

PERTANIAN PRESISI

Konsep, Implementasi, dan Implikasi Ekologis

Dr. rer.pol. Ernah S.P., M.Si

Dr. Widhi Netraning Pertiwi, S.Pd., M.Sc

Kundrat, S.P., M.EP

Bayu Rizky Pratama, Ph.D

Yuliana Samantha, S.P., M.EP



PT. GHANI PRESS GROUP

PERTANIAN PRESISI: Konsep, Implementasi, dan Implikasi Ekologis

Penulis:

Dr. rer.pol. Ernah SP., M.Si | Dr. Widhi Netraning Pertiwi, S.Pd., M.Sc | Kundrat, S.P., M.EP | Bayu Rizky Pratama, Ph.D | Yuliana Samantha, S.P., M.EP

Desain Cover:

Umar Khasan

Layouter:

Tyas Dzawil Istiqomah

Editor Naskah:

Dr. Esther Kembauw, S.P., M.Si.

14 x 21 cm, v-123

ISBN: 978-634-97150-6-5

Anggota IKAPI: No. 468/JTI/2026

Diterbitkan oleh: PT GHANI PRESS GROUP



Alamat:

Bumi Permata Raya Blok 8 No. 14 Tanjung, Lamongan
HP. 0896-5710-0105

Email: ptghanipress@gmail.com

Website: <https://ghanipress.com/>

© Hak Cipta 2026 pada penulis

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- a. 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).
- b. 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).
- c. 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).
- d. 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)

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku PERTANIAN PRESISI: Konsep, Implementasi, dan Implikasi Ekologis ini dapat disusun dan diterbitkan dengan baik.

Secara konseptual, pertanian presisi mencakup tiga tahapan utama yang saling terintegrasi, yaitu pengamatan, analisis, dan tindakan. Dalam penerapannya pertanian presisi sangat terbukti mampu meningkatkan produktivitas melalui optimalisasi penggunaan input sesuai kebutuhan spesifik tanaman.

Dalam buku ini membahas tentang konsep pertanian presisi, teknologi IoT dan *big data* untuk monitoring lahan, bagaimana dampak ekologis pertanian presisi pada ekosistem, serta bagaimana adopsi teknologi, perkembangan dan tantangan di Indonesia.

Akhir kata, semoga buku ini dapat memberikan manfaat, memperluas wawasan, serta menjadi sumber referensi yang berguna bagi seluruh pembaca dalam memahami dan menerapkan pertanian presisi yang lebih baik.

Bandung, Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	vii
BAB I	
KONSEP PERTANIAN PRESISI DAN IMPLEMENTASINYA	1
BAB II	
TEKNOLOGI DAN IOT UNTUK MONITORING LAHAN	15
BAB III	
<i>BIG DATA</i> DAN ANALITIK PREDIKTIF UNTUK PRODUKTIVITAS	31
BAB IV	
DAMPAK EKOLOGIS PERTANIAN PRESISI PADA EKOSISTEM	55
BAB V	
ADOPSI TEKNOLOGI, PERKEMBANGAN DAN TANTANGAN DI INDONESIA	87
DAFTAR PUSTAKA.....	99
BIODATA PENULIS	121



PT GHANI PRESS GROUP

Email: ptghanipress@gmail.com

Website: <https://ghanipress.com/>

BAB I

KONSEP PERTANIAN PRESISI DAN IMPLEMENTASINYA

❖ Pendahuluan

Pertanian global saat ini menghadapi tekanan yang semakin kompleks akibat interaksi berbagai faktor struktural dan dinamis, seperti pertumbuhan populasi, perubahan iklim, keterbatasan sumber daya alam, dan meningkatnya tuntutan terhadap sistem produksi yang berkelanjutan. Berbagai organisasi internasional memperkirakan bahwa kebutuhan pangan global akan meningkat secara signifikan dalam beberapa dekade mendatang, seiring dengan pertumbuhan populasi dunia dan perubahan pola konsumsi. Dalam konteks tersebut, sistem pertanian dituntut tidak hanya mampu meningkatkan produksi, tetapi juga menjaga keberlanjutan lingkungan serta efisiensi dalam penggunaan sumber daya.

Di Indonesia, sektor pertanian memiliki peran strategis sebagai penyedia pangan, sumber pendapatan masyarakat, serta kontributor penting terhadap stabilitas

ekonomi nasional. Data Badan Pusat Statistik (BPS) menunjukkan bahwa sektor ini tetap menjadi salah satu penyerap tenaga kerja terbesar dan memiliki kontribusi signifikan terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) nasional (BPS, 2025). Namun demikian, produktivitas sektor pertanian masih menghadapi berbagai kendala, antara lain keterbatasan adopsi teknologi, rendahnya efisiensi penggunaan input, serta dominasi pendekatan konvensional dalam pengelolaan lahan. Pendekatan konvensional dalam pertanian umumnya didasarkan pada asumsi homogenitas lahan, sehingga pengelolaan input dilakukan secara seragam. Padahal, kondisi biofisik lahan bersifat heterogen, baik dari segi kesuburan tanah, kelembapan, maupun kondisi iklim. Ketidaksesuaian antara kebutuhan tanaman dan aplikasi input tersebut dapat menyebabkan pemborosan sumber daya serta menurunkan efisiensi produksi (Gebbers & Adamchuk, 2016). Selain itu, penggunaan input yang berlebihan juga berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, seperti pencemaran tanah dan air serta peningkatan emisi gas rumah kaca.

Dalam konteks ini, pertanian presisi hadir sebagai pendekatan inovatif yang mengintegrasikan teknologi digital dengan praktik agronomi guna meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Pendekatan ini memungkinkan pengelolaan lahan secara spesifik lokasi (*site-specific management*) melalui pemanfaatan data untuk memahami variabilitas dalam suatu hamparan lahan (McBratney dkk., 2019). Perkembangan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), analitik *big data*, serta sistem informasi geografis (SIG) telah mempercepat adopsi pertanian presisi di berbagai negara. Teknologi tersebut memungkinkan pengumpulan dan analisis data secara *real-time*, sehingga proses pengambilan keputusan menjadi lebih cepat dan akurat (Wolfert dkk., 2017).

Di Indonesia, potensi implementasi pertanian presisi sangat besar, terutama pada komoditas strategis seperti padi dan kelapa sawit. Namun, tingkat adopsinya masih relatif rendah, khususnya di kalangan petani kecil. Kondisi ini disebabkan oleh berbagai faktor, seperti keterbatasan infrastruktur, rendahnya literasi digital, serta belum optimalnya dukungan kebijakan (Santoso dkk., 2024).

❖ Konsep Dasar Pertanian Presisi

Pertanian presisi merupakan pendekatan manajemen pertanian berbasis data yang bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya sekaligus meningkatkan produktivitas. Konsep ini berangkat dari pemahaman bahwa variabilitas dalam lahan pertanian merupakan faktor kunci yang harus dikelola secara efektif. McBratney dkk. (2019), pertanian presisi adalah sistem yang mengintegrasikan teknologi informasi, sensor, serta analitik data untuk mengelola variabilitas spasial dan temporal dalam produksi pertanian. Pendekatan ini memungkinkan petani memberikan perlakuan yang berbeda pada setiap bagian lahan sesuai dengan kebutuhan spesifik tanaman.

Secara konseptual, pertanian presisi mencakup tiga tahapan utama yang saling terintegrasi, yaitu pengamatan, analisis, dan tindakan. Tahap pengamatan dilakukan melalui pengumpulan data terkait kondisi lahan dan tanaman dengan memanfaatkan teknologi seperti sensor tanah, drone, serta citra satelit. Data yang dikumpulkan meliputi berbagai parameter, seperti kelembapan tanah, kandungan nutrisi, suhu, dan indeks vegetasi. Selanjutnya, data tersebut dianalisis menggunakan algoritma *machine learning* dan

4 | Dr. rer.pol. Ernah S.P., M.Si, dkk.

sistem analitik untuk mengidentifikasi pola, hubungan antarvariabel, serta memprediksi kondisi tanaman di masa depan. Hasil analisis ini kemudian menjadi dasar dalam tahap tindakan, yaitu implementasi keputusan di lapangan, seperti aplikasi pupuk variabel dan irigasi presisi. Teknologi *Variable Rate Technology* (VRT) memungkinkan pemberian input yang disesuaikan dengan kondisi spesifik lahan. Selain itu, pertanian presisi juga mengandung prinsip pembelajaran adaptif, di mana sistem terus diperbaiki berdasarkan data historis dan hasil evaluasi sebelumnya.

Implementasi pertanian presisi didukung oleh integrasi berbagai teknologi yang saling melengkapi. Sensor dan *Internet of Things* (IoT) berperan dalam pengumpulan data secara *real-time* dari lapangan. Sistem informasi geografis (SIG) digunakan untuk analisis spasial, sementara teknologi penginderaan jauh (*remote sensing*) memungkinkan pemantauan kondisi tanaman secara luas dan berkala. Di sisi lain, pemanfaatan *big data* dan kecerdasan buatan memungkinkan analisis data dalam skala besar serta penyusunan prediksi yang lebih akurat. Mesin pertanian presisi, seperti alat aplikasi input berbasis variabel, mendukung implementasi langsung di lapangan. Seluruh teknologi ini diintegrasikan melalui platform digital yang

memungkinkan pengelolaan sistem secara terpadu. Wolfert dkk. (2017), integrasi teknologi tersebut merupakan fondasi utama dalam sistem pertanian berbasis data.

❖ **Manfaat Pertanian Presisi**

Pertanian presisi memberikan berbagai manfaat strategis dalam pengelolaan sistem pertanian modern. Penerapan pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan produktivitas melalui optimalisasi penggunaan input sesuai kebutuhan spesifik tanaman. Selain itu, efisiensi biaya produksi dapat dicapai karena penggunaan pupuk, air, dan pestisida menjadi lebih terarah dan terukur. Dari perspektif lingkungan, pertanian presisi berkontribusi dalam mengurangi dampak negatif aktivitas pertanian, seperti pencemaran dan emisi gas rumah kaca. Pengambilan keputusan yang berbasis data juga meningkatkan akurasi dan ketepatan dalam manajemen usaha tani, sekaligus membantu mitigasi risiko produksi. Dalam jangka panjang, penerapan pertanian presisi berkontribusi terhadap penguatan ketahanan pangan dan keberlanjutan sistem pertanian.

Meskipun memiliki potensi besar, implementasi pertanian presisi di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan. Keterbatasan infrastruktur digital, khususnya di wilayah pedesaan, menjadi hambatan utama dalam pengembangan sistem berbasis data. Selain itu, biaya investasi teknologi yang relatif tinggi turut membatasi akses petani, terutama petani kecil. Rendahnya literasi digital juga menjadi kendala dalam pemanfaatan teknologi secara optimal. Kondisi fragmentasi lahan serta keterbatasan ketersediaan dan kualitas data semakin memperumit proses adopsi. Data BPS menunjukkan bahwa sebagian besar petani Indonesia merupakan petani kecil dengan luas lahan kurang dari dua hektare, yang secara struktural menghadapi keterbatasan dalam mengadopsi teknologi skala besar.

