PENGANTAR ILMU PERTANIAN MASA DEPAN

AJANG MARUAPEY

KBM INDONESIA

Pengantar

ILMU PERTANIAN MASA DEPAN

Inovasi Untuk Ketahanan Pangan Berkelanjutan

Ajang Maruapey

KBM INDONESIA

PENERBIT KBM INDONESIA
adalah penerbit dengan misi memudahkan proses penerbitan buku-buku penulis di tanah air Indonesia, serta menjadi media *sharing* proses penerbitan buku.

PENGANTAR ILMU PERTANIAN MASA DEPAN

Inovasi Untuk Ketahanan Pangan Berkelanjutan

Copyright @ 2026 By Ajang Maruapey

All right reserved

Penulis

Ajang Maruapey

Desain Sampul

Aswan Kreatif

Tata Letak

Husnud Diniyah

Editor

Dr. Muhamad Husein Maruapey, Drs., M.Sc.

Background isi buku di ambil dari https://www.freepik.com/

Official

Depok, Sleman-Jogjakarta (Kantor)

Penerbit Karya Bakti Makmur (KBM) Indonesia

Anggota IKAPI/No. IKAPI 279/JTI/2021

081357517526 (Tlpn/WA)

Website

https://penerbitkbm.com

www.penerbitbukumurah.com

Email

naskah@penerbitkbm.com

Distributor

https://penerbitkbm.com/toko-buku/

Youtube

Penerbit KBM Sastrabook

Instagram

@penerbit. kbmindonesia

@penerbitbukujogja

ISBN: 978-634-278-428-0

Cetakan ke-1, Juni 2026

15,5 x 23 cm, viii + 240 halaman

Isi buku diluar tanggungjawab penerbit
Hak cipta merek KBM Indonesia sudah terdaftar di DJKI-Kemenkumham
dan isi buku dilindungi undang-undang.

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa seizin penerbit karena beresiko sengketa hukum

Sanksi Pelanggaran Pasal 113
Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

i. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100. 000. 000 (seratus juta rupiah).
ii. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500. 000. 000,00 (lima ratus juta rupiah).
iii. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1. 000. 000. 000,00 (satu miliar rupiah).
iv. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 4. 000. 000. 000,00 (empat miliar rupiah).

PRAKATA

Buku ajar ini dirancang untuk membuka cakrawala pemikiran mengenai masa depan sektor pertanian, sebuah pilar fundamental bagi peradaban manusia. Di tengah persimpangan antara ledakan populasi, tekanan perubahan iklim, dan degradasi sumber daya alam, inovasi bukan lagi sebuah pilihan, melainkan sebuah keharusan absolut. Urgensi untuk mentransformasi sistem produksi pangan kita menjadi lebih tangguh, efisien, dan berkelanjutan menjadi landasan utama penyusunan buku ini. Tujuannya adalah untuk menyajikan sebuah kerangka kerja konseptual dan praktis yang mengintegrasikan teknologi-teknologi mutakhir dengan prinsip-prinsip ekologis. Dengan demikian, buku ini diharapkan dapat menjadi panduan esensial bagi para akademisi, praktisi, dan pembuat kebijakan dalam merumuskan strategi ketahanan pangan yang adaptif dan berwawasan jauh ke depan.

Penulis

Ajang Maruapey

KATA PENGANTAR

Kehadiran buku ajar ini di hadapan para pembaca, khususnya mahasiswa sebagai generasi penerus, merupakan buah dari kegelisahan akademis dan harapan besar terhadap masa depan pertanian. Penulis berharap karya ini tidak hanya menjadi sumber pengetahuan teoretis, tetapi juga pemantik semangat untuk berinovasi dan berkontribusi secara nyata dalam revolusi pertanian modern. Setiap bab di dalamnya dirancang untuk membangun pemahaman yang sistematis, dari landasan konseptual hingga aplikasi teknologi canggih yang sedang dan akan membentuk wajah pertanian global. Ucapan terima kasih yang tulus penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan, inspirasi, dan data berharga selama proses penulisan. Semoga buku ini mampu membekali para pembaca dengan wawasan yang mendalam dan relevan untuk menjawab tantangan-tantangan ketahanan pangan di abad ke-21.

Rektor Universitas Muhammadiyah Sorong

Muhamad Ali

DAFTAR ISI

PRAKATA ..... **i**
KATA PENGANTAR ..... **iii**
DAFTAR ISI ..... **v**

BAB 01.

LANDASAN PERTANIAN MASA DEPAN **1**
Tujuan Pembelajaran 1
Pendahuluan 1
Rangkuman Bab 14
Latihan Mahasiswa 15
Glosarium Bab 18
Daftar Pustaka Bab 19

BAB 02.

PERTANIAN PRESISI *(PRECISION AGRICULTURE)* **21**
Tujuan Pembelajaran 21
Pendahuluan 22
Rangkuman Bab 31
Latihan Mahasiswa 32
Glosarium Bab 35
Daftar Pustaka Bab 36

BAB 03.

PERTANIAN VERTIKAL *(VERTICAL FARMING)* **39**
Tujuan Pembelajaran 39
Pendahuluan 40
Rangkuman Bab 50

Latihan Mahasiswa 50
Glosarium Bab 54
Daftar Pustaka Bab 54

BAB 04.

BIOTEKNOLOGI PERTANIAN *(AGRICULTURAL BIOTECHNOLOGY)* 57
Tujuan Pembelajaran 57
Pendahuluan 58
Rangkuman Bab 68
Latihan Mahasiswa 69
Glosarium Bab 72
Daftar Pustaka Bab 73

BAB 05.

PERTANIAN ORGANIK DAN BIODINAMIK 75
Tujuan Pembelajaran 75
Pendahuluan 75
Rangkuman Bab 86
Latihan Mahasiswa 87
Glosarium Bab 90
Daftar Pustaka Bab 91

BAB 06.

NANOTEKNOLOGI DALAM PERTANIAN (NANOTECHNOLOGY IN AGRICULTURE) 93
Tujuan Pembelajaran 93
Pendahuluan 94
Rangkuman Bab 103
Latihan Mahasiswa 104
Glosarium Bab 107
Daftar Pustaka Bab 108

BAB 07.

ROBOTIKA DAN OTOMATISASI PERTANIAN *(AGRICULTURAL ROBOTICS AND AUTOMATION)* 111
Tujuan Pembelajaran 111
Pendahuluan 112
Rangkuman Bab 121
Latihan Mahasiswa 122
Glosarium Bab 125
Daftar Pustaka Bab 126

BAB 08.

KECERDASAN BUATAN *(ARTIFICIAL INTELLIGENCE)* DALAM PERTANIAN 129
Tujuan Pembelajaran 129
Pendahuluan 129
Rangkuman Bab 139
Latihan Mahasiswa 140
Glosarium Bab 143
Daftar Pustaka Bab 144

BAB 09.

SISTEM PERTANIAN TERPADU *(INTEGRATED FARMING SYSTEMS)* 147
Tujuan Pembelajaran 147
Pendahuluan 148
Rangkuman Bab 157
Latihan Mahasiswa 158
Glosarium Bab 161
Daftar Pustaka Bab 162

BAB 10.

PERTANIAN PERKOTAAN *(URBAN AGRICULTURE)* 165
Tujuan Pembelajaran 165
Pendahuluan 166

Rangkuman Bab....176
Latihan Mahasiswa....177
Glosarium Bab....180
Daftar Pustaka Bab....181

BAB 11.

PERAN KEBIJAKAN DAN KELEMBAGAAN DALAM PERTANIAN MASA DEPAN....183
Tujuan Pembelajaran....183
Pendahuluan....184
Rangkuman Bab....192
Latihan Mahasiswa....193
Glosarium Bab....196
Daftar Pustaka Bab....197

BAB 12.

PROSPEK DAN TANTANGAN PERTANIAN MASA DEPAN....199
Tujuan Pembelajaran....199
Pendahuluan....200
Rangkuman Bab....206
Latihan Mahasiswa....207
Glosarium Bab....210
Daftar Pustaka Bab....211

KESIMPULAN....213
REFERENSI....215
GLOSARIUM....229
PROFIL PENULIS....239

Bab 01.

LANDASAN PERTANIAN MASA DEPAN

Tujuan Pembelajaran

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan mampu:

1. Menjelaskan evolusi historis praktik pertanian dari masa lampau hingga era modern.
2. Menganalisis tantangan-tantangan global utama yang dihadapi sektor pertanian saat ini, termasuk pertumbuhan populasi, perubahan iklim, dan degradasi lahan.
3. Mendefinisikan konsep pertanian masa depan dan prinsip-prinsip dasar pertanian berkelanjutan.
4. Menguraikan hubungan fundamental antara ketahanan pangan, keamanan gizi, dan kelestarian lingkungan.
5. Mengidentifikasi keterkaitan antara Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) dengan sektor pertanian.
6. Menganalisis peran SDG 2, SDG 12, dan SDG 13 dalam membentuk arah kebijakan pertanian global.
7. Mengevaluasi urgensi transisi menuju sistem pertanian yang lebih inovatif dan berkelanjutan.

Pendahuluan

Sektor pertanian berada pada titik kritis dalam sejarah manusia. Pernahkah Anda membayangkan bagaimana sebuah sistem yang telah menopang peradaban selama ribuan tahun kini harus beradaptasi

dengan kecepatan perubahan yang belum pernah terjadi sebelumnya? Pertanian tidak lagi sekadar aktivitas bercocok tanam untuk memenuhi kebutuhan pangan, tetapi telah menjadi arena kompleks yang bersinggungan langsung dengan stabilitas ekonomi global, kesehatan ekosistem planet, dan kesejahteraan miliaran jiwa. Kompleksitas ini menuntut sebuah paradigma baru, sebuah visi untuk pertanian masa depan yang tidak hanya produktif, tetapi juga resilien dan berkelanjutan.

Pergeseran ini didorong oleh realitas yang tidak dapat dihindari. Populasi dunia terus bertambah, menciptakan permintaan pangan yang melonjak secara eksponensial (Silva et al., 2025). Pada saat yang sama, fondasi dari sistem produksi kita, yaitu lahan dan air, mengalami tekanan hebat akibat degradasi dan dampak perubahan iklim yang semakin nyata (Islam, 2025). Fenomena cuaca ekstrem, kekeringan berkepanjangan, dan munculnya hama penyakit baru menjadi tantangan rutin yang harus dihadapi oleh para petani di seluruh dunia. Konsekuensinya, ketahanan pangan global menjadi taruhan utama dalam percaturan ini.

Menjawab tantangan tersebut, konsep pertanian masa depan muncul sebagai sebuah respons strategis. Konsep ini melampaui sekadar peningkatan hasil panen secara linier (Rai & Singh, 2024). Ia mencakup integrasi holistik antara inovasi teknologi, kearifan ekologis, dan keadilan sosial. Pertanian masa depan adalah tentang bagaimana kita dapat memproduksi lebih banyak pangan dengan menggunakan lebih sedikit sumber daya, sekaligus meregenerasi kesehatan lingkungan dan meningkatkan kesejahteraan petani. Ini adalah sebuah visi yang ambisius namun mutlak diperlukan.

