 136, 138, 141, 142, 144, 145, 146, 147, 152, 169, 170, 175, 209
emisi · 8, 10, 11, 57, 60, 63, 65, 79, 81, 82, 85, 90, 91, 93, 95, 96, 97, 98, 129, 142, 173, 174

F

finansial · 112, 146, 148, 176
fiskal · 150
fleksibilitas · 18
fluktuasi · 10, 17, 59, 65, 81, 92, 101, 109, 116, 121, 142, 144, 146, 170
fundamental · 6, 12

G

genetika · 1, 2, 3, 10, 38, 68, 70, 71, 75, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 135, 136, 138, 139, 140, 152, 153, 156, 171, 184, 207, 209
geografis · 7, 114, 156
globalisasi · 59

I

infrastruktur · 11, 16, 19, 20, 29, 63, 64, 77, 94, 111, 114, 144, 149, 151, 152, 169, 170, 186, 187
inklusif · 19, 113, 144, 145, 154, 163, 171, 181, 182
inovatif · 2, 7, 13, 31, 37, 52, 64, 76, 82, 84, 100, 123, 124, 147, 152, 163, 172, 177, 182

integrasi · 6, 8, 9, 11, 19, 23, 32, 40, 41, 60, 91, 94, 110, 141, 156, 166, 170, 172, 183, 208
integritas · 104, 120
interaktif · 155
internet of things · 43
investasi · 5, 6, 11, 12, 17, 29, 149

K

kolaborasi · 12, 149, 155, 157, 175, 176, 177, 178, 180
komoditas · 11, 61, 116, 146, 168, 207
komprehensif · 9, 178
konkret · 75, 87
konsistensi · 5, 53
kredit · 179

M

manipulasi · 106, 119, 121, 186
mikroorganisme · 7, 10, 33, 59, 65, 66, 67, 70, 72, 73, 74, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 139, 143

N

negosiasi · 104
Nutrisi · 56

R

real-time · 3, 6, 7, 9, 27, 28, 30, 32, 36, 37, 40, 41, 44, 45, 47, 48, 50, 55, 57, 61, 62, 64, 65, 69, 99, 100, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 110, 111, 114, 116, 117, 164, 167, 182, 183, 186
regulasi · 138, 141, 147, 149, 152, 171, 175, 176, 177
relevansi · 178
revolusi · 21, 24, 51, 108, 166
robotika · 51, 52, 54, 55

S

stabilitas · 16, 104, 144, 146, 180
stakeholder · 4, 175
sustainability · 2, 191, 193, 197

T

transformasi · 3, 8, 11, 13, 19, 21, 24, 81, 84, 93, 154, 163, 168, 172, 181, 184
transparansi · 62, 99, 103, 104, 105, 113, 114, 115, 170, 186

V

varietas · 4, 10, 25, 26, 35, 39, 40, 47, 68, 75, 119, 121, 122, 123, 124, 133, 139, 140, 144, 147, 153, 169, 173, 176, 178, 180, 184, 207

BIOGRAFI PENULIS

Dr. Bayu Pratomo, S.S.T., M.P.

Lahir di Medan, 27 Januari 1988. Lulus S3 di Program Studi Ilmu Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Sumatera Utara pada Tahun 2021. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Prima Indonesia pada Program Studi Agroteknologi Fakultas Agro Teknologi. Penulis dapat dihubungi melaui : bayupratomo@unprimdn.ac.id

Nurul Istiqomah, S.P., M.P.

Lahir di Banjarmasin, 17 Desember 1980. Lulus S2 di Program Studi Agronomi Fakultas Pertanian Universitas Lambung Mangkurat tahun 2008. Tahun 2005 bekerja sebagai Dosen DPK Universitas PGRI Palangkaraya dan tahun 2010 pindah ke Sekolah Tinggi Ilmu Pertanian Amuntai Program Studi Agroteknologi.

I Putu Parmila, S.P., M.Si.

Lahir di Buleleng Provinsi Bali 22 Maret 1972 Lulus S2 di Program studi Manajemen Pertanian Lahan Kering Universitas Udayana (UNUD) Bali tahun 2004. Saat ini sebagai Dosen di Universitas Panji Sakti Singaraja pada Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian dan Teknik Universitas Panji Sakti (UNIPAS).

Retmono Agung Winarno, S.TP., M.Sc.

Retmono Agung Winarno, lahir di Semarang pada 02 Maret 1984 dan sekarang menetap di Medan, Sumatera Utara. Menyelesaikan Pendidikan S1 pada tahun 2006 di Fakultas Teknologi Pertanian Jurusan Teknologi Hasil Pertanian, Universitas Gadjah Mada. Pada tahun 2012 menyelesaikan Pendidikan S2 di Fakultas Pertanian Program Studi Magister Manajemen Agribisnis, Universitas Gadjah Mada. Pada Tahun 2019 melanjutkan karirnya sebagai dosen dengan bidang Ilmu Pengolahan Hasil Pertanian di Politeknik Pembangunan Pertanian (Polbangtan) Medan, Kementerian Pertanian.

AGROTEKNOLOGI MODERN

INOVASI DAN APLIKASI UNTUK PERTANIAN BERKELANJUTAN

Buku referensi "Agroteknologi Modern: Inovasi dan Aplikasi untuk Pertanian Berkelanjutan" membahas secara komprehensif perkembangan teknologi terkini yang diterapkan dalam sektor pertanian untuk menjawab tantangan produktivitas, efisiensi, dan keberlanjutan lingkungan. Melalui pendekatan multidisipliner, buku referensi ini membahas beragam inovasi seperti pertanian presisi, pemanfaatan Internet of Things (IoT), bioteknologi, dan otomasi, serta bagaimana teknologi tersebut diimplementasikan dalam praktik budidaya dan manajemen pertanian modern. Ditujukan bagi akademisi, peneliti, mahasiswa, dan praktisi pertanian, buku referensi ini tidak hanya membahas konsep teoritis tetapi juga aplikasi nyata yang relevan dengan kebutuhan pertanian masa kini dan masa depan.

PT MEDIA PENERBIT INDONESIA

mediapenerbitindonesia.com
+6281362150605
Penerbit Idn
@pt.mediapenerbitidn

ISBN 978-634-7305-02-2
9 786347 305022