❖ Implementasi Pertanian Presisi

Peta jalan implementasi pertanian presisi di Indonesia perlu dirancang secara bertahap, adaptif, dan berbasis ekosistem, mengingat heterogenitas kondisi agroekologi, kapasitas petani, serta kesenjangan infrastruktur antarwilayah. Secara operasional, peta jalan ini dapat dibagi menjadi tiga tahap utama. Tahap pertama adalah tahap fondasi (0–3 tahun), yang berfokus pada pembangunan prasyarat dasar, seperti

penguatan infrastruktur digital pedesaan, pengembangan sistem data pertanian nasional berbasis geospasial, serta peningkatan literasi digital petani melalui penyuluhan dan pelatihan. Pengembangan proyek percontohan untuk komoditas strategis juga menjadi prioritas. Pada tahap ini, pemerintah berperan dominan sebagai fasilitator dan regulator. Tahap kedua adalah tahap pengembangan dan skalabilitas (3–7 tahun), yang menitikberatkan pada ekspansi dan integrasi teknologi ke skala yang lebih luas. Kegiatan meliputi replikasi model percontohan, integrasi platform data lintas pemangku kepentingan, serta pengembangan agritech startup dan model bisnis berbasis layanan. Peran sektor swasta menjadi semakin penting dalam tahap ini. Tahap ketiga adalah tahap transformasi sistem (7–15 tahun), yang ditandai dengan integrasi penuh sistem pertanian berbasis data. Ciri utamanya meliputi otomatisasi produksi, integrasi rantai nilai digital, serta penerapan kebijakan berbasis data *real-time*. Tahap ini mengarah pada sistem pertanian yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan. Keberhasilan peta jalan juga ditentukan oleh aspek kelembagaan, khususnya dalam pengembangan infrastruktur data nasional, interoperabilitas sistem, serta

peran kelembagaan seperti koperasi digital sebagai agregator teknologi bagi petani kecil.

Strategi implementasi pertanian presisi harus berbasis pada tata kelola data yang terintegrasi, adaptif, dan inklusif. Integrasi data multisumber, seperti sensor lapangan, citra satelit, data cuaca, dan data pasar, menjadi kunci dalam mendukung pengambilan keputusan yang akurat. Pemanfaatan kecerdasan buatan dan *machine learning* memungkinkan pengembangan analisis prediktif, seperti prediksi hasil panen, deteksi penyakit tanaman, serta optimasi pemupukan. Namun, kualitas data dan potensi bias algoritma menjadi tantangan yang perlu diantisipasi melalui validasi lapangan. Selain itu, kolaborasi multipihak yang melibatkan pemerintah, sektor swasta, akademisi, dan petani menjadi faktor kunci keberhasilan. Pendekatan berbasis wilayah juga penting untuk memastikan kesesuaian teknologi dengan kondisi lokal. Pengembangan model bisnis inklusif, seperti layanan berbasis langganan dan koperasi digital, dapat meningkatkan akses petani kecil terhadap teknologi. Monitoring dan evaluasi berbasis indikator kinerja memungkinkan perbaikan sistem secara berkelanjutan.

❖ Implikasi Kebijakan

Keberhasilan implementasi pertanian presisi sangat bergantung pada dukungan kebijakan yang komprehensif. Pemerintah perlu mempercepat pembangunan infrastruktur digital sebagai prasyarat utama digitalisasi pertanian. Selain itu, regulasi terkait tata kelola data, termasuk aspek kepemilikan, akses, dan keamanan, menjadi krusial. Dari perspektif ekonomi politik, digitalisasi berpotensi menciptakan asimetri kekuasaan baru dalam penguasaan data, sehingga diperlukan kebijakan yang menjamin distribusi manfaat yang adil. Insentif ekonomi, seperti subsidi teknologi, pembiayaan lunak, dan insentif pajak, juga diperlukan untuk mendorong adopsi. Akses terbuka terhadap data publik dapat mempercepat inovasi, sementara transformasi sistem penyuluhan berbasis digital akan memperluas diseminasi teknologi. Dukungan terhadap riset dan skema pembiayaan campuran (*blended finance*) juga penting untuk mengurangi risiko investasi.

❖ Contoh Studi Kasus: Pertanian Presisi pada Kelapa Sawit

Kelapa sawit merupakan komoditas strategis dengan potensi besar dalam penerapan pertanian presisi. Variabilitas produksi yang tinggi akibat perbedaan kondisi lahan dan manajemen menjadikan komoditas ini sangat relevan untuk pendekatan berbasis data. Berbagai teknologi dapat diterapkan, seperti penggunaan drone dan citra satelit untuk pemantauan tanaman, sensor tanah untuk optimasi pemupukan, kecerdasan buatan untuk prediksi hasil, serta GPS untuk meningkatkan efisiensi logistik.

Pada perkebunan rakyat, pendekatan berbasis kluster memungkinkan petani kecil berbagi akses terhadap teknologi sehingga dapat mencapai skala ekonomi. Model layanan dinilai lebih efektif dibandingkan kepemilikan individu. Selain itu, integrasi data dari sistem presisi dapat mendukung proses sertifikasi keberlanjutan seperti ISPO, sehingga meningkatkan transparansi dan daya saing global. Pertanian presisi memberikan dampak yang luas terhadap aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial. Dari sisi ekonomi, pendekatan ini meningkatkan efisiensi produksi dan pendapatan petani melalui optimalisasi penggunaan input. Dari sisi lingkungan, manfaat yang dihasilkan meliputi

pengurangan penggunaan pupuk, efisiensi air, serta penurunan emisi gas rumah kaca.

Namun, dari sisi sosial, transformasi digital berpotensi menciptakan kesenjangan jika tidak diimbangi dengan kebijakan yang inklusif. Risiko implementasi juga mencakup risiko teknologi, sosial, ekonomi, dan lingkungan yang perlu dikelola secara sistematis. Ke depan, pertanian presisi akan semakin terintegrasi dengan pendekatan *climate-smart agriculture* serta transformasi rantai nilai digital yang memungkinkan terbentuknya sistem logistik yang efisien dan transparan. Penguatan sumber daya manusia menjadi kunci dalam mendukung transformasi ini. Prospek masa depan menunjukkan arah pengembangan menuju *autonomous farming*, pemanfaatan blockchain, serta sistem pertanian berbasis kecerdasan buatan. Dalam konteks Indonesia, dengan sumber daya lahan yang luas dan kebutuhan peningkatan produktivitas, peluang untuk menjadi pemimpin dalam pertanian presisi di kawasan Asia Tenggara sangat terbuka.

Pada akhirnya, pertanian presisi merupakan bentuk transformasi sistemik yang mencakup dimensi teknologi, kelembagaan, ekonomi, dan kebijakan. Implementasi yang efektif memerlukan pendekatan bertahap, strategi berbasis

12 | Dr. rer.pol. Ernah S.P., M.Si, dkk.

data, serta kebijakan yang adaptif dan inklusif. Dalam konteks Indonesia, keberhasilan transformasi ini sangat bergantung pada sinergi multipihak serta kemampuan dalam mengintegrasikan inovasi global dengan kondisi lokal. Dengan strategi yang tepat, pertanian presisi tidak hanya mampu meningkatkan produktivitas, tetapi juga memperkuat keberlanjutan dan daya saing sektor pertanian nasional.

BAB II

TEKNOLOGI DAN IOT UNTUK MONITORING LAHAN

Akselerasi teknologi digital bertindak sebagai katalis utama dalam transformasi berbagai sektor, termasuk di dalamnya sektor agrikultur melalui penerapan *Internet of Things* (IoT) dan kecerdasan buatan untuk efisiensi lahan. Integrasi *Internet of Things* (IoT) melalui jaringan siber menjadi motor utama dalam mewujudkan pertanian presisi di era modern. Melalui pemrosesan data secara instan (*real-time*) dari perangkat yang saling terhubung, pendekatan ini mampu menciptakan sistem budidaya yang lebih efisien, produktif, dan ramah lingkungan. Salah satu teknologi yang menjadi tulang punggung dalam transformasi ini adalah *Internet of Things* (IoT), yang memungkinkan berbagai perangkat saling terhubung dan berkomunikasi melalui jaringan internet untuk mengumpulkan serta memproses data secara *real-time* (Atzori dkk., 2017). Dalam pengelolaan lahan pertanian, IoT berperan penting dalam menyediakan informasi kondisi lingkungan secara akurat dan

berkelanjutan. Teknologi ini memanfaatkan berbagai sensor untuk memantau parameter seperti kelembaban tanah, suhu, intensitas cahaya, serta kandungan nutrisi tanah. Data yang diperoleh kemudian diolah menjadi informasi yang dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih tepat dan efisien (Jayaraman dkk., 2016). Dengan demikian, petani tidak lagi bergantung sepenuhnya pada pengalaman subjektif, melainkan dapat mengadopsi pendekatan berbasis data (*data-driven decision making*). Selain meningkatkan efisiensi produksi, penerapan IoT dalam monitoring lahan juga berkontribusi terhadap keberlanjutan sistem pertanian. Teknologi ini memungkinkan penggunaan sumber daya seperti air, pupuk, dan pestisida secara lebih terukur dan optimal, sehingga dapat mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan (Balafoutis dkk., 2017). Lebih lanjut, integrasi IoT dengan teknologi lain seperti *big data analytics* dan *machine learning* membuka peluang untuk meningkatkan prediksi kondisi lahan dan hasil panen (Wolfert dkk., 2017; Liakos dkk., 2018). Namun demikian, implementasi teknologi IoT di sektor pertanian masih menghadapi berbagai tantangan, khususnya di negara berkembang. Keterbatasan infrastruktur digital, tingginya biaya investasi

awal, serta rendahnya tingkat literasi teknologi di kalangan petani menjadi hambatan utama dalam adopsi teknologi ini (FAO, 2019). Oleh karena itu, diperlukan strategi yang komprehensif, termasuk pengembangan teknologi yang sesuai dengan kondisi lokal, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, serta dukungan kebijakan pemerintah yang mendorong digitalisasi sektor pertanian.

❖ **Pengertian *Internet of Things* (IoT)**

Konsep IoT (*Internet of Things*) pada dasarnya menitik-beratkan pada kemandirian perangkat keras dalam mengelola informasi. Dengan dukungan jaringan internet, objek-objek tersebut mampu melakukan transmisi dan pemrosesan data secara otomatis tanpa bergantung pada intervensi manusia. Atzori dkk. (2010), IoT adalah paradigma yang memungkinkan objek sehari-hari dilengkapi dengan identitas unik dan kemampuan komunikasi sehingga dapat berinteraksi satu sama lain melalui jaringan internet. Sementara itu, Gubbi dkk. (2013) IoT mengintegrasikan teknologi sensor, komunikasi, dan komputasi untuk menghasilkan sistem cerdas berbasis data. Dengan perkembangan teknologi digital, IoT menjadi fondasi utama dalam berbagai sektor seperti pertanian,

kesehatan, industri, dan smart city. Penerapan IoT memungkinkan efisiensi operasional, pengambilan keputusan berbasis data, serta peningkatan produktivitas secara signifikan. Sistem IoT umumnya terdiri dari beberapa lapisan utama yang saling terintegrasi. Cisco (2016), arsitektur IoT dapat dibagi menjadi empat lapisan utama, yaitu:

Perception Layer (Lapisan Persepsi)

Lapisan ini berfungsi sebagai pengumpul data melalui sensor dan perangkat fisik seperti suhu, kelembaban, GPS, dan lainnya.

Network Layer (Lapisan Jaringan)

Berperan sebagai jembatan pengiriman data, lapisan ini menghubungkan perangkat sensor dengan sistem pusat (*cloud/server*). Dalam mengeksekusi tugasnya, sektor ini mengandalkan berbagai protokol komunikasi digital seperti WiFi, LoRa, atau konektivitas 4G/5G.