Bab ini akan berfungsi sebagai fondasi bagi seluruh pembahasan dalam buku ajar ini. Kita akan menelusuri jejak evolusi pertanian untuk memahami bagaimana kita sampai pada kondisi saat ini. Selanjutnya, kita akan membedah secara mendalam tantangan-tantangan global yang memaksa kita untuk berpikir ulang tentang cara kita berproduksi. Konsep pertanian berkelanjutan akan dielaborasi sebagai pilar utama,

yang menghubungkan tiga dimensi krusial: ekonomi, sosial, dan lingkungan.

Pembahasan juga akan dikontekstualisasikan dalam kerangka agenda pembangunan global. Tujuan Pembangunan Berkelanjutan atau *Sustainable Development Goals* (SDGs) yang dicanangkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa menyediakan peta jalan yang jelas tentang bagaimana pertanian harus berkontribusi pada pencapaian dunia yang lebih baik (Çakmakçi et al., 2025). Kita akan fokus pada tiga tujuan paling relevan, yaitu mengakhiri kelaparan (SDG 2), memastikan pola konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab (SDG 12), serta mengambil aksi iklim (SDG 13).

Pemahaman yang komprehensif terhadap landasan ini menjadi prasyarat untuk dapat mengapresiasi dan menganalisis berbagai inovasi yang akan dibahas pada bab-bab berikutnya. Dari pertanian presisi yang berbasis data hingga bioteknologi yang merevolusi genetika tanaman, semua solusi tersebut berakar pada prinsip-prinsip dasar yang akan kita bangun dalam bab ini. Mari kita mulai dengan menelusuri perjalanan panjang sektor yang paling esensial bagi eksistensi manusia ini.

1.1 Evolusi Pertanian dan Tantangan Global

Perjalanan pertanian adalah cerminan dari evolusi peradaban manusia itu sendiri. Transformasi dari masyarakat pemburu-pengumpul menjadi masyarakat agraris yang menetap merupakan salah satu lompatan paling signifikan dalam sejarah, yang memungkinkan perkembangan kota, spesialisasi kerja, dan struktur sosial yang kompleks. Memahami lintasan sejarah ini memberikan perspektif krusial untuk mengkontekstualisasikan tantangan-tantangan kontemporer yang dihadapi oleh sektor ini (Albahri et al., 2023). Tantangan yang ada saat ini bukanlah fenomena yang terisolasi, melainkan akumulasi dari berbagai tekanan yang telah berkembang seiring waktu, mulai dari peningkatan populasi hingga dampak ekologis dari praktik pertanian itu sendiri.

Analisis terhadap evolusi ini menunjukkan adanya beberapa revolusi besar dalam dunia pertanian. Revolusi Pertanian pertama, yang terjadi sekitar 10.000 tahun lalu, ditandai dengan domestikasi tanaman dan hewan. Kemudian, Revolusi Pertanian di era modern, yang sering disebut Revolusi Hijau pada pertengahan abad ke-20, membawa perubahan dramatis melalui pengenalan varietas unggul, pupuk sintetis, dan pestisida (Baumüller, 2025). Meskipun berhasil meningkatkan produksi pangan secara masif untuk mengimbangi pertumbuhan populasi, Revolusi Hijau juga meninggalkan warisan masalah lingkungan yang kini harus kita selesaikan, seperti degradasi tanah dan pencemaran air. Kini, kita berada di ambang revolusi pertanian berikutnya, yang didorong oleh teknologi digital dan bioteknologi, sebagai respons terhadap tantangan global yang semakin mendesak.

Contoh Kasus: Revolusi Hijau di Asia pada tahun 1960-an dan 1970-an secara dramatis meningkatkan produksi beras dan gandum, menyelamatkan jutaan orang dari kelaparan. Namun, studi jangka panjang di berbagai negara seperti India dan Filipina menunjukkan bahwa penggunaan input kimia yang masif dan tidak terkendali telah menyebabkan penurunan kesuburan tanah, salinisasi, dan kontaminasi sumber daya air (Islam, 2025). Kasus ini menjadi pelajaran penting bahwa peningkatan produktivitas tidak dapat dipisahkan dari keberlanjutan lingkungan. Pertanian masa depan harus belajar dari keberhasilan sekaligus kegagalan masa lalu untuk menciptakan sistem yang seimbang.

1.1.1 Sejarah perkembangan pertanian

Sejarah perkembangan pertanian dimulai dengan Revolusi Neolitikum, sebuah periode transisi fundamental di mana manusia mulai beralih dari gaya hidup nomaden berburu dan meramu ke kehidupan menetap dengan membudidayakan tanaman dan beternak hewan (Sultan, 2021). Pergeseran ini terjadi secara independen di berbagai belahan dunia, seperti di Bulan Sabit Subur, Tiongkok, dan Mesoamerika, dengan komoditas yang berbeda-beda sesuai dengan kondisi geografis lokal. Inovasi awal seperti alat bajak sederhana, irigasi, dan penyimpanan

hasil panen menjadi fondasi bagi peningkatan produksi dan keamanan pangan yang memungkinkan populasi manusia tumbuh.

Gambar 1. Ketika manusia mulai menggunakan alat bajak ssederhana
https://www.wikiwand.com/id/search?q=Agronomi#/media/Agronomi|File:Maler_der_Grabkammer_des_Sennudem_001.jpg

Memasuki era abad pertengahan hingga awal era modern, terjadi pertukaran tanaman dan teknologi pertanian antar benua, yang dikenal sebagai *Columbian Exchange*, yang secara signifikan memperkaya keragaman pangan global. Praktik seperti rotasi tanaman dan penggunaan pupuk kandang mulai disempurnakan di Eropa, meningkatkan efisiensi penggunaan lahan (Rai & Singh, 2024). Meskipun demikian, sebagian besar pertanian pada masa ini masih bersifat subsisten dan sangat bergantung pada tenaga kerja manusia dan hewan, dengan produktivitas yang relatif rendah dibandingkan standar modern.

Revolusi Industri pada abad ke-18 dan ke-19 memicu gelombang modernisasi berikutnya dalam pertanian. Mekanisasi mulai diperkenalkan melalui traktor uap dan mesin-mesin panen, yang secara drastis mengurangi kebutuhan tenaga kerja manusia dan meningkatkan skala operasi pertanian (Baumüller, 2025). Kemajuan dalam ilmu kimia juga melahirkan industri pupuk sintetis pertama, yang memberikan dorongan signifikan terhadap hasil panen dan menandai awal dari era pertanian intensif yang kita kenal hari ini.

Gambar 2. Mekanisasi pertanian mulai diperkenankan

1.1.2 Pertumbuhan populasi, perubahan iklim, dan degradasi lahan

Tantangan utama yang dihadapi pertanian kontemporer adalah tekanan dari pertumbuhan populasi global yang terus berlanjut. Proyeksi Perserikatan Bangsa-Bangsa menunjukkan bahwa populasi dunia akan mencapai hampir 10 miliar jiwa pada tahun 2050, yang berarti permintaan terhadap pangan akan meningkat lebih dari 50% dari level saat ini (Silva et al., 2025). Tekanan ini tidak hanya menuntut peningkatan volume produksi, tetapi juga produksi pangan yang lebih bergizi dan dapat diakses oleh semua lapisan masyarakat, menciptakan sebuah tantangan multidimensional bagi sistem pangan global.

Secara bersamaan, perubahan iklim menjadi ancaman eksistensial bagi produktivitas pertanian. Peningkatan frekuensi dan intensitas kejadian cuaca ekstrem, seperti gelombang panas, kekeringan, dan banjir, secara langsung merusak tanaman dan mengganggu siklus produksi (Thingujam et al., 2025). Pergeseran pola curah hujan dan kenaikan suhu rata-rata global juga mengubah kesesuaian agroklimat suatu wilayah untuk komoditas tertentu, serta memfasilitasi penyebaran hama dan penyakit tanaman ke area-area baru, yang semakin mempersulit upaya peningkatan produksi (Islam, 2025).

Degradasi lahan merupakan konsekuensi lanjutan yang memperburuk kedua tantangan sebelumnya. Praktik pertanian intensif yang tidak

berkelanjutan, seperti pengolahan tanah yang berlebihan, monokultur, dan penggunaan bahan kimia yang tidak bijaksana, telah menyebabkan erosi tanah, penipisan nutrisi, salinisasi, dan hilangnya keanekaragaman hayati tanah (Çakmakçi et al., 2025). Diperkirakan sepertiga dari tanah di dunia telah terdegradasi secara sedang hingga parah, yang secara signifikan mengurangi kapasitas produktifnya. Fenomena ini menciptakan lingkaran setan, di mana lahan yang semakin tidak subur membutuhkan lebih banyak input untuk menghasilkan panen yang sama, yang pada gilirannya dapat mempercepat degradasi lebih lanjut.

1.2 Konsep Pertanian Masa Depan

Pertanian masa depan merupakan sebuah konsep payung yang merangkum visi untuk sistem pangan yang tidak hanya produktif, tetapi juga berkelanjutan secara ekologis, adil secara sosial, dan layak secara ekonomi. Konsep ini bergerak melampaui paradigma pertanian konvensional yang semata-mata berfokus pada maksimalisasi hasil panen per unit area (Mitrofanov et al., 2025). Sebaliknya, ia menekankan pada optimalisasi dan efisiensi penggunaan sumber daya, seperti air, tanah, dan energi, sambil meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Esensinya adalah menciptakan sistem produksi yang tangguh, adaptif terhadap perubahan, dan mampu memenuhi kebutuhan generasi sekarang tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka.

Fondasi dari pertanian masa depan adalah integrasi antara ilmu pengetahuan dan teknologi canggih dengan prinsip-prinsip agroekologi. Di satu sisi, teknologi seperti pertanian presisi, bioteknologi, dan kecerdasan buatan menawarkan alat yang sangat kuat untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi limbah (Balyan et al., 2024). Di sisi lain, prinsip-prinsip agroekologi, seperti diversifikasi tanaman, pengelolaan kesehatan tanah, dan siklus nutrisi tertutup, memberikan kerangka kerja untuk membangun sistem pertanian yang meniru ketahanan dan stabilitas ekosistem alami. Sinergi antara kedua pendekatan inilah yang menjadi kunci untuk mewujudkan visi pertanian masa depan.

Gambar 3. Teknologi pertanian masa depan (Dron)
https://www.azolifesciences.com/article/How-are-Drones-Changing-the-Future-of-Agriculture.aspx

Analogi: Bayangkan sistem pertanian konvensional seperti seorang atlet yang hanya fokus pada latihan angkat beban untuk membangun otot (hasil panen) tanpa memperhatikan nutrisi, istirahat, dan fleksibilitas. Awalnya, ia mungkin menjadi sangat kuat dalam waktu singkat, tetapi dalam jangka panjang, ia rentan terhadap cedera, kelelahan, dan penurunan performa (degradasi lahan, wabah penyakit). Sebaliknya, pertanian masa depan adalah seperti seorang atlet *decathlon* yang melatih semua aspek kebugaran secara seimbang: kekuatan, daya tahan, kecepatan, dan kelincahan. Sistem ini mungkin tidak selalu memecahkan rekor dalam satu cabang (hasil panen maksimal sesaat), tetapi memiliki kesehatan dan ketahanan keseluruhan yang jauh lebih unggul untuk berkinerja secara konsisten dan berkelanjutan dalam menghadapi berbagai tantangan (perubahan iklim, kelangkaan sumber daya).