Processing Layer (Lapisan Pemrosesan)

Pada tahap ini, data yang diterima akan diproses menggunakan cloud computing atau edge computing untuk menghasilkan informasi yang bernilai.

Application Layer (Lapisan Aplikasi)

Mengintegrasikan data secara langsung (*real-time*) untuk memfasilitasi penentuan keputusan yang lebih efisien dan akurat. Output dari pemrosesan tersebut nantinya diekspos kepada pengguna melalui platform digital, termasuk aplikasi seluler, dashboard analitik, hingga sistem pengawasan (monitoring). Arsitektur ini memungkinkan integrasi data secara *real-time* sehingga mendukung sistem pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat (Gubbi dkk., 2013).

❖ Konsep Penerapan IoT dalam Pertanian

Pertanian presisi memanfaatkan sistem IoT agar pengelolaan komoditas dapat dipantau secara aktual (*real-time*). Berbagai parameter krusial lahan seperti tingkat kelembapan, temperatur, pH tanah, serta paparan cahaya matahari dapat dimonitor secara konstan. Output data ini pada akhirnya berfungsi meningkatkan efisiensi operasional dan ketepatan regulasi yang diambil oleh petani. Rajkumar Buyya, integrasi sensor dan *cloud computing* dalam IoT memungkinkan pengelolaan data pertanian secara cerdas dan adaptif (Buyya dkk., 2013). Selain itu, Luigi Atzori menegaskan IoT mendukung komunikasi antar perangkat untuk menciptakan sistem otomatis yang efisien (Atzori

dkk., 2010). Sistem IoT pada penerapan sector pertanian terdiri dari beberapa komponen yang saling terintegrasi dan saling mendukung, yaitu terdiri:

- a. Sensor dan Aktuator, dalam ekosistem IoT pertanian, sensor dan aktuator menjadi komponen dasar yang bekerja secara simultan. Operasional di lapangan diawali oleh sensor yang mengoleksi parameter lingkungan seperti kadar asam-basa (pH) tanah, temperatur dan kelembapan udara, paparan cahaya, hingga tingkat kelembapan tanah (*soil moisture*). Data tersebut kemudian diolah untuk memicu aktuator dalam mengeksekusi perintah otomatis di area lahan. Perangkat Mikrokontroler, Mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32 yang mempunyai berfungsi sebagai pusat pengolahan data awal sensor dan mengirimkannya ke server.
- b. Jaringan Komunikasi, Teknologi komunikasi seperti MQTT, HTTP, dan CoAP digunakan untuk menghubungkan perangkat IoT. Seperti hal nya Wi-Fi (jarak dekat), LoRa (jarak jauh, hemat energi), GSM/4G (area luas). Jaringan komunikasi merupakan jembatan yang digunakan sebagai penyambung data dari server secara *real-time*.

- c. *Cloud Platform, Cloud* digunakan untuk menyimpan, mengolah, dan menganalisis data dalam skala besar.
- d. *User Interface*, Antarmuka pengguna memungkinkan pengguna memantau dan mengontrol sistem secara *real-time*. Ray (2018), keberhasilan implementasi IoT sangat bergantung pada integrasi yang baik antara perangkat keras dan perangkat lunak.

❖ ***Internet of Things* pada Monitoring Lahan**

Penerapan teknologi berbasis IoT dalam dunia pertanian esensial untuk memicu produktivitas sekaligus menjaga kelestarian lingkungan (Mendrofa, 2021). Melalui platform *smart farming*, kontrol terhadap penggunaan zat kimia (pestisida), manajemen irigasi, pasokan nutrisi, hingga prediksi iklim mikro dapat dilakukan secara digital dan transparan. Data *real-time* yang dihimpun oleh sensor dan sistem monitoring ini memotong tebakan manual, sehingga keputusan yang diambil jauh lebih akurat. Langkah modernisasi ini mempercepat transformasi model agraris konvensional menuju sistem komputasi yang cerdas. (Kaliaperuma, 2022).

Integrasi teknologi informasi, sensor, dan aktuator melalui ekosistem *Internet of Things* (IoT) merupakan

bentuk konkret dari digitalisasi di sektor agrikultur demi mewujudkan budidaya yang efisien serta berwawasan lingkungan. Implementasi *smart farming* global sangat beragam, dengan spektrum aplikasi yang membentang mulai dari otomatisasi saluran irigasi hingga sistem prediksi cuaca mikro yang berbasis sensor kelembapan tanah, penggunaan drone untuk pemantauan lahan dan penyemprotan pestisida, hingga pemanfaatan *big data* dan kecerdasan buatan untuk analisis prediksi panen dan pengelolaan sumber daya. Pengenalan konsep *smart farming* di Indonesia saat ini digerakkan oleh kolaborasi antara program strategis pemerintah dan inisiatif sektor privat. Kendati demikian, akselerasi adopsinya masih terganjal oleh kendala klasik, seperti tingginya modal awal, minimnya literasi digital di kalangan petani, serta ketimpangan infrastruktur. Terlepas dari hambatan tersebut, integrasi teknologi ini menawarkan jalan keluar krusial guna menghadapi tantangan era industri 4.0 melalui sejumlah kontribusi penting:

- a. Optimalisasi Hasil Panen: Keputusan budidaya yang dipandu oleh keakuratan data lapangan terbukti mampu mendongkrak volume dan kualitas produksi secara signifikan.

- b. Presisi Input Pertanian: Kebutuhan vital seperti air, suplemen pupuk, dan zat proteksi (pestisida) dapat disalurkan secara terukur sesuai kebutuhan aktual tanaman di lapangan.
- c. Rasionalisasi Anggaran Operasional: Adopsi sistem mekanisasi dan otomatisasi berhasil memangkas ketergantungan pada upah tenaga kerja manual, sehingga menghemat biaya dalam jangka panjang.
- d. Pengawasan Instan (*Real-time*): Fluktuasi cuaca serta dinamika lahan dapat terus dipantau dari jarak jauh melalui gawai yang terkoneksi internet.
- e. Mitigasi Risiko Sejak Dini: Keberadaan sensor pemantau mempermudah pelacakan serangan hama atau anomali lingkungan sebelum kerusakan meluas.
- f. Ekosistem Ramah Lingkungan: Efisiensi pemakaian bahan-bahan kimia pertanian secara langsung meminimalkan residu berbahaya bagi kelestarian alam sekitar.

Penerapan teknologi digital terpadu terbukti mampu menjawab tantangan modernisasi agraria. Melalui perangkat cerdas IoT, siklus budidaya tanaman yang mencakup penyiapan media tanam, proses penyemaian,

hingga pemeliharaan rutin dapat dikendalikan secara lebih presisi. Sensor tanah yang tertanam di lapangan berfungsi menyediakan data konstan mengenai stabilitas nutrisi dan kadar kelembapan mikro. Pasokan data tanpa jeda ini memandu petani dalam mengeksekusi keputusan secara rasional. Melalui skema ini, *smart farming* mengukuhkan posisinya sebagai bagian tak terpisahkan dari revolusi industri 4.0 yang berorientasi pada keberlanjutan ekosistem (Kaliaperuma, 2022). Adapun implementasi IoT tersebut dapat dilihat pada Gambar berikut:



Gambar 1. Implementasi *Smart Farming*
(Sumber: Lubis, 2025)

Fikry (2025), efektivitas dan adaptabilitas ekosistem *Internet of Things* (IoT) dalam mendukung sektor pertanian modern bertumpu pada keterpaduan lima instrumen utama: sensor, aktuator, mikrokontroler, modul komunikasi, dan platform komputasi awan (cloud). Dalam mekanisme kerjanya, sensor dikerahkan untuk merekam dinamika mikro lingkungan seperti fluktuasi temperatur, tingkat pencahayaan, kelembapan udara, dan kadar air tanah. Data siber tersebut diproses oleh mikrokontroler yang bertindak sebagai unit pemroses sentral. Jika hasil analisis data memerlukan tindakan fisik, aktuator akan bergerak secara otomatis untuk mengeksekusi perintah, misalnya menyalakan sistem ventilasi atau membuka katup pengairan. Seluruh distribusi data dari lapangan menuju platform cloud dijembatani oleh modul konektivitas seperti Wi-Fi, LoRa, atau jaringan GSM. Melalui integrasi ini, petani dapat memantau analisis visual kondisi lahan kapan saja melalui komputer maupun ponsel pintar. Sebagai gambaran nyata, arsitektur IoT ini dapat diaplikasikan dalam bentuk prototipe otomatisasi pengairan lahan. Pada sistem irigasi cerdas ini, mikrokontroler ESP32 diandalkan sebagai unit pengendali utama sekaligus pemegang akses koneksi internet. Pemantauan variabel lingkungan dilakukan secara

simultan menggunakan soil moisture sensor untuk mengukur kadar air dalam tanah serta sensor DHT11 untuk memantau suhu dan kelembapan udara sekitar. Saat sensor mendeteksi bahwa media tanam berada dalam kondisi kritis (kering), ESP32 akan mengirimkan sinyal digital ke relay module untuk mengaktifkan motor DC yang menggerakkan pompa air. Guna menjaga stabilitas operasional, sistem ini disokong oleh catu daya baterai 9V yang tegangannya telah disesuaikan menggunakan *step-down converter* agar tetap aman bagi seluruh komponen mikrokontroler. Secara global, kompilasi literatur ilmiah menunjukkan bahwa penerapan agrikultur cerdas (*smart farming*) ini memiliki spektrum pendekatan yang sangat luas di berbagai negara. Praktiknya membentang dari hal mendasar seperti sistem irigasi otomatis berbasis sensor tanah, pemanfaatan drone untuk pemetaan lahan dan penyemprotan zat proteksi, hingga penggunaan kecerdasan buatan (AI) dan *big data* untuk mengestimasi volume panen serta manajemen logistik. Di Indonesia sendiri, langkah digitalisasi agraria ini mulai diakomodasi melalui program strategis bentukan pemerintah maupun investasi sektor swasta. Kendati demikian, ekspansi teknologi digital ini masih membentur sejumlah tantangan klasik di lapangan, seperti keterbatasan

infrastruktur siber di wilayah pelosok, rendahnya literasi teknologi di kalangan petani, serta tingginya modal investasi awal. Bagaimanapun, di tengah tantangan era industri 4.0, *smart farming* tetap menjadi solusi geopolitik pangan yang strategis. Melalui otomatisasi dan sistem pemantauan yang presisi, teknologi ini tidak hanya mampu mendongkrak produktivitas nasional, tetapi juga menekan pemborosan input alam demi mewujudkan pertanian yang berkelanjutan.

❖ Kontribusi IoT

Akselerasi teknologi *Internet of Things* (IoT) membawa stimulus besar dalam mengonversi lanskap agrikultur konvensional menuju sistem budidaya yang presisi, produktif, dan ramah lingkungan. Landasan operasional teknologi ini bertumpu pada interkoneksi instrumen digital seperti sensor, jaringan komunikasi, dan aktuator yang bekerja secara simultan lewat konektivitas internet untuk mengekstrak sekaligus mengolah data lapangan tanpa jeda waktu (*real-time*). Melalui integrasi siber ini, pelaku usaha tani bisa memperoleh visualisasi data akurat mengenai profil mikro tanah, kelembapan, temperatur udara, tingkat pencahayaan, hingga indikasi awal sebaran organisme pengganggu tanaman (OPT). Parameter empiris inilah yang

kemudian dikonversi menjadi perintah otomatis terukur untuk mengendalikan sistem irigasi, penjadwalan nutrisi, dan kalkulasi tindakan agronomi lainnya. Dampak nyatanya tidak sekadar bermuara pada optimalisasi kuantitas panen, melainkan juga menekan biaya manajerial dan mengeliminasi eksploitasi sumber daya alam secara berlebihan. Lebih dari itu, mitigasi berbasis data ini membentuk ekosistem pertanian yang tangguh dan adaptif dalam menghadapi fluktuasi iklim global yang tidak menentu. Secara spesifik, implikasi IoT di area lahan berfokus pada empat pilar pengawasan strategis:

- a. Pemantauan Mikroklimat: Pengawasan konstan terhadap parameter fundamental seperti temperatur, kelembapan udara, dan paparan cahaya untuk menjaga stabilitas ekosistem tumbuh tanaman.
- b. Nutrisi Presisi: Penentuan dosis pupuk secara rasional yang disesuaikan dengan kebutuhan aktual vegetasi di lapangan berdasarkan pembacaan hara tanah, sehingga mencegah degradasi kualitas lahan.
- c. Perlindungan Tanaman Dini: Deteksi dini terhadap gejala serangan hama maupun patogen penyakit agar tindakan penanggulangan dapat direncanakan secara cepat sebelum terjadi gagal panen.

d. Pengamanan Area Lahan: Proteksi kawasan budidaya dari risiko tindakan kriminal, pencurian komoditas, maupun pemanfaatan lahan ilegal melalui sistem pengawasan nirkabel terpadu. Melalui rantai fungsi tersebut, formulasi kebijakan pertanian tidak lagi bersandar pada intuisi atau perkiraan manual, melainkan berfondasikan pada analisis data yang akurat. Implementasi teknologi yang terarah dan kontekstual ini menjadi kunci utama untuk mempercepat laju modernisasi agraria, khususnya di negara berkembang dengan potensi agraris besar seperti Indonesia.

❖ Contoh Kasus IoT di Indonesia

Perkembangan *smart farming* di berbagai negara menunjukkan penerapan teknologi yang semakin inovatif dan adaptif terhadap kebutuhan lokal. Di tingkat global, berbagai negara maju telah menjadi pelopor dalam penggunaan teknologi pertanian modern berbasis *Internet of Things* (IoT), *artificial intelligence* (AI), dan *big data*. Sementara itu, di Indonesia, meskipun adopsinya masih terbatas, beberapa inisiatif dari pemerintah dan petani milenial mulai menunjukkan potensi besar dalam transformasi sektor pertanian menuju era digital.

Pemanfaatan teknologi digital mutakhir seperti IoT dan kecerdasan buatan menjadi instrumen utama dalam akselerasi *smart farming* global.

Di Indonesia, transformasi ini secara progresif diinisiasi oleh para petani milenial di Jawa Barat dan Yogyakarta melalui pemanfaatan perangkat sensorik dan drone agrikultur. Dukungan aplikasi cerdas, di antaranya AgriAku, Habibi Garden, dan Ladangku, diaplikasikan untuk merekam kelembapan media tanam serta menjadwalkan irigasi secara otomatis berdasarkan indikator riil lapangan. Hasilnya, operasional budidaya menjadi lebih terukur, hemat biaya, dan produktif. Keberhasilan di sektor hulu ini kemudian diintegrasikan dengan pemanfaatan media sosial serta jejaring *e-commerce* di sektor hilir untuk menembus pasar retail secara langsung tanpa ketergantungan pada rantai tengkulak tradisional.

BAB III

***BIG DATA* DAN ANALITIK PREDIKTIF UNTUK PRODUKTIVITAS**

Kemajuan teknologi informasi dan komunikasi telah membawa perubahan yang sangat berarti pada berbagai bidang kehidupan dan sektor produksi meliputi pertanian, industri manufaktur dan agroindustri. Transformasi ini ditandai dengan pergeseran dari sistem produksi konvensional menuju sistem berbasis digital yang lebih adaptif dan efisien. Salah satu fenomena utama yang mendorong perubahan tersebut adalah munculnya konsep *big data* dan pemanfaatannya melalui analitik prediktif. Viktor Mayer-schonberger dan Kenneth (2013), *big data* telah mengubah cara organisasi memahami dan memanfaatkan informasi untuk mendukung pengambilan keputusan strategis.

Istilah *big data* mengacu pada data yang memiliki volume dalam skala besar, kompleks dan terus berkembang yang belum mampu diolah dengan tepat menggunakan

metode konvensional. Karakteristik *big data* yang mencakup volume, velocity dan variety menjadikannya sebagai sumber informasi yang sangat potensial dalam meningkatkan kinerja sistem produksi (Laney, 2001). Dalam konteks produksi, data tersebut dapat berasal dari berbagai sumber seperti sensor lapangan, mesin produksi, sistem logistik, hingga perilaku konsumen. Wolfert dkk. (2017) pemanfaatan teknologi *big data* menunjukkan bahwa pemanfaatannya *big data* dalam sektor pertanian mampu mengoptimalkan efisien operasional dan mendukung pengelolaan usaha tani yang lebih presisi.

Analitik prediktif, disisi lain merupakan analisis data yang bertujuan untuk memprediksi kejadian di masa depan berdasarkan pola historis. Pendekatan ini memanfaatkan metode statistik, pembelajaran mesin (*machine learning*) dan penggalian data (*data mining*) yang dilakukan dalam upaya menghasilkan estimasi yang akurat terhadap berbagai variabel produksi. Siegel (2013) analitik prediktif memungkinkan organisasi untuk mengantisipasi tren dan perilaku di masa depan sehingga dapat meningkatkan kualitas keputusan yang diambil. Integrasi antara *big data* dan analitik prediktif memberikan peluang besar dalam meningkatkan efisiensi, mengurangi risiko, serta

32 | Dr. rer.pol. Ernah S.P., M.Si, dkk.

mengoptimalkan proses pengambilan keputusan dengan memanfaatkan data sebagai dasar utama analisis (*data-driven decision making*). Liakos dkk. (2018) penerapan analitik prediktif dalam sektor pertanian mampu meningkatkan produktivitas serta mengurangi ketidakpastian akibat faktor lingkungan dan pasar. Dengan demikian, pemanfaatan teknologi ini menjadi sangat relevan dalam mendukung sistem produksi yang modern dan berkelanjutan.

❖ Konsep *Big Data*

Big data dapat didefinisikan sebagai himpunan data dengan skala besar, kompleksitas tinggi, dan pertumbuhan yang cepat sehingga memerlukan teknologi khusus dalam pengelolaannya. Karakteristik utama *big data* dikenal dengan konsep 3V (*volume, velocity, variety*) yang kemudian berkembang menjadi 5 V dengan tambahan veracity dan value (Laney, 2001). Dalam konteks produksi, *big data* memungkinkan integrasi berbagai sumber data sehingga dapat memberikan informasi yang lebih komprehensif dalam mendukung pengambilan keputusan. Wolfert dkk. (2017) mengungkapkan tentang pemanfaatan *big data*

dalam sektor usaha tani mampu meningkatkan efisiensi sistem produksi melalui pengolahan data secara real time

Sumber *Big Data* dalam Sistem Produksi

Dalam sistem produksi, sumber data bersifat sangat beragam dan terus mengalami peningkatan jumlah maupun variasi akibat perkembangan teknologi digital. Dalam era digitalisasi, data tidak lagi hanya berasal dari pencatatan manual atau sistem administrasi sederhana, tetapi juga dihasilkan secara otomatis dari berbagai perangkat dan aktivitas yang berintegrasi dengan sistem produksi. *Big data* dalam konteks ini merupakan hasil agregasi data dari berbagai sumber heterogen yang saling terhubung, baik yang memiliki pola tertentu maupun yang tidak berpola (Wolfert dkk., 2017).

Pertama, data berbasis sensor dan *Internet of Things* (IOT) merupakan salah satu sumber utama *big data* dalam sistem produksi modern. Sensor digunakan dalam pengumpulan data secara langsung (*real-time*) terkait keadaan lingkungan serta proses produksi, seperti suhu, kelembaban, curah hujan, pH tanah, serta pertumbuhan tanaman. Teknologi IOT memungkinkan pengambilan data secara kontinu dan akurat, sehingga dapat meningkatkan

ketepatan dalam pengambilan keputusan produksi. Penggunaan sensor mampu menghasilkan data dengan frekuensi tinggi yang sangat relevan untuk analisis produksi berbasis presisi (Zhang & Liu, 2019; Liakos dkk., 2018).

Kedua, data operasional atau process-mediated data merupakan data yang dihasilkan dari aktivitas rutin dalam sistem produksi, seperti penggunaan input (benih, pupuk, tenaga kerja), jadwal tanam, panen, dan data distribusi hasil. Data ini umumnya bersifat terstruktur dan tersimpan dalam sistem informasi manajemen. Keberadaan data operasional sangat penting karena menjadi dasar dalam analisis efisiensi dan produktivitas usaha produksi (Wolfert dkk., 2017).

Ketiga, data yang dihasilkan oleh mesin (*machine-generated data*) berasal dari penggunaan alat dan teknologi modern seperti mesin pertanian, drone dan sistem otomatisasi produksi. Data ini mencakup informasi mengenai biaya mesin, penggunaan energi, serta kondisi operasional alat. Dengan berkembangnya teknologi IoT dan otomatisasi, data jenis ini semakin dominan dalam sistem produksi modern (Liakos dkk., 2018).

Keempat, data spasial dan citra (*geospatial data*) yang diperoleh dari satelit, drone, dan sistem GPS juga menjadi sumber penting dalam *big data* produksi. Data ini digunakan

untuk memantau kondisi lahan, pola penggunaan lahan, seta distribusi sumber daya. Intregasi data spasial memungkinkan analisis yang lebih komprehensif dalam pengelolaan produksi, khususnya dalam Pertanian presisi (chergui & Kechadi, 2022).

Kelima, data rantai pasok (*supply chain data*) mencakup informasi terkait distribusi logistik, permintaan pasar serta pergerakan produksi dari produsen ke konsumen. *Big data* memungkinkan intregasi informasi sepanjang rantai pasok sehingga meningkatkan transparansi, efisiensi, dan responsivitas terhadap perubahan pasar. *Big data* memainkan peran penting dalam meningkatkan kinerja rantai pasok agribisnis melalui analisis data secara *real-time* (Rejeb dkk. 2021).

Keenam, fata konsumen dan pasar yang berasal dari transaksi digital, media sosial, dan platform *e-commerce* memberikan informasi mengenai preferensi pola konsumsi, serta tren permintaan. Data ini sangat penting dalam menentukan strategi produksi agar sesuai dengan kebutuhan pasar (Mayer-Schonberger & Cukier, 2013).

Ketujuh, data berbasis pengetahuan manusia (*human-sourced data*) seperti pengalaman petani, penyuluh, dan palaku usaha juga merupakan sumber data yang penting

meskipun seringkali sulit terdokumentasi secara sistematis. Data ini biasanya bersifat tidak terstruktur, namun memiliki nilai tinggi dalam pengambilan keputusan berbasis lokalitas dan pengalaman lapangan (Wolfert dkk, 2017).