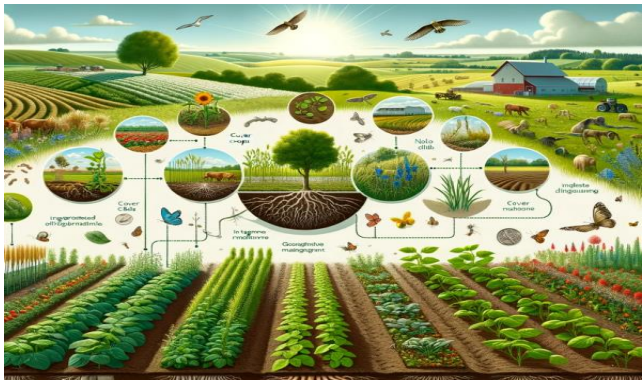
1.2.1 Definisi dan prinsip-prinsip pertanian berkelanjutan

Pertanian berkelanjutan didefinisikan sebagai sebuah sistem terintegrasi dari praktik produksi tanaman dan hewan yang memiliki aplikasi spesifik lokasi yang dalam jangka panjang akan memuaskan kebutuhan pangan dan serat manusia, meningkatkan kualitas lingkungan dan basis sumber daya alam yang menjadi sandaran

ekonomi pertanian, memanfaatkan sumber daya *on-farm* secara paling efisien dan tepat, serta meningkatkan kualitas hidup petani dan masyarakat secara keseluruhan (Çakmakçi et al., 2025). Definisi ini menggarisbawahi tiga pilar utama yang harus diseimbangkan, yaitu kelestarian lingkungan, kelayakan ekonomi, dan keadilan sosial.

Prinsip-prinsip yang mendasari pertanian berkelanjutan bersifat holistik dan saling terkait. Pertama, konservasi sumber daya alam menjadi prioritas, yang mencakup praktik-praktik seperti pengelolaan kesehatan tanah melalui penambahan bahan organik, konservasi air melalui teknik irigasi efisien, dan pelestarian keanekaragaman hayati baik di atas maupun di bawah permukaan tanah (Islam, 2025). Kedua, pertanian berkelanjutan berupaya mengurangi ketergantungan pada input eksternal yang tidak dapat diperbarui, seperti pupuk dan pestisida sintetis, dengan memaksimalkan proses-proses ekologis alami seperti siklus hara dan pengendalian hama biologis (Panday et al., 2024).

Prinsip ketiga adalah memastikan viabilitas ekonomi bagi para petani dan komunitas pedesaan. Ini berarti menciptakan sistem pertanian yang tidak hanya produktif tetapi juga menguntungkan, serta mengurangi risiko ekonomi melalui diversifikasi usaha tani dan akses pasar yang adil (Silva et al., 2025). Terakhir, prinsip keadilan sosial menekankan pentingnya kondisi kerja yang aman dan adil bagi para pekerja pertanian, serta kontribusi sistem pangan terhadap kesejahteraan dan ketahanan pangan masyarakat lokal. Keseimbangan antara keempat prinsip inilah yang menjadi inti dari upaya mewujudkan pertanian yang benar-benar berkelanjutan.



Gambar 4. Sistem pertanian Berkelanjutan
https://worldpermacultureassociation.com/regenerative-agriculture/

1.2.2 Ketahanan pangan, gizi, dan kelestarian lingkungan

Ketahanan pangan, keamanan gizi, dan kelestarian lingkungan merupakan tiga komponen yang tidak terpisahkan dan saling memperkuat dalam kerangka pertanian masa depan. Ketahanan pangan, sebagaimana didefinisikan oleh FAO, tercapai ketika semua orang, pada setiap saat, memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi untuk memenuhi kebutuhan gizi dan preferensi pangan mereka untuk kehidupan yang aktif dan sehat (Albahri et al., 2023). Konsep ini melampaui sekadar ketersediaan pangan di tingkat nasional, tetapi juga mencakup aksesibilitas dan stabilitas pasokan di tingkat rumah tangga dan individu.

Keamanan gizi merupakan dimensi kualitatif dari ketahanan pangan, yang berfokus pada aspek nutrisi dari pangan yang dikonsumsi (Galanakis, 2024). Sebuah sistem pertanian yang berhasil mungkin mampu memproduksi kalori dalam jumlah besar, tetapi jika tidak menyediakan keragaman pangan yang kaya akan mikronutrien, masalah seperti *stunting* dan penyakit degeneratif akan tetap ada. Oleh karena itu, pertanian masa depan harus secara eksplisit bertujuan untuk diversifikasi produksi, mempromosikan tanaman pangan lokal yang kaya gizi, dan memastikan bahwa pangan yang sehat menjadi pilihan yang paling terjangkau dan mudah diakses oleh masyarakat.

Kelestarian lingkungan menjadi fondasi yang memungkinkan ketahanan pangan dan gizi dapat terwujud dalam jangka panjang. Sistem pertanian yang merusak basis sumber daya alamnya, seperti mencemari air, mengerosi tanah, dan mengurangi keanekaragaman hayati, pada dasarnya sedang menggergaji cabang yang didudukinya sendiri (Çakmakçi et al., 2025). Praktik pertanian berkelanjutan yang menjaga kesehatan ekosistem tidak hanya memastikan produktivitas di masa depan, tetapi juga menyediakan jasa-jasa ekosistem vital, seperti penyerbukan, pengendalian hama alami, dan regulasi siklus air, yang semuanya krusial untuk stabilitas produksi pangan.

1.3 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) terkait Pertanian

Agenda 2030 untuk Pembangunan Berkelanjutan, dengan 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals* atau SDGs) di intinya, menyediakan kerangka kerja universal untuk perdamaian dan kemakmuran bagi manusia dan planet, sekarang dan di masa depan. Sektor pertanian memegang peranan sentral dalam pencapaian sebagian besar tujuan ini, tidak hanya yang secara eksplisit terkait dengan pangan, tetapi juga yang berhubungan dengan pengentasan kemiskinan, kesehatan, kesetaraan gender, air bersih, dan aksi iklim (Islam, 2025). Keterkaitan ini menempatkan transformasi sektor pertanian sebagai prasyarat untuk keberhasilan agenda pembangunan global secara keseluruhan.

Transformasi sistem pangan dan pertanian yang sejalan dengan SDGs menuntut pendekatan yang terintegrasi dan tidak lagi sektoral. Upaya untuk meningkatkan produktivitas (terkait SDG 2) harus dilakukan dengan cara-cara yang juga mendukung pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan (terkait SDG 12 dan 15) dan berkontribusi pada mitigasi serta adaptasi perubahan iklim (terkait SDG 13) (Baumüller, 2025). Kegagalan untuk mengadopsi pendekatan holistik ini akan berisiko menciptakan *trade-offs*, di mana kemajuan dalam satu tujuan justru mengorbankan kemajuan di tujuan lainnya, seperti peningkatan produksi pangan yang menyebabkan deforestasi atau polusi air.

Gambar : Pertanian berkelanjutan bersahabat dengan lingkungan
https://dppp.pontianak.go.id/artikel/29-bersahabat-dengan-lingkungan-melalui-pertanian-berkelanjutan.html

Contoh Kasus: Program intensifikasi pertanian di beberapa negara berkembang berhasil meningkatkan ketersediaan pangan (mendukung SDG 2) tetapi seringkali bergantung pada subsidi besar untuk pupuk kimia. Praktik ini, jika tidak dikelola dengan baik, dapat menyebabkan limpasan nitrogen dan fosfor ke badan air, menyebabkan eutrofikasi yang merusak ekosistem perairan (bertentangan dengan SDG 14, Kehidupan Bawah Air) dan melepaskan gas rumah kaca dinitrogen oksida (bertentangan dengan SDG 13, Aksi Iklim). Sebaliknya, pendekatan pertanian terpadu yang menggabungkan tanaman, ternak, dan perikanan dapat meningkatkan produktivitas secara berkelanjutan (SDG 2), mengurangi limbah melalui daur ulang nutrisi (SDG 12), dan meningkatkan pendapatan petani (SDG 1, Tanpa Kemiskinan) secara simultan.

1.3.1 SDG 2 (Tanpa Kelaparan)

SDG 2, "Mengakhiri Kelaparan, Mencapai Ketahanan Pangan dan Gizi yang Lebih Baik, serta Mempromosikan Pertanian Berkelanjutan," adalah tujuan yang paling langsung berhubungan dengan sektor pertanian. Target-target di bawah tujuan ini secara eksplisit menyerukan peningkatan produktivitas dan pendapatan petani kecil, memastikan sistem produksi pangan yang berkelanjutan, dan menerapkan praktik pertanian tangguh yang dapat beradaptasi dengan

perubahan iklim (Mitrofanov et al., 2025). Hal ini menegaskan bahwa solusi untuk kelaparan tidak hanya terletak pada peningkatan kuantitas produksi, tetapi juga pada bagaimana produksi tersebut dicapai dan didistribusikan.

Untuk mencapai target-target ini, diperlukan investasi yang signifikan dalam penelitian dan pengembangan varietas tanaman yang lebih produktif, bergizi, dan tahan terhadap cekaman lingkungan (Albahri et al., 2023). Selain itu, pemberdayaan petani kecil, yang merupakan produsen pangan utama di banyak negara berkembang, menjadi kunci melalui peningkatan akses mereka terhadap teknologi, pasar, informasi, dan layanan keuangan. Inovasi seperti pertanian digital dan *mobile banking* menunjukkan potensi besar dalam mempercepat proses ini dan membuat sistem pangan lebih inklusif.

1.3.2 SDG 12 (Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab)

SDG 12 menyerukan untuk "Memastikan Pola Konsumsi dan Produksi yang Berkelanjutan," yang memiliki implikasi mendalam bagi seluruh rantai nilai pangan, dari ladang hingga meja makan. Dalam konteks produksi, target 12.2 menuntut pengelolaan yang efisien dan penggunaan sumber daya alam yang berkelanjutan, yang secara langsung berkaitan dengan praktik pertanian (Çakmakçi et al., 2025). Ini berarti mengurangi jejak lingkungan dari pertanian dengan meminimalkan penggunaan air, energi, dan input kimia per unit output.

Salah satu target paling krusial di bawah SDG 12 adalah target 12.3, yang bertujuan untuk mengurangi separuh limbah pangan per kapita global di tingkat ritel dan konsumen, serta mengurangi kehilangan pangan di sepanjang rantai produksi dan pasokan (Galanakis, 2024). Kehilangan dan pemborosan pangan merupakan inefisiensi masif dalam sistem pangan saat ini, di mana sekitar sepertiga dari semua makanan yang diproduksi untuk konsumsi manusia hilang atau terbuang. Mengatasi masalah ini melalui perbaikan teknik panen, penyimpanan, pengolahan, dan distribusi dapat secara signifikan meningkatkan ketersediaan pangan tanpa perlu memperluas lahan pertanian.

1.3.3 SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim)

SDG 13, "Mengambil Tindakan Segera untuk Memerangi Perubahan Iklim dan Dampaknya," menempatkan sektor pertanian dalam posisi yang unik, karena ia merupakan bagian dari masalah sekaligus bagian dari solusi. Pertanian, kehutanan, dan penggunaan lahan lainnya menyumbang sekitar seperempat dari emisi gas rumah kaca global, terutama melalui pelepasan metana dari peternakan, dinitrogen oksida dari pupuk, dan karbon dioksida dari deforestasi (Islam, 2025). Oleh karena itu, dekarbonisasi sektor pertanian menjadi agenda yang mendesak.

Pada saat yang sama, pertanian menawarkan beberapa solusi berbasis alam yang paling menjanjikan untuk mitigasi perubahan iklim. Praktik-praktik pertanian regeneratif, seperti *agroforestry*, pertanian tanpa olah tanah, dan penggunaan tanaman penutup tanah, dapat meningkatkan penyerapan karbon dari atmosfer dan menyimpannya di dalam tanah dan biomassa (Ramanjaneyulu, 2025). Selain itu, adaptasi sektor pertanian terhadap dampak perubahan iklim yang tak terhindarkan, seperti melalui pengembangan sistem peringatan dini, asuransi iklim, dan varietas tanaman yang tahan kekeringan atau banjir, adalah kunci untuk melindungi ketahanan pangan dan mata pencaharian jutaan orang.

Rangkuman Bab

- Evolusi pertanian telah melalui beberapa revolusi, dari Neolitikum hingga Revolusi Hijau, dan kini berada di ambang revolusi digital dan bioteknologi.
- Tantangan global utama yang dihadapi pertanian saat ini adalah tekanan dari pertumbuhan populasi, dampak negatif perubahan iklim, dan degradasi sumber daya lahan yang meluas.
- Pertanian masa depan adalah konsep holistik yang bertujuan untuk menciptakan sistem pangan yang produktif, berkelanjutan secara ekologis, adil secara sosial, dan layak secara ekonomi.

- Pertanian berkelanjutan didasarkan pada prinsip-prinsip konservasi sumber daya alam, minimalisasi input eksternal, viabilitas ekonomi bagi petani, dan keadilan sosial.
- Ketahanan pangan, keamanan gizi, dan kelestarian lingkungan adalah tiga pilar yang saling bergantung dan harus dicapai secara simultan.
- Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) menyediakan kerangka kerja global untuk transformasi sektor pertanian, dengan SDG 2 (Tanpa Kelaparan), SDG 12 (Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab), dan SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim) menjadi yang paling sentral.

Latihan Mahasiswa

Soal Esai

1. Jelaskan bagaimana Revolusi Hijau pada abad ke-20 berhasil meningkatkan produksi pangan global, namun sekaligus menciptakan tantangan-tantangan lingkungan baru yang harus diatasi oleh pertanian masa depan!
2. Analisis hubungan timbal balik antara tiga tantangan global utama: pertumbuhan populasi, perubahan iklim, dan degradasi lahan. Bagaimana ketiganya saling memperkuat dan menciptakan tekanan yang kompleks pada sistem pertanian?
3. Definisikan konsep pertanian berkelanjutan dengan menggunakan tiga pilar utamanya (lingkungan, ekonomi, sosial). Berikan contoh praktik pertanian spesifik yang dapat memenuhi ketiga pilar tersebut secara bersamaan!
4. Mengapa ketahanan pangan tidak dapat dipisahkan dari keamanan gizi dan kelestarian lingkungan? Jelaskan argumen Anda dengan memberikan contoh konkret!
5. Pilih salah satu dari tiga SDGs yang dibahas dalam bab ini (SDG 2, 12, atau 13) dan uraikan secara mendalam bagaimana transformasi sektor pertanian dapat berkontribusi secara signifikan terhadap pencapaian tujuan tersebut!

Soal Pilihan Ganda

1. Manakah dari berikut ini yang BUKAN merupakan tantangan global utama yang mendorong kebutuhan akan pertanian masa depan?
   A. Penurunan populasi global
   B. Perubahan iklim dan cuaca ekstrem
   C. Degradasi lahan dan penipisan kesuburan tanah
   D. Peningkatan permintaan pangan -V-

2. Konsep pertanian berkelanjutan menyeimbangkan tiga pilar utama, yaitu...
   A. Produktivitas, Profitabilitas, dan Popularitas
   B. Lingkungan, Ekonomi, dan Sosial -V-
   C. Teknologi, Tradisi, dan Tenaga Kerja
   D. Lahan, Air, dan Udara

3. Target untuk mengurangi separuh limbah dan kehilangan pangan dari ladang hingga meja makan termasuk dalam...
   A. SDG 2 (Tanpa Kelaparan)
   B. SDG 13 (Penanganan Perubahan Iklim)
   C. SDG 12 (Konsumsi dan Produksi Bertanggung Jawab) -V-
   D. SDG 15 (Ekosistem Daratan)

4. Praktik-praktik seperti *agroforestry* dan pertanian tanpa olah tanah berkontribusi pada penanganan perubahan iklim (SDG 13) terutama melalui...
   A. Peningkatan penggunaan pestisida sintetis
   B. Peningkatan penyerapan karbon dari atmosfer ke dalam tanah -V-
   C. Peningkatan penggunaan irigasi
   D. Peningkatan skala monokultur

5. Revolusi pertanian pertama yang menandai transisi dari masyarakat berburu-meramu ke masyarakat menetap dikenal sebagai...
   A. Revolusi Industri
   B. Revolusi Hijau

C. Revolusi Neolitikum -V-
D. Revolusi Digital

6. Dimensi kualitatif dari ketahanan pangan yang berfokus pada aspek nutrisi dari pangan yang dikonsumsi adalah...
   A. Ketersediaan pangan
   B. Aksesibilitas pangan
   C. Keamanan gizi -V-
   D. Stabilitas pasokan

7. Pelepasan gas rumah kaca seperti metana dari peternakan dan dinitrogen oksida dari pupuk merupakan kontribusi sektor pertanian terhadap...
   A. Degradasi lahan
   B. Perubahan iklim -V-
   C. Kehilangan keanekaragaman hayati
   D. Pencemaran air

8. Apa tujuan utama dari konsep pertanian masa depan?
   A. Memaksimalkan hasil panen dengan cara apapun
   B. Mengembalikan pertanian ke metode tradisional sepenuhnya
   C. Menciptakan sistem pangan yang produktif, tangguh, dan berkelanjutan -V-
   D. Menghapus sepenuhnya penggunaan teknologi dalam pertanian

9. Manakah dari pernyataan berikut yang paling tepat menggambarkan hubungan antara pertanian dan SDGs?
   A. Pertanian hanya relevan untuk SDG 2 (Tanpa Kelaparan).
   B. Pertanian memegang peranan sentral dalam pencapaian berbagai SDGs, termasuk kemiskinan, kesehatan, air, dan iklim. -V-
   C. Pertanian tidak memiliki kaitan langsung dengan SDGs.
   D. SDGs hanya berfokus pada isu-isu industri dan perkotaan.

10. Konsekuensi jangka panjang dari penggunaan input kimia yang masif selama Revolusi Hijau adalah...
    A. Peningkatan permanen kesuburan tanah
    B. Penurunan kasus hama dan penyakit
    C. Penurunan kualitas tanah dan pencemaran air -V-
    D. Peningkatan keanekaragaman hayati pertanian

Studi Kasus atau Tugas Kontekstual

1. Pilih sebuah komunitas pertanian lokal di daerah Anda atau yang Anda kenal baik. Identifikasi tantangan-tantangan spesifik yang mereka hadapi yang sejalan dengan tantangan global yang dibahas dalam bab ini (misalnya, kekeringan, penurunan kesuburan tanah, kesulitan akses pasar). Rumuskan tiga rekomendasi awal berdasarkan prinsip-prinsip pertanian berkelanjutan untuk mulai mengatasi masalah tersebut. Sajikan analisis Anda dalam bentuk laporan singkat (1-2 halaman).
2. Bentuk kelompok dan lakukan riset tentang inisiatif pertanian berkelanjutan yang telah diterapkan di Indonesia. Setiap kelompok memilih satu inisiatif (misalnya, sistem pertanian terpadu, pertanian organik bersertifikat, atau *agroforestry*). Presentasikan di depan kelas mengenai: (a) Latar belakang dan tujuan inisiatif, (b) Praktik-praktik yang diterapkan, (c) Bagaimana inisiatif tersebut menjawab pilar-pilar keberlanjutan (lingkungan, sosial, ekonomi), dan (d) Kontribusinya terhadap pencapaian SDG 2, 12, dan 13.

Glosarium Bab

- **Agroekologi**: Studi tentang proses-proses ekologis yang diterapkan pada sistem produksi pertanian.
- **Degradasi Lahan**: Proses penurunan kualitas dan produktivitas tanah akibat aktivitas manusia atau proses alam, seperti erosi, salinisasi, dan penipisan nutrisi.
- **Ketahanan Pangan**: Kondisi di mana semua orang, pada setiap saat, memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi.

- **Pertanian Berkelanjutan**: Sistem pertanian yang menyeimbangkan kelestarian lingkungan, kelayakan ekonomi, dan keadilan sosial untuk memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan generasi mendatang.
- **Revolusi Hijau**: Periode peningkatan pesat produksi pertanian pada pertengahan abad ke-20 melalui penggunaan varietas tanaman unggul, pupuk sintetis, pestisida, dan irigasi.
- ***Sustainable Development Goals*** **(SDGs)**: Kumpulan 17 tujuan global yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa sebagai agenda pembangunan berkelanjutan hingga tahun 2030.

Daftar Pustaka Bab

Albahri, G., Alyamani, A., Badran, A., Hijazi, A., Nasser, M., Maresca, M., & Baydoun, E. (2023). Enhancing Essential Grains Yield for Sustainable Food Security and Bio-Safe Agriculture through Latest Innovative Approaches. *Agronomy*, 13(7), 1709. https://doi.org/10.3390/agronomy13071709

Balyan, S., Jangir, H., Tripathi, S., Tripathi, A., Jhang, T., & Pandey, P. (2024). Seeding a Sustainable Future: Navigating the Digital Horizon of Smart Agriculture. *Sustainability*, 16(2), 475. https://doi.org/10.3390/su16020475

Baumüller, H. (2025). Science for Africa's future food security: Valuing tradition and embracing innovation to accelerate the digital transformation of African food and agriculture systems. *Food Security*. https://doi.org/10.1007/s12571-025-01570-4

Çakmakçi, R., Çakmakçı, S., & Çakmakçi, M. (2025). Principles of environmentally sustainable agriculture for building resilient and resource-efficient food systems. *Turkish Journal of Biology*, 49, 550-584. https://doi.org/10.55730/1300-0152.2764

Galanakis, C. (2024). The Future of Food. *Foods*, 13(4), 506. https://doi.org/10.3390/foods13040506

Islam, S. (2025). Agriculture, food security, and sustainability: a review. *Exploration of Foods and Foodomics*. https://doi.org/10.37349/eff.2025.101082

Mitrofanov, S., Kakieva, S., & Muklukov, D. (2025). Agricultural innovations: impact on food security. *Ekonomika I upravlenie: problemy, resheniya*. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.01.06.011

Panday, D., Bhusal, N., Das, S., & Ghalehgolabbehbahani, A. (2024). Rooted in Nature: The Rise, Challenges, and Potential of Organic Farming and Fertilizers in Agroecosystems. *Sustainability*. https://doi.org/10.3390/su16041530

Rai, E., & Singh, S. (2024). Revolutionizing Agricultural Advancement: Exploring Innovations And Sustainable Practices For Future Food Security. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*. https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v5.i6.2024.4475