Secara keseluruhan, keberagaman sumber data ini mencerminkan kompleksitas sistem produksi modern. Integrasi berbagai sumber data tersebut menjadi kunci dalam menghasilkan informasi yang bernilai dalam upaya peningkatan optimalisasi penggunaan sumber daya, peningkatan output dan sustainabilitas sistem produksi. Dengan demikian, pengelolaan *big data* bukan semata-mata berorientasi pada volume data, melainkan juga terhadap kemampuan dalam mengintegrasikan, menganalisis, dan menginterpretasikan data dari berbagai sumber secara holistik.

❖ **Analitik Prediktif**

Analitik prediktif merupakan pendekatan analisis data yang memanfaatkan pendekatan teknik analisis statistik, pembelajaran mesin (*machine learning*), dan penggalian data (*data mining*) dimanfaatkan untuk menemukan pola historis berikut memprediksi kejadian di masa depan. Dalam konteks sistem produksi, analitik prediktif digunakan untuk

memperkirakan hasil produksi, permintaan pasar, serta potensi risiko seperti kegagalan panen atau gangguan rantai pasok. Eric Siegel (2016), analitik prediktif mempunyai kontribusi terhadap peningkatan kualitas proses penentuan keputusan yang berlandaskan pada data karena mampu mengubah data menjadi wawasan yang dapat ditindaklanjuti.

Metode yang umum digunakan meliputi regresi, time series analysis, serta algoritma *machine learning* seperti decision tree dan neural network (Liakos dkk., 2018). Viktor Nayer-Schonberger dan Kenneth Cukier (2013), pemanfaatan *big data* dalam analitik prediktif memungkinkan peningkatan akurasi prediktif secara signifikan. Sari dkk. (2020) model regresi mampu memberikan estimasi yang akurat dalam mengidentifikasi berbagai faktor yang berpengaruh terhadap peningkatan produktivitas usaha pertanian di Indonesia.

Model Regresi dalam Produksi

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n$$

Model Regresi merupakan teknik statistik yang digunakan dalam menganalisis keterkaitan pada variabel dependen (*output* produksi) dengan satu atau lebih variabel independen

(input produksi). Dalam konteks agribisnis, variabel input dapat berupa luas lahan, penggunaan pupuk, tenaga kerja, serta faktor iklim seperti curah hujan dan suhu. Model ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi faktor-faktor dominan yang mempengaruhi hasil produksi sekaligus mengukur besarnya pengaruh masing-masing variabel secara kuantitatif. Gujarati (2004), model regresi tidak hanya digunakan untuk mengestimasi hubungan antar variabel tetapi juga memiliki fungsi penting dalam prediksi dan peramalan. Dalam praktiknya, model regresi banyak diterapkan dalam analisis produksi pertanian untuk meningkatkan efisiensi penggunaan input dan mengoptimalkan hasil produksi. Sari dkk. (2020) model regresi mampu memberikan estimasi yang akurat dalam mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas usaha tani di Indonesia.

Analisis Time Series

$$Y_t = \alpha + \beta t + \epsilon_t$$

Analisis *time series* merupakan teknik statistik yang dimanfaatkan untuk menganalisis data yang telah di himpun secara berurutan dalam tenggang waktu tertentu. Dalam sistem produksi, metode ini memiliki peran penting dalam

memprediksi tren produksi, permintaan pasar, serta fluktuasi harga komoditas. Model time series memanfaatkan pola historis seperti tren, pola musim serta siklus untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat dan reliabel.

Box dkk. (2015), pendekatan *time series* sangat efektif dalam peramalan jangka pendek maupun jangka panjang, terutama ketika pola data dapat diidentifikasi dengan baik. Dalam sektor agribisnis, metode ini sering digunakan untuk meramalkan produksi padi, harga komoditas, serta kebutuhan pasar. Badan Pusat Statistik (2021) analisis deret waktu dapat dimanfaatkan untuk memproyeksikan produksi dan konsumsi pangan nasional secara lebih sistematis dan terukur.

Machine Learning

Metode pembelajaran *machine learning* termasuk dalam cabang kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) yang memungkinkan sistem untuk belajar dari data tanpa harus diprogram secara eksplisit. Dalam analitik prediktif, metode seperti *decision tree*, *random forest*, dan *neural network* banyak digunakan dikarenakan kemampuannya dalam mengidentifikasi pola yang kompleks serta keterkaitan yang tidak linear dalam data. Liakos et al, (2018), Penerapan

machine learning dalam sektor pertanian mampu meningkatkan akurasi prediksi produksi sekaligus meningkatkan efisiensi pengelolaan sumber daya. Selain itu, metode ini juga mampu mengidentifikasi pola tersembunyi yang sulit dideteksi dengan pendekatan statistik konvensional. Ethem Alpaydin (2014), keunggulan utama *machine learning* terletak pada kemampuannya dalam pengelolaan data dalam skala besar (*big data*) secara cepat, adaptif, dan berkelanjutan. Rahawati (2021) penerapan teknologi berbasis *machine learning* dalam agribisnis mampu meningkatkan produktivitas serta efisiensi usahatani secara signifikan.

❖ Penerapan dalam Produksi Agribisnis

Pemanfaatan *big data* dan analitik prediktif dalam perencanaan produksi memungkinkan pelaku agribisnis untuk menyusun strategis produksi yang lebih akurat dan adaptif terhadap dinamika pasar. Melalui analisis data historis permintaan, tren konsumsi, serta faktor musiman, pelaku usaha dapat memprediksi kebutuhan pasar dimasa mendatang. Hal ini memungkinkan penyesuaian volume produksi sehingga dapat mengurangi risiko kelebihan atau kekurangan pasokan. Wolfert dkk. (2017), "*The use of big*

data in agriculture enable more precise and data driven farm management by integrating multiple data sources in real time". Selain itu Viktor Mayer-Schonberger dan Cukier (2013) analisis data dalam skala besar memungkinkan organisasi mengambil keputusan yang lebih cepat dan akurat. Badan Pusat Statistik (2021) data produksi dan konsumsi dapat digunakan untuk perencanaan pangan yang lebih efektif.

Optimasi Input Produksi

Analitik prediktif berperan penting dalam mengoptimalkan input produksi seperti pupuk, air, dan tenaga kerja. Dengan memanfaatkan data historis dan kondisi aktual lapangan, sistem dapat memberikan rekomendasi penggunaan input secara tepat guna dan efisien. Hal ini sangat relevan dalam konsep pertanian presisi (*precision agriculture*), dimana setiap input diberikan sesuai kebutuhan spesifik tanaman dan kondisi lahan. Liakos dkk. (2018), penggunaan teknologi berbasis data bisa mendorong efisiensi penggunaan sumberdaya serta menekan efek negatif terhadap lingkungan. Prasetyo (2012) analisis data dapat membantu dalam mengidentifikasi pola penggunaan input yang optimal. Sari dkk. (2020) pemanfaatan data operasional

mampu meningkatkan efisiensi usaha tani serta menurunkan biaya produksi secara signifikan.

Contoh pengolahan data analitik prediktif untuk optimasi input produksi (*Multi-Variabel*). Variabel input yang digunakan lebih komprehensif, meliputi: pupuk (kg/ha), air irigasi (mm), benih (kg/ha), tenaga kerja (HOK) dan pestisida (liter/ha).

Tabel 1. Data Historis (Simulasi Realistik)

Musim	Pupuk	Air	Benih	Tenaga Kerja	Pestisida	Hasil (ton/ha)
1	200	800	20	25	1,0	5,8
2	220	850	22	26	1,2	6,1
3	250	900	25	27	1,5	6,5
4	270	950	25	28	1,7	6,6
5	300	1000	28	30	2,0	6,7

Berdasarkan hasil pengamatan terhadap data historis yang tersaji pada Tabel 1, terlihat adanya hubungan positif antara seluruh variabel input produksi dan out put produksi hasil panen, dimana peningkatan penggunaan input secara umum di ikuti oleh peningkatan produksi. Namun demikian, peningkatan tersebut tidak berlangsung proposional, melainkan menunjukkan kecenderungan diminishing

marginal return, yaitu tambahan hasil yang semakin menurun pada setiap peningkatan input.

Selain itu, variabel seperti benih dan pestisida mulai menunjukkan pola hubungan yang tidak sepenuhnya linear terhadap hasil produksi, yang mengindikasikan adanya potensi efek non linear dalam kontribusinya terhadap output. Pentingnya penggunaan model analitik prediktif yang lebih fleksibel seperti regresi berganda, untuk menangkap kompleksitas hubungan antar variabel dalam sistem produksi pertanian.

$$Y = a + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4 + b_5X_5$$

Keterangan:

Y = Hasil Produksi

a = Konstanta

b = Koefisien Regresi

X₁ = Pupuk

X₂ = Air

X₃ = Benih

X₄ = Tenaga Kerja

X₅ = Pestisida

Hasil estimasi model (Simulasi Output Analitik):

$$Y = -1.2 + 0,008X_1 + 0,002X_2 + 0,03X_3 + 0,05X_4 + 0,4X_5$$

Berdasarkan hasil estimasi model analitik prediktif, dilakukan simulasi untuk menentukan input produksi yang menghasilkan tingkat output yang optimal. Pada skenario optimal, nilai variabel input ditetapkan sebagai berikut penggunaan pupuk sebesar 250 kg/ha. Ketersediaan air 900 mm, penggunaan benih sebanyak 25 kg/ha, tenaga kerja sebesar 27 HOK, serta penggunaan pestisida sebanyak 1,5 liter/ha.

$$\begin{aligned} Y &= -1,2 + (0,008 \times 250) + (0,002 \times 900) + (0,03 \times 25) + (0,05 \times 27) + (0,04 \times 1,5) \\ &= -1,2 + 2 + 1,8 + 0,75 + 1,35 + 0,6 \\ &= 5,3 \text{ ton/ha} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil substitusi ke dalam model analitik prediktif, diperoleh output produksi sebesar $Y = 5,3$ ton/ha. Nilai ini merupakan estimasi hasil panen yang dihasilkan dari kombinasi input produksi optimal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa setiap variabel input memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan produksi.

Tabel 2. Interpretasi Tabel Simulasi

Variabel input	Nilai input	Koesfisien	Kontribusi terhadap output
Pupuk	250 kg	0,008	2,00
Air	900 mm	0,002	1,80
Benih	25 kg	0,03	0,75
Tenaga kerja	27 HOK	0,05	1,35
Pestisida	1,5 liter	0,4	0,60
Konstanta	-	-1,2	-1,20
Total output	-	-	5,30 ton/ha

Berdasarkan data Tabel 2, terlihat bahwa pupuk dan air merupakan variabel dengan kontribusi terbesar terhadap output produksi. Sementara, pestisida memiliki kontribusi relatif kecil dalam peningkatkan hasil, namun tetap penting dalam menjaga stabilitas produksi dari gangguan organisme pengganggu tanaman. Analsis ini menunjukkan bahwa setiap input memiliki kontribusi yang berbeda terhadap output, sehingga keputusan penggunaan input harus mem-pertimbangkan tingkat efisiensi marginal masing-masing faktor. Dengan demikian, pendekatan berbasis data ini sangat relevan dalam mendukung pengembangan sistem pertanian presisi dan manajemen agribisnis modern.