Ramanjaneyulu, B. (2025). Role of Organic and Natural Farming in Regenerative Agriculture. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.75435

Silva, J., Machado, K., De Souza Silva, A., Dias, R., Bodnar, V., Vieira, W., Moreno-Pizani, M., Ramos, J., Pauli, I., & Costa, L. (2025). Challenges and Opportunities for New Frontiers and Technologies to Guarantee Food Production. *Sustainability*, 17(9), 3792. https://doi.org/10.3390/su17093792

Sultan, D. (2021). Future prospects for sustainable agricultural development. *International Journal of Modern Agriculture and Environment*. https://doi.org/10.21608/ijmae.2023.215952.1012

Thingujam, D., Gouli, S., Cooray, S., Chandran, K., Givens, S., Gandhimeyyan, R., Tan, Z., Wang, Y., Patam, K., Greer, S., Acharya, R., Moseley, D., Osman, N., Zhang, X., Brooker, M., Tagert, M., Schafer, M., Jeong, C., Hoffseth, K., Bheemanahalli, R., Wyss, J., Wijewardane, N., Ham, J., & Mukhtar, M. (2025). Climate-Resilient Crops: Integrating AI, Multi-Omics, and Advanced Phenotyping to Address Global Agricultural and Societal Challenges. *Plants*, 14. https://doi.org/10.3390/plants14172699

REFERENSI

Abdalraheem, D. (2025). Food Science and Biotechnology: Advancing Sustainable Agriculture and Food Security. *Journal of Geoscience and Eco Agricultural Studies*. https://doi.org/10.63721/25jgeas0112

Aker, J. C., & Ghosh, I. (2020). The future of agricultural extension and advisory services in the digital age. In *The Role of Small Farms in Food and Nutrition Security* (pp. 123-146). Springer.

Al-Chalabi, M. (2015). Vertical farming: Skyscraper sustainability?. *Sustainable Cities and Society*, 18, 74-77. https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.06.003

Al-Juthery, H. W., Al-Taee, R. A., Al-Obaidi, Z. H., Ali, E. A. M., & Lahmod, N. R. (2023). A review of the effects of nano-fertilizers on the intensive cropping system. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 30(1), 384-403. https://doi.org/10.1080/25765299.2023.2246717

Albahri, G., Alyamani, A., Badran, A., Hijazi, A., Nasser, M., Maresca, M., & Baydoun, E. (2023). Enhancing Essential Grains Yield for Sustainable Food Security and Bio-Safe Agriculture through Latest Innovative Approaches. *Agronomy*, 13(7), 1709. https://doi.org/10.3390/agronomy13071709

Algopishi, U., Abdelghffar, A., Aboud, N., Safhi, F., Fayad, E., Alharbi, K., AlJwaizea, N., & Hassanin, A. (2025). The genetic applications of plant cell and tissue culture techniques: Essential tools for genetic manipulation and crop improvement. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. https://doi.org/10.15835/nbha53314718

Anjanappa, R., & Gruissem, W. (2021). Current progress and challenges in crop genetic transformation. *Journal of Plant Physiology*, 261, 153411. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2021.153411

Aslin, A., & Wogan, A. (2022). Reframing agricultural innovation systems: a new framework for analysis. *Outlook on Agriculture*, 51(2), 143-152. https://doi.org/10.1177/00307270221094595

Avgoustaki, D. D., & Xydis, G. (2020). How energy innovation in indoor vertical farming can improve food security, sustainability, and food safety?. *Future Foods*, 1-2, 100002. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2020.100002

Balyan, S., Jangir, H., Tripathi, S., Tripathi, A., Jhang, T., & Pandey, P. (2024). Seeding a Sustainable Future: Navigating the Digital Horizon of Smart Agriculture. *Sustainability*, 16(2), 475. https://doi.org/10.3390/su16020475

Baumüller, H. (2025). Science for Africa's future food security: Valuing tradition and embracing innovation to accelerate the digital transformation of African food and agriculture systems. *Food Security*. https://doi.org/10.1007/s12571-025-01570-4

Benis, K., & Ferrao, P. (2018). Potential of rooftop farming in urban sustainability and resilience: a case study in Lisbon. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4526-4541. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.057

Benke, K., & Tomkins, B. (2017). Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 13(1), 13-26. https://doi.org/10.1080/15487733.2017.1394054

Bhat, A. H., Wani, M. A., Laskar, M. A., & Ganie, S. A. (2023). Integrated farming system: a tool for achieving nutritional security and livelihood of small and marginal farmers. *Food Reviews International*, 1-24. https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2201977

Çakmakçi, R., Çakmakçı, S., & Çakmakçi, M. (2025). Principles of environmentally sustainable agriculture for building resilient and resource-efficient food systems. *Turkish Journal of Biology*, 49, 550-584. https://doi.org/10.55730/1300-0152.2764

Ciută, F., Tudor, A., & Lagunovschi, V. (2022). Research on vegetable farming in vertical hydroponic system. *Global NEST International Conference on Environmental Science & Technology*. https://doi.org/10.30955/gnc2021.00503

Clinton, N., Stuhlmacher, M., Miles, A., Aragon, N. U., Wagner, M., Georgescu, M., ... & Gong, P. (2018). A Global-scale data set of urban gardens. *Remote Sensing of Environment*, 211, 240-253. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.004

Dalólio, F. S., da Silva, J. A., de Souza, R. T. G., & de Oliveira, J. B. (2022). Integrated farming systems: a review. *Australian Journal of Crop Science*, 16(11), 1361-1372. https://doi.org/10.21475/ajcs.22.16.11.p3745

Dolce, L. E., Bocco, M. R., & Naoki, K. (2021). Contribution of agroforestry systems to the conservation of birds and their ecosystem services in Latin America: a review. *Ecología Austral*, 31(2), 246-267.

Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., & Grieve, B. (2018). Agricultural Robotics: The Future of Robotic Agriculture. *arXiv preprint arXiv:1806.06762*.

Dutta, M., Gupta, D., Tharewal, S., Goyal, D., Sandhu, J., Kaur, M., Alzubi, A., & Alanazi, J. (2025). Internet of Things-Based Smart Precision Farming in Soilless Agriculture: Opportunities and Challenges for Global Food Security. *IEEE Access*, 13, 34238-34268. https://doi.org/10.1109/access.2025.3540317

Eastwood, C., Klerkx, L., & Nettle, R. (2019). The sociology of agricultural extension: a critical review and a research agenda. *Journal of Rural Studies*, 67, 104-115. https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.02.008

El-Saadony, M. T., ALmoshadak, A. S., Shafi, M. E., Albaqami, N. M., Saad, A. M., & El-Tahan, A. M. (2022). The integration of nanotechnology with precision agriculture: a promising approach for sustainable agriculture. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(24), 16075. https://doi.org/10.3390/ijms232416075

Eli-Chukwu, N. C. (2019). Applications of artificial intelligence in agriculture: A review. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 9(4), 4377-4383.

Finger, R. (2023). Digital innovations for sustainable and resilient agricultural systems. *European Review of Agricultural Economics*, 51(3), 619-666. https://doi.org/10.1093/erae/jbad021

Foix, S., Alenyà, G., & Torras, C. (2020). A review on manipulation for agricultural robotics. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61, 101844. https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101844

Fraceto, L. F., Grillo, R., de Medeiros, G. A., Scognamiglio, V., Rea, G., & Bartolucci, C. (2016). Nanotechnology in agriculture: Which innovation potential does it have?. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 1. https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.0001

Frei, M., & Becker, K. (2005). Integrated rice-fish culture: coupled production saves resources. *Natural Resources Forum*, 29(2), 135-143. https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2005.00122.x

Galanakis, C. (2024). The Future of Food. *Foods*, 13(4), 506. https://doi.org/10.3390/foods13040506

Goldstein, B., Hausknost, D., & Kumnig, S. (2016). The potential of urban agriculture to contribute to urban food security. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(11), 1067. https://doi.org/10.3390/ijerph13111067

Guebsi, R., Mami, S., & Chokmani, K. (2024). Drones in Precision Agriculture: A Comprehensive Review of Applications, Technologies, and Challenges. *Drones*, 8(11), 686. https://doi.org/10.3390/drones8110686

Hossain, M., Ali, M., & Rahimi, M. (2025). Assessing the Potential and Limitations of Organic Farming for Sustainable Agriculture in Bangladesh. *Environmental Challenges*, 10, 101346. https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101346

Islam, S. (2025). Agriculture, food security, and sustainability: a review. *Exploration of Foods and Foodomics*. https://doi.org/10.37349/eff.2025.101082

Jha, K., Doshi, A., Patel, P., & Shah, M. (2019). A comprehensive review on automation in agriculture using artificial intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 2, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.05.004

Juhi, A. (2025). Crop Production And Genomic Science. *International Journal of Environmental Sciences*. https://doi.org/10.64252/cbz8bx80

Kah, M., Kookana, R. S., Gogos, A., & Bucheli, T. D. (2018). A critical evaluation of nanopesticides and nanofertilizers against their conventional analogues. *Nature Nanotechnology*, 13(8), 627-638. https://doi.org/10.1038/s41565-018-0131-1

Karg, M., & Schöttl, S. (2023). Socio-economic challenges of automation and robotics in agriculture: a review. *Agronomy*, 13(4), 1085. https://doi.org/10.3390/agronomy13041085

Karim, M. E., Islam, M. S., Kundu, S., & Roy, B. (2023). Integrated rice-fish farming system: A potential strategy for improving yield, farm income and resource use efficiency. *Aquaculture*, 575, 739763. https://doi.org.10.1016/j.aquaculture.2023.739763

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016

Khatri, D., Bardhan, M., & Agrawal, K. (2024). A systematic review on agricultural robotics: The pioneers, advancements, and challenges. *Robotics and Autonomous Systems*, 172, 104593. https://doi.org/10.1016/j.robot.2023.104593

Klerkx, L., & Begemann, S. (2020). The contribution of agricultural education to competence development for the agricultural innovation systems of the future: a prospective study. *Journal of Agricultural Education and Extension*, 26(2), 131-149. https://doi.org/10.1080/1389224X.2020.1723592

Kumar, A., Mehta, A., Yadav, A., & Kumari, K. (2024). Advanced Horticultural Techniques: Hydroponics, Aquaponics and Aeroponics for Optimal Crop Production. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(8), 4919. https://doi.org/10.9734/ijpss/2024/v36i84919

Kumar, P., Kumar, V., Kumar, S., Singh, J., & Rawat, M. (2024). Nanotechnology in agriculture: A modern tool for sustainable food security. *South African Journal of Botany*, 168, 485-502. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2024.02.003

LaCanne, C. E., & Lundgren, J. G. (2018). Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, 6, e4428. https://doi.org/10.7717/peerj.4428

Lewis, K. A., Tzilivakis, J., Warner, D. J., & Green, A. (2020). An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(10), 2682-2703. https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1678286

Liu, Y., Li, Y., Wang, Y., & Liu, S. (2022). Smart nanopesticides for targeted and responsive pest management. *Nano Today*, 43, 101423. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2022.101423

Locatelli, B., Vallet, A., & Fedele, G. (2022). Payments for ecosystem services and agricultural intensification: a review. *Ecosystem Services*, 55, 101438. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2022.101438

Lombardi, M., Luzzati, T., & Tretola, A. D. (2023). A systematic literature review of the effects of organic farming on the environment. *Journal of Cleaner Production*, 427, 139129. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139129

Lovell, S. T. (2010). Multifunctional urban agriculture for sustainable land use planning in the United States. *Sustainability*, 2(8), 2499-2522. https://doi.org/10.3390/su2082499

Lowenberg-DeBoer, J., Behrendt, K., & Ehlers, M. H. (2022). The impact of agricultural robots on jobs. *Agribusiness*, 38(1), 3-20. https://doi.org/10.1002/agr.21727

Marinello, F., Zou, X., Liu, Z., Zhu, X., Zhang, W., Qian, Y., ... & Mansoor, S. (2023). The Path to Smart Farming: Innovations and Opportunities in Precision Agriculture. *Agriculture*, 13(8), 1593. https://doi.org/10.3390/agriculture13081593

Martin, G., Allain, S., Duru, M., & Therond, O. (2021). A systematic review of the literature on crop-livestock integration: a way to

sustainable agriculture. *Agricultural Systems*, 194, 103282. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103282

Martin, M., & Bustamante, M. J. (2023). Life cycle assessment of a vertical farm: a case study for basil production. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 28(5), 724-739. https://doi.org/10.1007/s11367-023-02166-4

Mdee, A., Mcewan, C., & Sullivan, S. (2022). The social and political dimensions of 'sustainable agriculture': a critical review. *The Journal of Peasant Studies*, 49(1), 1-28. https://doi.org/10.1080/03066150.2020.1834988

Meemken, E. M., & Qaim, M. (2018). Organic agriculture, food security, and the environment. *Annual Review of Resource Economics*, 10, 39-63. https://doi.org/10.1146/annurev-resource-100517-023252

Mitrofanov, S., Kakieva, S., & Muklukov, D. (2025). AGRICULTURAL INNOVATIONS: IMPACT ON FOOD SECURITY. *EKONOMIKA I UPRAVLENIE: PROBLEMY, RESHENIYA*. https://doi.org/10.36871/ek.up.p.r.2025.01.06.011

Mittal, D., Kaur, G., Singh, P., & Ali, S. A. (2020). Nanotechnology-based recent approaches for sensing and remediation of pesticides. *Journal of Environmental Management*, 276, 111235. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111235

Mok, H. F., Williamson, V. G., Grove, J. R., Burry, K., Barker, S. F., & Hamilton, A. J. (2014). Strawberry fields forever? Urban agriculture in developed countries: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 21-43. https://doi.org/10.1007/s13593-013-0156-7

Mubeen, F., Bano, A., & Ali, B. (2021). The effects of integrated farming system on soil health, crop productivity and socioeconomic status of the farmers. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 20(6), 397-404. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2021.04.004

Muller, A., Schader, C., El-Hage Scialabba, N., Brüggemann, J., Isensee, A., Erb, K. H., ... & Niggli, U. (2017). Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nature*

Communications, 8(1), 1290. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01410-w

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2016). *Genetically Engineered Crops: Experiences and Prospects*. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/23395

Ojuu, D., Mkindi, A., Meya, A., Giliba, R., Vanek, S., & Belmain, S. (2025). Farmers' Insights and Practices on Sustainable Soil Nutrient and Pest Management in Semi-Arid Eastern Africa. *Sustainability*, 17(6), 2478. https://doi.org/10.3390/su17062478

Panday, D., Bhusal, N., Das, S., & Ghalehgolabbehbahani, A. (2024). Rooted in Nature: The Rise, Challenges, and Potential of Organic Farming and Fertilizers in Agroecosystems. *Sustainability*, 16(4), 1530. https://doi.org/10.3390/su16041530

Pandey, D., & Mishra, R. (2024). Towards sustainable agriculture: Harnessing AI for global food security. *Artificial Intelligence in Agriculture*. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.04.003

Paramesh, V., Ravisankar, N., Behera, U. K., & Kumar, P. (2022). Integrated farming system for sustainable agriculture: A review. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 70(1), 1-13.

Pasupuleti, M. (2025). Digital Genomics and AI in Agri-Biotech: Innovations for Climate-Resilient Food Futures. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations(IJAIRI)*. https://doi.org/10.62311/nesx/rp-2-aug-25

Pasupuleti, M. (2025). Next-Gen Food Security: AI and Biotech Innovations for Sustainable Agriculture. *International Journal of Academic and Industrial Research Innovations(IJAIRI)*. https://doi.org/10.62311/nesx/rp05113

Pinheiro, A. A., de Farias, E. S., de Lira, R. B., & da Silva, J. A. (2022). Integrated farming systems for the sustainable intensification of agriculture: a review. *Revista Caatinga*, 35(3), 485-496. https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n301rc

Pobkrut, T., & Parnichkun, M. (2023). A review of autonomous navigation for agricultural robots: A perspective on large-scale field coverage. *Journal of Field Robotics*, 40(6), 1339-1365. https://doi.org/10.1002/rob.22201

Pourias, J., Aubry, C., & Duchemin, E. (2022). Is urban agriculture a vector of social cohesion? A case study in two Parisian community gardens. *Urban Forestry & Urban Greening*, 69, 127494. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127494

Pradhan, P., Costa, L., Rybski, D., Lucht, W., & Kropp, J. P. (2023). A systematic review of the impacts of agricultural subsidies on the environment. *Environmental Research Letters*, 18(4), 043002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbf68

Qaim, M. (2020). Role of new plant breeding technologies for food security. *Food Policy*, 96, 101972. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101972

Quamar, M., Al-Ramadan, B., Khan, K., Shafiullah, M., & El-Ferik, S. (2023). Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology - A Review. *Remote Sensing*, 15(20), 5039. https://doi.org/10.3390/rs15205039

Rai, E., & Singh, S. (2024). Revolutionizing Agricultural Advancement: Exploring Innovations And Sustainable Practices For Future Food Security. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*. https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v5.i6.2024.4475

Rajendran, S., Domalachenpa, T., Arora, H., Li, P., Sharma, A., & Rajauria, G. (2024). Hydroponics: Exploring innovative sustainable technologies and applications across crop production, with Emphasis on potato mini-tuber cultivation. *Heliyon*, 10(4), e26823. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26823

Rajput, V. D., Minkina, T., Mazarji, M., Shende, S., Sushkova, S., Mandzhieva, S., ... & Singh, R. K. (2021). Adsorption and toxicity of engineered nanoparticles in the soil-plant system: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 225, 112718. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112718

Ramanjaneyulu, B. (2025). Role of Organic and Natural Farming in Regenerative Agriculture. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.75435

Reganold, J. P., & Wachter, J. M. (2016). Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants*, 2(2), 1-8. https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221

Ricroch, A. E. (2022). Global developments of genome-edited crops. *Transgenic Research*, 32(1), 1-10. https://doi.org/10.1007/s11248-022-00329-3

Romeis, J., Naranjo, S. E., Meissle, M., & Shelton, A. M. (2019). Genetically engineered crops help support conservation of biological diversity. *Biological Control*, 139, 104082. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104082

Rose, D. C., & Chilvers, J. (2018). Agriculture 4.0: Broadening responsible innovation in an era of smart farming. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87. https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00087

Ryan, M. (2020). The social and ethical impacts of AI in agriculture. In *AI in Agriculture* (pp. 51-64). Wageningen Academic Publishers.

Sangeetha, C., Moond, V., M., R., Damor, J., Pandey, S., Kumar, P., & Singh, B. (2024). Remote Sensing and Geographic Information Systems for Precision Agriculture: A Review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 14(2), 3945. https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i23945

Säumel, I., Kotsyuk, I., Hölscher, M., Kowarik, I., & Fischer, L. K. (2019). How healthy is urban agriculture in European cities?. *Environmental Research*, 169, 449-459. https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.10.027

Scown, M. W., Brady, M. V., & Nicholas, K. A. (2020). Billions in misspent EU agricultural subsidies could support the sustainable development goals. *One Earth*, 3(2), 237-250. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.011

Seufert, V., & Ramankutty, N. (2017). Many shades of gray, The context-dependent performance of organic agriculture. *Science Advances*, 3(3), e1602638. https://doi.org/10.1126/sciadv.1602638

Shamshiri, R. R., Grout, V., Maharlou, A., & Maharlouei, M. (2023). A systematic review of recent advances in agricultural robotics: reviewing the past and inspiring the future. *Computers and*

Electronics in Agriculture, 215, 108362. https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108362

Sharath Kumar, M., Heble, A., Nagesh, D.S., & Shrihari, S. (2023). A Review on the Current Status of Vertical Farming. *World Journal of Biology and Biotechnology*, 8(2), 29-35.

Sharma, R., Kamble, S. S., Gunasekaran, A., Kumar, V., & Kumar, A. (2020). A systematic literature review on machine learning applications in agricultural supply chain. *Computers & Operations Research*, 124, 105070. https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105070

Silva, J., Machado, K., De Souza Silva, A., Dias, R., Bodnar, V., Vieira, W., ... & Costa, L. (2025). Challenges and Opportunities for New Frontiers and Technologies to Guarantee Food Production. *Sustainability*, 17(9), 3792. https://doi.org/10.3390/su17093792

Singh, M., Singh, R., Patra, A., Singh, H., & Ram, R. (2025). Application and Recent Trends of Biotechnology in Sustainable Agriculture: A Brief Review. *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*. https://doi.org/10.9734/jabb/2025/v28i11939

Singh, V., Singh, J., & Kumar, V. (2023). Nanotechnology in agriculture: a review on the application of nanosensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 360, 114533. https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114533

Spielman, D. J., & Birner, R. (2021). *The political economy of agricultural research and development*. Oxford University Press.

Sultan, D. (2021). Future prospects for sustainable agricultural development. *International Journal of Modern Agriculture and Environment*. https://doi.org/10.21608/ijmae.2023.215952.1012

Sultana, M. N., Mondal, S., Faruk, M. O., & Hasan, M. M. (2021). Integrated farming systems in Bangladesh: status, challenges and opportunities. *Journal of Agriculture and Food Research*, 6, 100222. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100222

Tang, Y., Chen, M., Wang, C., Luo, L., Li, J., Lian, G., & Zou, X. (2020). Recognition and localization methods for vision-based fruit harvesting robots: a review. *Frontiers in Plant Science*, 11, 510. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00510

Thingujam, D., Gouli, S., Cooray, S., Chandran, K., Givens, S., Gandhimeyyan, R., ... & Mukhtar, M. (2025). Climate-Resilient Crops: Integrating AI, Multi-Omics, and Advanced Phenotyping to Address Global Agricultural and Societal Challenges. *Plants*, 14. https://doi.org/10.3390/plants14172699

Tubber, E., Gatti, E., & Tami, F. (2023). Autonomous robots for weed control: a review. *Precision Agriculture*, 24(5), 1836-1863. https://doi.org/10.1007/s11119-023-10045-8

Tur-Cardona, J., Soler-Montiel, M., & Giner-Garrigós, R. (2021). The importance of organic farming in the framework of the European Green Deal: A bibliometric review. *Agriculture*, 11(12), 1221. https://doi.org/10.3390/agriculture11121221

Tyczewska, A., Twardowski, T., & Woźniak-Gientka, E. (2023). Agricultural biotechnology for sustainable food security. *Trends in Biotechnology*, 41(3), 331-341. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2022.12.013

van Delden, S. H., Sharathumar, R., Butturini, M., Graamans, L. J., Heuvelink, E., Kacira, M., ... & Stanghellini, C. (2021). Current status and future challenges in implementing and upscaling vertical farming systems. *Nature Food*, 2(12), 944-956. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00402-w