❖ Prediksi Risiko Produksi

Analitik prediktif memungkinkan identifikasi dan mitigasi risiko produksi secara lebih dini, terutama yang disebabkan oleh faktor eksternal seperti perubahan iklim, serangan hama, dan fluktuasi cuaca. Dengan menggunakan data historis dan model prediksi, pelaku agribisnis dapat memperkirakan kemungkinan terjadinya gagal panen dan mengambil langkah antisipatif. Liakos dkk. (2018), penggunaan *machine learning* dalam pertanian mampu meningkatkan akurasi prediksi risiko hingga tingkat yang signifikan. Selain itu, *Food and Agriculture Organization* (2019), teknologi digital dapat membantu petani dalam mengelola risiko iklim secara efektif. Kementerian Pertanian Republik Indonesia (2020) menekankan pentingnya sistem informasi berbasis data dalam mengurangi risiko produksi dan meningkatkan ketahanan pangan nasional. Analisis risiko berbasis data memanfaatkan data yang mempunyai skala besar yang dihimpun dari berbagai jenis, seperti:

- a. Iklim (curah hujan, suhu, kelembaban)
- b. Data produksi historis
- c. Data kondisi lahan
- d. Data serangan hama dan penyakit
- e. Data infrastruktur pertanian

Dalam konteks sederhana, analitik prediktif dapat menggunakan model skor berbobot untuk mengklasifikasikan tingkat risiko produksi.

$$\text{Skor risiko} = (b_1X_1) + (b_2X_2)$$

Keterangan:

X_1 = curah hujan tinggi (1 = ya, 0 = tidak)

X_2 = drainase buruk (1 = ya, 0 = tidak)

B_1, b_2 = bobot pengaruh variabel

Jika hasil regresi menunjukkan:

Curah hujan → Koefisien = 0,5

Drainase → Koefisien = 1,0

Maka bisa disederhanakan menjadi

$$B_1 = 1$$

$$B_2 = 2$$

$$\text{Skor} = (1 \times 1) + (2 \times 1)$$

$$= 1 + 2$$

$$= 3$$

Tabel 3. Kategori Risiko

Skor Risiko	Kategori Risiko	Interpretasi
0 – 1	Rendah	Kondisi aman, kecil kemungkinan gagal panen
2	Sedang	Perlu perhatian dan mitigasi ringan
3 – 4	Tinggi	Risiko gagal panen tinggi, perlu tindakan segera

Kombinasi curah hujan tinggi dan drainase buruk secara signifikan meningkatkan risiko kegagalan produksi. Kondisi ini mengindikasikan bahawa sistem produksi berada dalam kondisi rentan dan membutuhkan intervensi segera seperti perbaikan infrastruktur drainase atau penyesuaian pola tanam. Curah hujan ekstrem dan kondisi drainase yang buruk telah terbukti meningkatkan risiko kegagalan produksi pertanian. Hujan berlebih dapat menyebabkan genangan air (*waterlogging*) yang menghambat pertumbuhan tanaman dan menurunkan hasil panen (Hatfield dkk., 2014).

Meningkatkan Efisiensi Produksi

Penerapan *big data* dan analitik prediktif mampu meningkatkan efisiensi produksi melalui pemanfaatan data secara optimal dalam setiap tahapan produksi. Pengumpulam data yang diperoleh melalui berbagai sumber seperti sensor, sistem operasional dan kondisi lingkungan memungkinkan pelaku agribisnis untuk mengidentifikasi ketidakefisienan dan melakukan perbaikan secara tepat sasaran. Dalam pertanian padi berbasis *smart farming* digunakan sensor kelembaban tanah dan cuaca yang terintegasi dengan jaringan IoT.

Data yang dikumpulkan secara real time kemudian dianalisis untuk menentukan waktu irigasi dan pemupukan yang optimal. Penggunaan sistem informasi pertanian juga terbukti meningkatkan efisiensi produksi di tingkat petani (Sari dkk., 2020). Pendekatan dengan metode ini memungkinkan petani menghindari penyiraman berlebih dan penggunaan pupuk yang tidak tepat waktu. Wolfert dkk. (2017) integrasi data real time mampu meningkatkan efisiensi produksi secara signifikan. Sengan demikian, efisiensi tidak hanya tercapai dari sisi biaya, tetapi juga dari optimalisasi proses produksi secara keseluruhan.

Mengurangi Biaya Operasional

Big data dan analitik prediktif berkontribusi dalam menekan biaya operasional melalui optimasi penggunaan input produksi seperti pupuk, air dan tenaga kerja. Dengan adanya prediksi yang akurat, penggunaan sumber daya dapat disesuaikan dengan kebutuhan actual sehingga menghindari pemborosan. Analitik prediktif juga berperan dalam penerapan *predictive maintenance* untuk mengurangi pengeluaran pemeliharaan mesin sekaligus meminimalkan risiko kerusakan yang tidak terantisipasi, sebagai contoh sebuah unit penggilingan padi yang menggunakan sistem berbasis data mampu mengurangi biaya perawatan hingga 15-25 % karena kerusakan mesin dapat dicegah lebih awal melalui pendekatan *predeictive maintenance*. Brynjolfsson dkk. (2011) perusahaan yang mengadopsi pendekatan berbasis data mamapu mengurangi biaya operasional secara signifikan.

Meningkatkan Akurasi Perencanaan

Penggunaan *big data* an analitik Prediktif menjadikan perencanaan yang lebih akurat karena didasarkan pada analisis data historis dan kondisi aktual. Dalam agribisnis, perencanaan yang akurat sangat penting untuk menentukan

waktu tanam, jumlah produksi, serta strategi distribusi. Analitik prediktif mampu mengidentifikasi pola musiman, tren permintaan, serta faktor risiko sehingga menghasilkan proyeksi yang lebih tepat. George Box dkk. (2015), model prediksi berbasis data historis dapat meningkatkan ketepatan peramalan jika pola data dapat diidentifikasi dengan baik. Badan Pusat Statistik (2021) pemanfaatan data statistik sangat penting dalam perencanaan pangan nasional.

Mendukung Pengambilan Keputusan Strategis

Big data dan analitik prediktif memberikan dukungan signifikan dalam pengambilan keputusan strategis dengan menyediakan informasi yang akurat, relevanda tepat waktu. Keputusan strategis dalam agribisnis, seperti ekspansi usaha, diversifikasi produksi, dan pengelolaan risiko, sangat tergantung pada kualitas informasi yang tersedia. Dengan analitik prediktif, pelaku usaha dapat mengevaluasi berbagai skenario dan memilih strategi terbaik berdasarkan hasil analisis data. Siegel (2016), analitik prediktif memungkinkan organisasi untuk mengantisipasi tren masa depan dan meningkatkan kualitas keputusan strategis. Implementasi sistem berbasis data juga terbukti

meningkatkan daya saing agribisnis (Kementerian Pertanian, 2020).

Tantangan Implementasi di Indonesia

Implementasi *big data* dan analitik prediktif dalam sektor agribisnis di Indonesia menghadapi sejumlah kendala struktural yang saling terkait, terutama terkait infrastruktur digital, literasi data dan kualitas data. Keterbatasan infrastruktur digital masih menjadi hambatan utama, khususnya di wilayah pedesaan yang merupakan basis produksi pertanian. Akses internet yang merata menyebabkan keterbatasan dalam pengumpulan dan transmisi data secara real time, sehingga menghambat penerapan teknologi berbasis IoT dan sistem informasi pertanian. Badan Pusat Statistik (2021) menunjukkan adanya kesenjangan signifikan dalam akses teknologi antara wilayah perkotaan dan pedesaan.

Rendahnya literasi data di kalangan petani dan pelaku agribisnis menjadi tantangan serius. Banyak pelaku usaha belum memiliki kemampuan untuk memahami, menginterpretasikan dan memanfaatkan data dalam pengambilan keputusan. FAO (2019), kapasitas sumberdaya manusia

merupakan faktor kunci dalam keberhasilan transformasi digital di sektor pertanian.

Kualitas data yang belum optimal juga menjadi kendala penting. Data yang tersedia seringkali tidak lengkap, tidak konsisten, dan tidak terstandarisasi, sehingga berpotensi menghasilkan analisis yang bias. Wolfert dkk. (2017), kualitas data merupakan faktor krusial dalam keberhasilan implementasi *big data* di bidang pertanian. Sari dkk. (2020) keterbatasan kualitas data menghambat efektivitas sistem informasi pertanian.

Implementasi *big data* di Indonesia menghadapi berbagai tantangan yang meliputi aspek teknis, kelembagaan dan kapasitas tenaga kerja. Upaya pengembangan infrastruktur digital, peningkatan kemampuan literasi data, serta penerapan standar pengelolaan data yang terintegritas diperlukan guna mendorong keberhasilan transformasi digital di sektor agribisnis secara optimal.

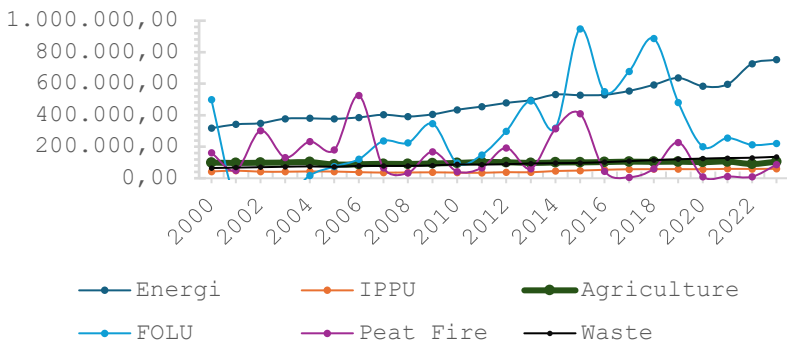
BAB IV

DAMPAK EKOLOGIS PERTANIAN PRESISI PADA EKOSISTEM

Ancaman *climate change* menuntut pertanian Indonesia menerapkan berbagai macam adaptasi dan mitigasi sebagai upaya meminimalisir dampak iklim yang dapat mempengaruhi tidak hanya sistem budidaya pertanian, namun juga dampak terhadap ekonomi secara umum. Beberapa dampak yang semakin intens dari *climate change* terhadap kondisi pertanian yang termasuk dalam kategori rawan terhadap *exposure* perubahan iklim ini, termasuk diantaranya adalah dampak terhadap produksi pertanian (Azdagaz dkk., 2025; Raoufi dkk., 2025; Emediegwu dkk., 2022), *agriculture productivity* (Ahmad dkk., 2026). Selain dampak terhadap komoditas pertanian, *climate change* juga sangat berpengaruh terhadap sektor peternakan utamanya berkaitan dengan berlangsungnya musim kemarau panjang yang berpengaruh pada kapasitas ketersediaan hijauan (Manucharyan, 2025), selain itu dampak *climate change* juga

dapat berpengaruh pada keberlangsungan ketersediaan nutrisi pada sumber air (*freshwater*) (Missault dkk., 2026).

Di sisi lain, sektor pertanian menghadapi *status quo* dimana pertanian tidak hanya menghadapi tantangan dampak *climate change*, namun disisi lain, statistik juga mencatat kontribusi sektor pertanian pada presentasi *greenhouse gass* (GHG) *emission* yang akan menentukan intensitas *climate change* dimasa mendatang. Berikut ini disajikan detail dampak pertanian terhadap lingkungan utamanya kontribusi pada GHG *emission*. Sehingga memerlukan cara adaptif dan mitigatif guna mengurangi dampak lingkungan.



Gambar 2. GHG *Emission* Berdasarkan Sektor (*thousand tons of CO₂e*) (BPS, 2026)

Upaya menghadapi perubahan iklim dalam sektor pertanian umumnya dibedakan menjadi dua pendekatan utama, yaitu adaptasi dan mitigasi. Adaptasi mencakup berbagai strategi untuk menyesuaikan sistem pertanian terhadap dampak perubahan iklim, seperti penggunaan varietas tahan kekeringan dan banjir, penyesuaian kalender tanam, diversifikasi komoditas, serta pengelolaan air yang lebih efisien. Sementara itu, mitigasi berfokus pada upaya mengurangi emisi gas rumah kaca atau *greenhouse gas emission* (GHG) dari aktivitas pertanian, misalnya melalui efisiensi penggunaan pupuk, pengelolaan limbah pertanian, praktik pertanian konservasi, serta peningkatan penyerapan karbon melalui agroforestri.

Dalam konteks tersebut, diperlukan pendekatan inovatif yang mampu mengintegrasikan tujuan adaptasi dan mitigasi secara simultan. Salah satu alternatif strategi yang berkembang pesat adalah penerapan pertanian presisi (*precision agriculture*), yang memanfaatkan teknologi untuk meningkatkan efisiensi input sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Shahab dkk. (2024) mengintegrasikan *advanced technology* seperti *Internet of Things* (IOT) dan *machine learning* pada praktek budidaya pertanian menjadi hal yang sangat esensial untuk meningkatkan keberlanjutan dan

efisiensi produksi. Pertanian presisi, yang juga dikenal sebagai *precision farming* atau *site-specific crop management*, merupakan strategi pertanian yang bersifat progresif. Pendekatan ini memanfaatkan teknologi canggih untuk meningkatkan efisiensi, meningkatkan hasil panen, serta mendorong keberlanjutan dan pengelolaan lingkungan yang lebih baik (Sattar dkk., 2026). Teknologi pertanian presisi ini secara luas dipromosikan mengingat potensinya dalam meningkatkan keberlanjutan, efisiensi, dan ketahanan dalam sistem pertanian (Oosterwijk dkk., 2026). Zeng dkk. (2026) pengembangan pertanian rendah karbon telah menjadi isu krusial, ditambah lagi dengan semakin berkembang pesatnya *digital technology*, telah memicu mengembangkan teknologi pertanian presisi yang lebih adaptif. Perubahan ini mendorong sektor pertanian untuk beralih dari metode tradisional yang kurang presisi dan sangat bergantung pada kondisi cuaca (Wang dkk. 2023; Li dkk., 2025), menuju model pertanian presisi yang mengandalkan pendekatan berbasis data serta pengambilan keputusan yang lebih cerdas (Vermeulen dkk., 2024).

Dalam penerapannya, teknologi *precision agriculture* dapat berupa beberapa macam aplikasi teknologi seperti (1) pemupukan dengan dosis variabel, (2) penanaman presisi,

dan (3) irigasi presisi, yang memungkinkan petani untuk menargetkan penggunaan input secara tepat pada lahan tertentu, sehingga mengurangi pemborosan dan menghemat sumber daya, yang pada akhirnya berkontribusi pada peningkatan hasil panen serta perbaikan kesehatan tanah (Shahab dkk., 2024). Melalui strategi pengukuran yang lebih presisi dibandingkan dengan aplikasi lahan konvensional pada umumnya, menjadikan petani lebih dapat berinvestasi pada hasil melalui efisiensi input pertanian. Hal ini juga secara otomatis dapat menjadi potensi mitigasi *carbon footprint* melalui efisiensi praktek budidaya tersebut, sehingga *precision agriculture* ini diestimasikan akan dapat meningkatkan daya dukung lingkungan yang lebih berkelanjutan.



(1)



(2)

Note:

¹ Gambar sensor pengukuran nutrisi dan *moisture* tanaman (Toselli dkk., 2023)

² Gambar sistem irigasi tetes dengan IOT (Irshad dkk., 2022)

Gambar 3. Penerapan Teknologi Pertanian Presisi pada Lahan Pertanian

❖ Perbandingan Pertanian Presisi VS Konvensional

Pertanian konvensional umumnya mengandalkan praktik yang seragam (*uniform application*), di mana input seperti pupuk, air, dan pestisida diberikan dalam jumlah yang sama di seluruh lahan. Pendekatan ini relatif sederhana dan mudah diterapkan, namun seringkali mengabaikan heterogenitas spasial dalam kondisi tanah, kebutuhan tanaman, serta variasi iklim mikro. Akibatnya, terjadi inefisiensi penggunaan input, peningkatan biaya produksi, serta potensi degradasi lingkungan akibat *overuse*. Selain itu, dampak terburuk dari pertanian konvensional yang seringkali terjadi *fertilizer overuse* juga berdampak secara

langsung pada peningkatan emisi karbon (*GHG emission*). Hasil observasi dari Xu dkk. (2023) berkaitan dengan *excessive synthetic fertilizers*, aplikasi pupuk yang berlebihan utamanya *nitrogen fertilizer* menghasilkan GHG emisi yang melebihi rata-rata emisi global. Oleh karena itu, standar pengukuran penggunaan pupuk yang optimal, dan bukan maksimal, menjadi salah satu dasar dalam *chapter* ini dalam mengaplikasikan teknologi *precision agriculture* guna mendukung pertanian yang berkelanjutan dengan efisiensi input pertanian yang lebih terukur.

Sebaliknya, pertanian presisi mengadopsi pendekatan berbasis lokasi (*site-specific management*) yang memanfaatkan data spasial, sensor, dan teknologi digital untuk menyesuaikan penggunaan input sesuai kebutuhan spesifik tiap bagian lahan. Hal ini memungkinkan peningkatan efisiensi teknis dan alokatif, karena input diberikan secara optimal. Selain itu, pendekatan ini juga meningkatkan kemampuan petani dalam mengelola risiko, terutama dalam menghadapi variabilitas iklim dan ketidakpastian produksi. Pada sub-bab *chapter* ini, penulis menyajikan beberapa perbandingan antara peningkatan kondisi lahan pertanian yang telah menggunakan *precision agriculture*,

dibandingkan dengan pertanian konvensional pada umumnya, mulai dari praktis dan dampaknya.



Gambar 4. Proses Perkembangan Pertanian Berkelanjutan Berbasis Teknologi

Sumber: Shahab dkk. (2024).

Pada praktiknya, pengembangan teknologi pertanian presisi diestimasikan dapat menjawab tantangan sektor pertanian yang tergolong rawan dalam menghadapi tantangan perubahan iklim. Petani diharapkan dapat mulai beradaptasi dari sebelumnya melakukan praktik budidaya konvensional yang cenderung *excessive* dalam penggunaan input, menjadi lebih efisien, sehingga secara tidak langsung akan berdampak pada lingkungan pertanian utamanya kontribusi pada penurunan GHG *emission*. Secara lebih detail, perbedaan perkembangan antara pertanian

konvensional yang bergantung pada *feeling* atau takaran konservatif petani dibandingkan dengan teknologi pertanian presisi akan dijelaskan lebih detail berikut ini.



(1)



(2)

¹ *Smart-farming on closed hydroponic or vertical farming*
(Sumber: indoorfarmsys.com, 2025)

² Budidaya sayur konvensional (Sumber: Rismawan, 2023)

Gambar 5. Ilustrasi Perbandingan Penerapan Teknologi Pertanian Presisi dengan Konvensional

Dari gambar 5, tersebut, terdapat perbedaan yang cukup signifikan utama dalam hal teknik budidaya sayuran antara pe-nerapan *smart-precision agriculture technology* dibandingkan dengan budidaya konvensional pada umumnya. Pada dasarnya, salah satu keunggulan dari pertanian presisi, selain dari terdapat standar ukuran nutrisi yang perlu disediakan pada tanaman sesuai kebutuhan nutrisi per tanaman, pertanian presisi juga memiliki keunggulan efisiensi *square meter* lahan pertanian

yang digunakan. Seperti contoh gambar diatas, dalam praktik budidaya hidroponik pada ruang tertutup, tanaman akan lebih terproteksi dari risiko serangan organisme pengganggu tanaman (OPT), serta efisiensi lahan yang secara tidak langsung juga mengurangi emisi karbon dari lahan yang diminimalkan. Malabadi dkk. (2024) *hydroponics* yang dikombinasikan dengan *vertical farming* dengan menerapkan teknologi *precision agriculture* seperti *Internet of Things* (IoT) mampu menghemat ruang, mengurangi penggunaan air, serta meningkatkan hasil per satuan luas area tanam. Dibandingkan dengan budidaya pada *conventional greenhouse*, sistem hidroponik memerlukan lebih sedikit pupuk, pestisida, dan air karena adanya pengendalian distribusi input yang lebih presisi.

Selain itu, penerapan *precision agriculture* tetap dapat dilakukan pada lahan besar dengan penerapan teknologi *smart irrigation*. Pada gambar 6 dibawah ini ilustrasikan visual *smart irrigation* dibandingkan dengan irigasi konvensional pada umumnya.



(1)



(2)

¹Aplikasi teknologi irigasi terukur (Sumber: loggerindo.co.id, 2021)

²Budidaya dengan sistem irigasi konvensional (Sumber: Solusi Lingkungan Industri Nusantara, 2024)

Gambar 6. Ilustrasi Perbandingan Penerapan Irigasi Otomatis dengan Konvensional

Secara keseluruhan, aplikasi pertanian presisi pada lahan pertanian, termasuk penggunaan *smart irrigation* akan sangat bermanfaat bagi petani. Melalui penerapan berbagai teknologi seperti irigasi cerdas, pertanian presisi, pemantauan tanaman dan tanah, rumah kaca pintar, manajemen rantai pasok, pemantauan ternak, penggunaan drone pertanian, serta pengelolaan hama dan penyakit, petani dapat meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan (Kumar dkk., 2024),.

❖ Penerapan Teknologi *Precision Agriculture* dan Dampak Lingkungan

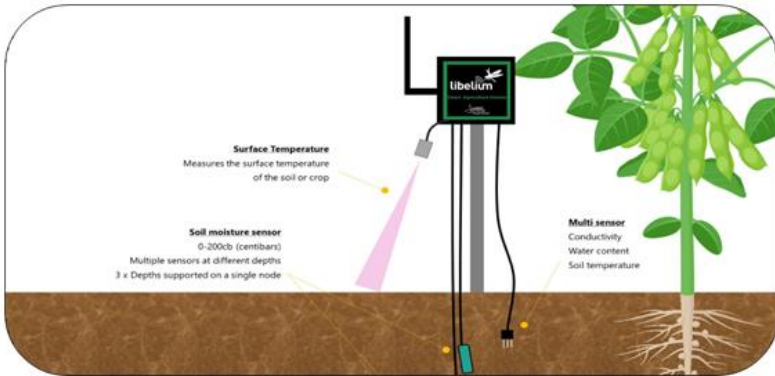
Pada sub-bab ini, penulis akan menyajikan beberapa aplikasi penerapan teknologi *precision agriculture* dan perkiraan dampaknya terhadap daya dukung lingkungan. Beberapa penerapan dari *precision agriculture* yang menjadi sasaran utama dalam tulisan di sub-bab ini mencakup (1) *controlled environment agriculture* (CEA), (2) *agricultural drones* dan *remote sensing*, serta (3) penerapan *soil and crop monitoring*, dan juga (4) penerapan *smart fertilizers*. Beberapa contoh aplikasi tersebut menjadi *baseline* utama yang biasanya sering diterapkan di sektor pertanian.