Vera, A., Sanguña, T., & García, J. (2025). Food Preservation Technologies, Biotechnology In Agriculture And Environmental Sustainability: An Integrated Approach To Agrifood Systems. *International Journal of Environmental Sciences*. https://doi.org/10.64252/kaddje59

Waddington, H., Stevenson, J., & Engel, P. (2023). What is the evidence on the effectiveness of agricultural extension services? A systematic review. *World Development*, 165, 106201. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2023.106201

Warren, E., Hawkesworth, S., & Knai, C. (2020). Investigating the association between urban agriculture and food security, dietary diversity, and nutritional status: A systematic literature review. *Food Policy*, 96, 101873. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101873

Weldon, R., & Sargeant, B. (2023). An ethics framework for artificial intelligence in agriculture. *AI and Ethics*, 3(4), 1011-1025. https://doi.org/10.1007/s43681-023-00277-3

Whittinghill, L. J., & Rowe, D. B. (2012). The role of green roof technology in urban agriculture. *Horticulture Review*, 39, 295-353. https://doi.org/10.1002/9781118351871.ch6

Zhang, P., Guo, Z., Ullah, S., Melagraki, G., Afantitis, A., & Lynch, I. (2021). Nanotechnology and artificial intelligence to enable sustainable and precision agriculture. *Nature Plants*, 7(7), 864-876. https://doi.org/10.1038/s41477-021-00946-6

GLOSARIUM

- **Adaptasi (Perubahan Iklim)**: Proses penyesuaian terhadap iklim saat ini atau yang diharapkan di masa depan serta dampaknya, untuk mengurangi kerugian atau memanfaatkan peluang yang menguntungkan.
- **Aeroponik**: Metode menanam tanaman dengan akar yang tergantung di udara dan diberi nutrisi melalui semprotan kabut larutan.
- **Agbot (*Agricultural Robot*)**: Sebuah robot yang dirancang untuk melakukan tugas-tugas di bidang pertanian.
- **Agrinanotechnology**: Penerapan nanoteknologi dalam bidang pertanian untuk meningkatkan produktivitas dan keberlanjutan.
- **Agroekologi**: Studi tentang proses-proses ekologis dalam sistem pertanian dan penerapan prinsip-prinsip ekologis untuk merancang dan mengelola sistem pertanian yang berkelanjutan.
- **Agroekosistem**: Ekosistem yang dimodifikasi oleh manusia untuk produksi pertanian.
- **Agroforestri**: Sistem penggunaan lahan di mana pohon atau tanaman berkayu lainnya sengaja diintegrasikan dengan tanaman pertanian dan/atau ternak.
- **Akuaponik**: Sistem simbiosis yang menggabungkan akuakultur (budidaya ikan) dengan hidroponik, di mana limbah ikan menjadi pupuk bagi tanaman.
- **Algoritma**: Serangkaian aturan atau instruksi langkah-demi-langkah yang dirancang untuk melakukan tugas atau memecahkan masalah.
- **Auto-steer**: Sistem pemandu otomatis pada kendaraan pertanian yang menggunakan GPS untuk menjaga agar kendaraan tetap pada jalur yang telah ditentukan.

- **Bias Algoritma**: Kesalahan sistematis dalam sistem AI yang menghasilkan hasil yang tidak adil atau berprasangka, seringkali karena data pelatihan yang tidak lengkap atau tidak representatif.
- **Big Data**: Kumpulan data yang sangat besar dan kompleks yang tidak dapat dikelola atau diproses secara efektif dengan perangkat lunak pemrosesan data tradisional.
- **Biodinamik**: Sebuah metode pertanian organik holistik yang memandang pertanian sebagai organisme hidup yang terhubung dengan kosmos.
- **Biofortifikasi**: Proses peningkatan nilai gizi tanaman pangan melalui pemuliaan konvensional atau rekayasa genetika.
- **Controlled Environment Agriculture (CEA)**: Pendekatan pertanian di mana lingkungan tanam (cahaya, suhu, kelembapan, dll.) di dalam ruangan tertutup dikontrol secara total.
- **Deep Learning**: Sub-bidang *Machine Learning* yang menggunakan jaringan saraf tiruan berlapis-lapis (*deep neural networks*) untuk belajar dari sejumlah besar data.
- **Degradasi Lahan**: Proses penurunan kualitas dan produktivitas tanah akibat aktivitas manusia atau proses alam, seperti erosi, salinisasi, dan penipisan nutrisi.
- **Diversifikasi Usaha Tani**: Praktik mengelola berbagai jenis usaha produksi (misalnya, berbagai tanaman, ternak) dalam satu unit usaha tani untuk menyebarkan risiko dan menciptakan berbagai sumber pendapatan.
- **DNA (*Deoxyribonucleic Acid*)**: Molekul yang membawa instruksi genetik untuk perkembangan, fungsi, pertumbuhan, dan reproduksi semua organisme hidup.
- **Drone**: Pesawat Udara Tanpa Awak (PUTA) yang digunakan untuk pemetaan udara, pemantauan tanaman, dan aplikasi input pertanian.
- **Efektor Akhir (*End-effector*)**: Perangkat di ujung lengan robot, seperti penggenggam (*gripper*) atau alat semprot, yang berinteraksi langsung dengan lingkungan.
- **Ekonomi Sirkular**: Model ekonomi di mana sumber daya dipertahankan dalam penggunaan selama mungkin, dengan

mengekstraksi nilai maksimum dari mereka saat digunakan, kemudian memulihkan dan meregenerasi produk dan bahan pada akhir setiap masa pakai.

- **Enkapsulasi Nano**: Proses membungkus bahan aktif (seperti pestisida atau pupuk) di dalam cangkang material berukuran nano untuk melindunginya dan mengontrol pelepasannya.
- **Explainable AI (XAI)**: Bidang penelitian dalam AI yang bertujuan untuk mengembangkan sistem yang rekomendasinya dapat dipahami dan dipercaya oleh manusia.
- **Genom**: Kumpulan lengkap materi genetik (DNA) dari suatu organisme.
- **GMO (*Genetically Modified Organism*)**: Organisme (tanaman, hewan, atau mikroorganisme) yang materi genetiknya telah diubah menggunakan teknik rekayasa genetika.
- **GPS (*Global Positioning System*)**: Sistem navigasi berbasis satelit yang memungkinkan penentuan posisi geografis yang akurat di permukaan bumi, penting untuk pemetaan dan pemanduan mesin.
- **Gurun Pangan (*Food Desert*)**: Sebuah area, biasanya di lingkungan perkotaan berpenghasilan rendah, di mana penduduk memiliki akses terbatas ke pengecer makanan yang terjangkau dan bergizi.
- **Hidroponik**: Metode menanam tanaman tanpa tanah, di mana akar diberi larutan air yang kaya akan mineral dan nutrisi.
- **HVAC (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*)**: Sistem teknologi yang digunakan untuk mengontrol suhu, kelembapan, dan kualitas udara di dalam ruangan.
- **IFOAM (*International Federation of Organic Agriculture Movements*)**: Organisasi payung global untuk gerakan pertanian organik.
- **Jaringan Saraf Tiruan (*Neural Network*)**: Model komputasi yang terinspirasi oleh struktur dan fungsi otak biologis, yang merupakan inti dari banyak model *Deep Learning*.
- **Kebijakan Pertanian**: Serangkaian hukum, peraturan, keputusan, dan tindakan pemerintah yang berkaitan dengan sektor pertanian dan sistem pangan.

- **Kebun Atap (*Rooftop Garden*)**: Praktik menanam tanaman di atas atap bangunan, baik dalam wadah, bedengan, atau sebagai bagian dari sistem atap hijau.
- **Kebun Komunitas (*Community Garden*)**: Sebidang tanah yang dibudidayakan secara kolektif oleh sekelompok orang, yang berfungsi sebagai pusat produksi pangan dan interaksi sosial.
- **Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence*, AI)**: Bidang ilmu komputer yang didedikasikan untuk menciptakan mesin yang dapat meniru kecerdasan dan perilaku manusia.
- **Kedaulatan Pangan (*Food Sovereignty*)**: Hak masyarakat untuk menentukan sistem pangan dan pertanian mereka sendiri, menempatkan mereka yang memproduksi, mendistribusikan, dan mengonsumsi makanan sebagai pusat dari keputusan.
- **Kembaran Digital (*Digital Twin*)**: Representasi virtual dari objek atau sistem fisik yang berfungsi sebagai rekan digitalnya untuk tujuan praktis, seperti simulasi, integrasi, pengujian, pemantauan, dan pemeliharaan.
- **Kesenjangan Digital**: Kesenjangan antara demografi dan wilayah yang memiliki akses ke teknologi informasi dan komunikasi modern dengan yang tidak atau memiliki akses terbatas.
- **Ketahanan Pangan**: Kondisi di mana semua orang, pada setiap saat, memiliki akses fisik, sosial, dan ekonomi terhadap pangan yang cukup, aman, dan bergizi.
- **Ketertelusuran (*Traceability*)**: Kemampuan untuk melacak pergerakan suatu produk pangan melalui semua tahapan produksi, pemrosesan, dan distribusi.
- **Kompos**: Bahan organik yang telah terurai dan didaur ulang sebagai pupuk dan amandemen tanah.
- **Kultur Jaringan**: Kumpulan teknik yang digunakan untuk memelihara atau menumbuhkan sel atau jaringan tanaman dalam kondisi steril pada media nutrisi.
- **LED (*Light-Emitting Diode*)**: Perangkat semikonduktor yang memancarkan cahaya ketika dialiri listrik, digunakan sebagai sumber cahaya buatan yang efisien dalam pertanian vertikal.

- **Lembaga Litbang (*Research and Development Institution*)**: Organisasi (pemerintah, universitas, atau swasta) yang berfokus pada penelitian dan pengembangan untuk menciptakan pengetahuan dan teknologi baru.
- **Machine Learning (ML)**: Sub-bidang AI di mana algoritma memungkinkan komputer untuk belajar dari data dan membuat prediksi atau keputusan tanpa diprogram secara eksplisit.
- **Marka Molekuler**: Segmen DNA yang dapat diidentifikasi yang lokasinya dalam genom diketahui, digunakan sebagai penanda untuk gen yang terkait dengannya.
- **Mina Padi (*Rice-Fish System*)**: Sistem pertanian terpadu di mana ikan dibudidayakan secara bersamaan dengan padi di sawah yang tergenang air.
- **Mitigasi (Perubahan Iklim)**: Intervensi manusia untuk mengurangi sumber atau meningkatkan serapan gas rumah kaca.
- **Monokultur**: Praktik pertanian menanam satu jenis tanaman saja pada area yang luas.
- **Multifungsi**: Kemampuan suatu sistem atau kegiatan, seperti pertanian perkotaan, untuk menghasilkan berbagai manfaat (ekologis, sosial, ekonomi) secara bersamaan.
- **Nanomaterial**: Material dengan setidaknya satu dimensi eksternal dalam skala ukuran 1-100 nanometer.
- **Nanometer (nm)**: Satuan panjang yang setara dengan sepersemiliar (10^{-9}) meter.
- **Nanopartikel**: Partikel yang berukuran antara 1 hingga 100 nanometer.
- **Nanosensor**: Perangkat sensor berukuran nano yang dirancang untuk mendeteksi keberadaan partikel atau senyawa kimia tertentu dalam jumlah yang sangat kecil.
- **Nanotoksikologi**: Studi tentang toksisitas atau efek berbahaya dari nanomaterial terhadap sistem biologis.
- **NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)**: Indikator numerik yang dihitung dari citra sensor multispektral untuk menilai apakah target yang diamati mengandung vegetasi hijau yang hidup atau tidak.

- **Otonom**: Kemampuan suatu sistem atau mesin untuk beroperasi dan membuat keputusan tanpa campur tangan manusia secara langsung.
- **Outcome-Based Education (OBE)**: Model pendidikan yang memfokuskan proses pembelajaran pada hasil (kompetensi) yang ingin dicapai, bukan hanya pada input (materi pelajaran).
- **Pembayaran untuk Jasa Ekosistem (*Payments for Ecosystem Services* - PES)**: Insentif yang ditawarkan kepada petani atau pemilik lahan sebagai imbalan karena mengelola lahan mereka dengan cara yang memberikan layanan ekologis bagi masyarakat.
- **Pemindahan Pekerjaan (*Job Displacement*)**: Terjadi ketika pekerja kehilangan pekerjaan mereka dan tidak digantikan, seringkali karena perubahan teknologi atau ekonomi.
- **Pengiriman yang Ditargetkan (*Targeted Delivery*)**: Strategi yang menggunakan nanopartikel untuk mengirimkan bahan aktif secara spesifik ke lokasi target (misalnya, sel penyakit, serangga hama) sambil meminimalkan paparan ke area non-target.
- **Penyerap Karbon (*Carbon Sink*)**: Reservoir alami atau buatan yang mengakumulasi dan menyimpan senyawa kimia yang mengandung karbon untuk periode yang tidak terbatas.
- **Penyuluhan Pertanian (*Agricultural Extension*)**: Proses berbagi informasi, pengetahuan, dan teknologi baru kepada petani untuk membantu mereka meningkatkan praktik pertanian dan mata pencaharian mereka.
- **Pertanian Berbasis Data (*Data-Driven Agriculture*)**: Pendekatan manajemen pertanian di mana keputusan didukung oleh analisis data kuantitatif yang dikumpulkan dari berbagai sumber.
- **Pertanian Berkelanjutan**: Sistem pertanian yang menyeimbangkan kelestarian lingkungan, kelayakan ekonomi, dan keadilan sosial untuk memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan generasi mendatang.
- **Pertanian Digital (*Digital Agriculture*)**: Integrasi teknologi digital ke dalam peternakan dan pertanian untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan.

- **Pertanian Perkotaan (*Urban Agriculture*)**: Praktik budidaya, pemrosesan, dan distribusi makanan di dalam atau di sekitar wilayah perkotaan.
- **Pertanian Regeneratif**: Pendekatan terhadap pertanian yang bertujuan untuk melestarikan dan merehabilitasi sistem pangan dan pertanian, dengan fokus utama pada regenerasi kesehatan tanah.
- **Protokol Cartagena**: Perjanjian internasional tentang keamanan hayati sebagai suplemen dari Konvensi Keanekaragaman Hayati, yang bertujuan untuk melindungi keanekaragaman hayati dari potensi risiko yang ditimbulkan oleh organisme hasil modifikasi hayati dari bioteknologi modern.
- **Pulau Bahang Perkotaan (*Urban Heat Island*)**: Fenomena di mana area metropolitan secara signifikan lebih hangat daripada area pedesaan di sekitarnya karena aktivitas manusia dan modifikasi permukaan tanah.
- **Pupuk Hijau**: Tanaman yang ditanam untuk dibenamkan kembali ke dalam tanah saat masih hijau untuk meningkatkan kesuburan dan bahan organik tanah.
- **Rekayasa Genetika**: Manipulasi langsung gen suatu organisme menggunakan bioteknologi.
- **Revolusi Hijau**: Periode peningkatan pesat produksi pertanian pada pertengahan abad ke-20 melalui penggunaan varietas tanaman unggul, pupuk sintetis, pestisida, dan irigasi.
- **Robotics-as-a-Service (RaaS)**: Model bisnis di mana pelanggan membayar biaya sewa atau langganan untuk menggunakan kemampuan robot tanpa harus membeli atau memiliki peralatannya.
- **Rotasi Tanaman**: Praktik menanam serangkaian jenis tanaman yang berbeda di area yang sama secara berurutan.
- **Sekolah Lapang Petani (*Farmer Field School*)**: Pendekatan pembelajaran partisipatif di mana sekelompok petani bertemu secara teratur di lapangan untuk belajar, bereksperimen, dan memecahkan masalah bersama.

- **Sensor**: Perangkat yang mendeteksi dan mengukur properti fisik (misalnya, kelembapan, suhu, cahaya) dan mengubahnya menjadi sinyal yang dapat dibaca.
- **Sertifikasi Organik**: Proses verifikasi oleh pihak ketiga yang menjamin bahwa produk pertanian diproduksi sesuai dengan standar organik.
- **Siklus Tertutup (*Closed-Loop Cycle*)**: Sistem di mana limbah atau produk sampingan dari satu proses secara konsisten didaur ulang untuk menjadi input bagi proses lain dalam sistem yang sama, meminimalkan kebutuhan input eksternal dan keluaran limbah.
- **Sinergi**: Interaksi antara dua atau lebih komponen yang menghasilkan efek gabungan yang lebih besar daripada jumlah efek masing-masing komponen secara terpisah.
- **Sistem Informasi Geografis (SIG)**: Sistem komputer untuk menangkap, menyimpan, memeriksa, mengintegrasikan, memanipulasi, menganalisis, dan menampilkan data yang terkait dengan posisi di permukaan bumi.
- **Sistem Pertanian Terpadu (*Integrated Farming System*, SPT)**: Pendekatan manajemen usaha tani holistik yang secara sengaja mengintegrasikan berbagai komponen usaha tani untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan melalui daur ulang sumber daya internal.
- **Spot-Spraying**: Aplikasi pestisida atau herbisida yang ditargetkan hanya pada area atau tanaman individu yang membutuhkannya.
- **Subsidi**: Bantuan keuangan yang diberikan oleh pemerintah kepada suatu sektor ekonomi untuk menjaga agar harga suatu komoditas atau jasa tetap rendah atau untuk mendukung usaha tersebut.
- **Supervised Learning**: Jenis *Machine Learning* di mana algoritma belajar dari kumpulan data yang telah diberi label oleh manusia.
- **Sustainable Development Goals (SDGs)**: Kumpulan 17 tujuan global yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa sebagai agenda pembangunan berkelanjutan hingga tahun 2030.
- **Transfer Teknologi**: Proses di mana pengetahuan, keterampilan, dan teknologi yang dikembangkan di satu lingkungan (misalnya,

lembaga penelitian) ditransfer dan diterapkan di lingkungan lain (misalnya, usaha tani).

- **Tumpang Sari (*Intercropping*)**: Praktik menanam dua atau lebih tanaman secara bersamaan di lahan yang sama.
- **UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*)**: Pesawat tanpa awak, sering disebut *drone*, yang dioperasikan dari jarak jauh atau secara otonom.
- **UGV (*Unmanned Ground Vehicle*)**: Kendaraan darat tanpa awak yang bergerak di atas permukaan tanah secara otonom.
- **Variable Rate Technology (VRT)**: Teknologi yang memungkinkan aplikasi input pertanian (seperti benih, pupuk, pestisida) pada laju yang bervariasi secara otomatis di seluruh lahan berdasarkan data dari peta preskripsi.
- **Visi Komputer (*Computer Vision*)**: Bidang AI yang melatih komputer untuk menginterpretasikan dan memahami informasi visual dari dunia, seperti gambar dan video.

PROFIL PENULIS

Dr. Ajang Maruapey, S.P., M.P.
Dosen Program Studi Agroteknologi
Fakultas Pertanian Universitas Muhammadiyah Sorong

Dr. Ajang Maruapey, SP., MP, dilahirkan di Ambon pada tanggal 10 Oktober 1975. Beliau adalah dosen tetap di Fakultas Pertanian Program Studi Agroteknologi Universitas Muhammadiyah Sorong (UNAMIN).

Perjalanan akademiknya dimulai ketika dia memperoleh gelar Sarjana Pertanian (S.P.) dalam bidang Agronomi dari Universitas Darussalam Ambon pada tahun 2001. Pada tahun 2005, dia memulai karier profesionalnya sebagai dosen Aparatur Sipil Negara (ASN) di Kopertis Wilayah XII (kini LL-Dikti Wilayah XIV). yang berkomitmen untuk pengembangan dunia pendidikan, terutama untuk meningkatkan kualitas sumber daya manusia di Tanah Papua.

Fokus dan Kontribusi Ilmiah: Fokus penelitian beliau adalah intensifikasi tanaman padi, yang mencakup aspek pemuliaan tanaman serta pengembangan metode budidaya pertanian organik. Secara khusus, beliau secara aktif mempelajari adaptasi genotipe padi lokal dan pemanfaatan teknologi mikroba fungsional sebagai upaya strategis

untuk meningkatkan produktivitas pangan padi dan lahan secara berkelanjutan.

Pengabdian Masyarakat: Dalam bidang pengabdiannya, beliau berkomitmen kuat pada pemberdayaan petani melalui pendampingan budidaya tanaman pangan, khususnya padi, yang didasarkan pada inovasi Teknologi Pengelolaan Tanaman Terpadu (PTT). Melalui penyebaran teknologi padi varietas unggul baru, beliau bekerja sama dengan kelompok tani di Kabupaten Sorong Papua Barat Daya untuk memperkuat ketahanan pangan regional melalui transformasi pertanian yang modern dan berkelanjutan.

Penulis dapat dihubungi melalui e-mail: ajangmarpy@gmail.com

PENGANTAR ILMU PERTANIAN MASA DEPAN

Buku ajar ini dirancang untuk membuka cakrawala pemikiran mengenai masa depan sektor pertanian, sebuah pilar fundamental bagi peradaban manusia. Di tengah persimpangan antara ledakan populasi, tekanan perubahan iklim, dan degradasi sumber daya alam, inovasi bukan lagi sebuah pilihan, melainkan sebuah keharusan absolut. Urgensi untuk mentransformasi sistem produksi pangan kita menjadi lebih tangguh, efisien, dan berkelanjutan menjadi landasan utama penyusunan buku ini. Tujuannya adalah untuk menyajikan sebuah kerangka kerja konseptual dan praktis yang mengintegrasikan teknologi-teknologi mutakhir dengan prinsip-prinsip ekologis. Dengan demikian, buku ini diharapkan dapat menjadi panduan esensial bagi para akademisi, praktisi, dan pembuat kebijakan dalam merumuskan strategi ketahanan pangan yang adaptif dan berwawasan jauh ke depan.

KBM INDONESIA
penerbitkbm.com

PENERBIT KBM INDONESIA
Anggota IKAPI
0813 5751 7526 / 0353 3234 874
Kantor : Maguwoharjo, Depok, Sleman-Yogyakarta
@penerbitbukujogja
@penerbit.kbm

ISBN 978-634-278-428-0
9 786342 784280