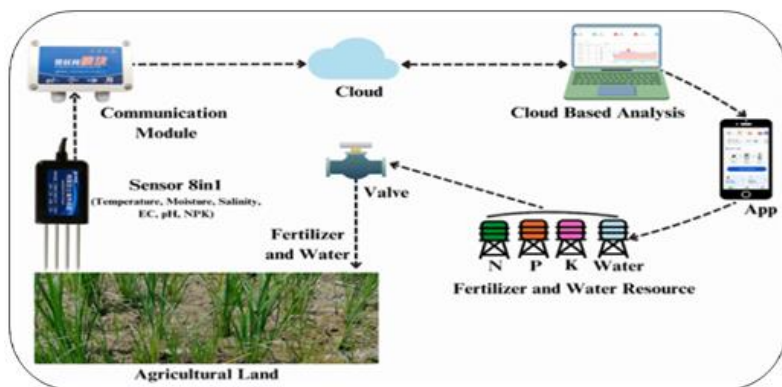
(a)



(b)



(c)



(d)

- ^a Penerapan *controlled environment agriculture* (CEA) berbentuk *Cube Farming* dari N-Thing Korea (sumber: Nthing.net, 2026)
- ^b Penerapan *drones* pada pertanian padi di Vietnam (sumber: XAG, 2022)
- ^c Ilustrasi penerapan *soil and crop monitoring* (sumber: Manx Technology Group, 2026)
- ^d Penerapan *smart fertilizer* (Sumber: Shahab dkk., 2025)

Gambar 7. Ilustrasi Penerapan *Precision Agriculture* pada Pertanian

Berdasarkan gambar 7 poin a, penulis menyajikan gambar bentuk teknologi *precision agriculture* dengan konsep *controlled environment agriculture* (CEA) berbentuk *cube* dari kontainer bekas. Bentuk konsep ini dikembangkan oleh *private enterprise* bernama N.Thing dari Korea Selatan. Didirikan pada tahun 2014, perusahaan rintisan yang

berbasis di Seoul ini telah mengembangkan sistem *vertical farming* berbasis kontainer modular yang disebut CUBE, beserta *software* untuk menjalankannya bernama CUBE OS (agfundernews.com, 2021). Pada awalnya, perusahaan ini menyediakan konsep pertanian vertikal berbentuk *cube* dari kontainer yang dibarengi dengan konsep kontrol berbasis AI guna mengatur *moisture*, suhu, dan *humitidy* pada pertanian hidroponik yang ditanam.



Sumber: n.thing.net (2026)

Gambar 8. Bentuk Aplikasi Teknologi N.Thing *Precision Agriculture*

Berdasarkan data N.Thing, konsep pertanian mereka dapat menyumbang pada perbaikan lingkungan utamanya dalam upaya mengurangi *greenhouse gas* (GHG) *emission* yang berdasarkan kalkulasi N.Thing, mereka sudah mereduksi sebanyak 34.7 ton CO₂ setiap tahunnya, serta telah menghemat 94% penggunaan air dalam budidaya pertaniannya, dan utamanya efisiensi *land use* yang hanya

sebanyak 1/100 dibandingkan dengan *open-field agriculture* (n.thing.net, 2025).

Selain dari teknologi *controlled environment agriculture* (CEA) yang dikembangkan oleh N.Thing, beberapa praktik pertanian presisi yang telah dikembangkan dan diterapkan oleh petani salah satunya adalah pertanian berbasis drones. Meskipun hal ini belum banyak dikembangkan di Indonesia, namun ternyata salah satu negara yang sedang mencoba mengembangkan adalah negara Vietnam dalam praktik budidaya padi dengan drones. Berdasarkan laporan dari FAO (2025) dalam *project* pengembangan teknologi drone untuk meningkatkan pertanian padi di Vietnam, dimana proyek ini bekerja sama dengan *Vietnam Academy of Agricultural Sciences* (VAAS) dan mencakup beberapa kegiatan utama, yaitu: (1) evaluasi penggunaan drone dalam penanaman padi langsung, (2) identifikasi hambatan dalam adopsi teknologi drone, serta (3) uji coba lapangan pada lahan demonstrasi seluas dua hektare untuk menunjukkan efektivitas teknologi tersebut. Selain itu, dilakukan juga peningkatan kapasitas pemangku kepentingan melalui pelatihan bagi petani kecil, koperasi, penyedia jasa, pemerintah, dan peneliti terkait penggunaan drone dalam pertanian padi. Secara keseluruhan, integrasi

70 | Dr. rer.pol. Ernah S.P., M.Si, dkk.

mekanisasi pertanian berbasis drone diharapkan dapat meningkatkan produktivitas padi, memperbaiki pendapatan petani, serta mendorong praktik pertanian yang lebih berkelanjutan (*sustainable agriculture*). Langkah ini menjadi bagian penting dalam transformasi menuju sistem pertanian yang lebih efisien, tangguh, dan berbasis teknologi di Vietnam.

Berdasarkan laporan dari salah satu petani di Vietnam, Le Thanh Nguyen, terkait dengan penggunaan drone pada pertanian padi, menyatakan bahwa memanfaatkan drone untuk penyemprotan, pemupukan, dan penanaman langsung, yang mampu meningkatkan presisi distribusi input dan hasil panen padi. Penggunaan drone terbukti mengurangi beban kerja serta meningkatkan efisiensi dibandingkan metode manual yang membutuhkan banyak tenaga kerja dan waktu lebih lama (xa.com, 2022).



Sumber: XAG (2022)

Gambar 9. Bentuk Aplikasi Teknologi Drone di Pertanian
Padi Vietnam

Secara keseluruhan, konsep-konsep pertanian presisi dengan berbasis *software* guna mengontrol beberapa faktor pertumbuhan tanaman sangat berguna, tidak hanya bagi pertumbuhan dan hasil panen tanaman, melainkan juga dalam efisiensi input pertanian disertai dengan *spillover effect* pada daya dukung lingkungannya. An dkk. (2026) sistem terintegrasi ini memungkinkan pemantauan kondisi lahan secara *real-time*, deteksi dini dan respons terhadap wabah hama dan penyakit melalui perangkat pintar dan analisis citra UAV, serta pengendalian irigasi dan drainase berbasis data. Hasilnya, hasil panen kedelai meningkat sekitar 20% dan kebutuhan tenaga kerja berkurang 53% dibandingkan dengan budidaya konvensional. Nguyen dkk. (2025) yang mengamati praktik *smart farming* pada petani

Vietnam, menunjukkan bahwa rumah tangga yang mengadopsi teknologi digital memperoleh hasil panen lebih tinggi, yaitu sekitar 0,57-0,67 ton/ha, serta keuntungan yang lebih besar, yakni sekitar 6,77–7,63 juta VND (Vietnam *currency*) per hektare dibandingkan dengan rumah tangga yang tidak mengadopsinya.

Berkaitan dengan benefit lingkungan yang dihasilkan, penerapan teknologi *precision agriculture* akan sangat bermanfaat dari daya dukung lingkungan, utamanya akibat berkurangnya probabilitas *exceeds input* pertanian yang dilakukan oleh petani. Peningkatan presisi dalam operasi pertanian melalui teknologi modern mampu mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan hasil dan profitabilitas (Getahun dkk., 2024). Dengan meningkatnya kebutuhan pangan global, pertanian presisi menjadi solusi menjanjikan untuk mewujudkan produksi yang berkelanjutan dan menjaga kesehatan lingkungan jangka panjang. Bahmutsky dkk. (2024) sebagian besar kategori dampak lingkungan, penerapan praktik pertanian presisi terbukti mampu menurunkan dampak lingkungan dibandingkan dengan praktik pertanian konvensional. Penurunan dampak lingkungan disebabkan karena adopsi teknologi pertanian presisi secara signifikan meningkatkan

efisiensi penggunaan nitrogen (rata-rata naik 15,1%), sekaligus mengurangi penggunaan pestisida (turun 12,8%) dan emisi gas rumah kaca (turun 9,4%) (Lan & Ban, 2025). Secara lebih detail, berikut disajikan daftar penerapan teknologi *precision agriculture* pada sektor pertanian dan dampaknya terhadap daya dukung lingkungan yang lebih berkelanjutan.

Tabel 3. Sintesis Dampak Ekologis *Precision Agriculture* dalam Penerapan di Pertanian

No.	Jenis <i>Precision Agriculture</i>	Deskripsi	Teknologi Utama	Dampak Ekologis	Sumber
1	<i>Variable Rate Technology</i> (VRT) / Pemupukan Dosis Variabel	Aplikasi pupuk dengan dosis yang bervariasi sesuai kebutuhan spesifik tiap zona lahan berdasarkan data sensor dan peta kesuburan tanah.	Sensor tanah, GPS, GIS, software manajemen lahan	Efisiensi penggunaan nitrogen rata-rata meningkat 15,1%; penurunan emisi GHG 9,4%; mengurangi risiko pencemaran tanah dan air akibat kelebihan pupuk.	Lan & Ban (2025); Shahab dkk. (2024); Getahun dkk. (2024)
2	<i>Precision Irrigation / Smart Irrigation</i>	Sistem irigasi otomatis berbasis data sensor kelembaban tanah dan cuaca untuk mengoptimalkan pemberian air sesuai kebutuhan tanaman secara <i>real-time</i> .	IoT, sensor moisture, drip irrigation, kontroler otomatis	Penghematan penggunaan air hingga 94% (studi N.Thing); meningkatkan water use efficiency; mengurangi aliran permukaan dan erosi tanah.	Kumar dkk. (2024); Irshad dkk. (2022); Malabadi dkk. (2024)

No.	Jenis <i>Precision Agriculture</i>	Deskripsi	Teknologi Utama	Dampak Ekologis	Sumber
3	<i>Agricultural Drones & UAV / Drone Pertanian</i>	Penggunaan drone/UAV untuk penyemprotan pestisida, pemupukan, penanaman langsung, serta pemantauan kondisi tanaman melalui citra udara.	UAV/drone, kamera multispektral, GPS, AI image analysis	Mengurangi penggunaan pestisida 12,8%; meminimalkan pemadatan tanah akibat mesin berat; deteksi dini hama/penyakit melalui analisis citra UAV; hasil kedelai meningkat ~20%.	An dkk. (2026); Sattar dkk. (2026); Nguyen dkk. (2025); FAO (2025)
4	<i>Controlled Environment Agriculture (CEA) / Pertanian Lingkungan Terkontrol</i>	Budidaya tanaman dalam lingkungan tertutup (greenhouse, vertical farming, hydroponics) dengan kontrol penuh terhadap suhu, kelembaban, nutrisi, dan cahaya.	IoT, AI, sistem hidroponik, vertical farming, smart sensor	Reduksi emisi CO2 34,7 ton/tahun (studi N.Thing); efisiensi lahan 1/100 dibanding pertanian terbuka; mengurangi kebutuhan pestisida dan pupuk kimia.	Malabadi dkk. (2024); Shahab dkk. (2024); n.thing.net (2025)

No.	Jenis <i>Precision Agriculture</i>	Deskripsi	Teknologi Utama	Dampak Ekologis	Sumber
5	<i>Soil & Crop Monitoring</i> / Pemantauan Tanah dan Tanaman	Pemantauan kondisi tanah dan status nutrisi tanaman secara <i>real-time</i> menggunakan sensor lapangan dan platform digital terintegrasi.	Sensor tanah, IoT, platform data cloud, remote sensing	Mendukung keputusan pemupukan tepat waktu dan dosis; menjaga kesehatan tanah jangka panjang; mencegah degradasi tanah akibat over-input.	Toselli dkk. (2023); Shahab dkk. (2025); Kumar dkk. (2024)
6	<i>Smart Fertilizer Management</i> / Manajemen Pupuk Cerdas	Pengelolaan pemupukan berbasis data analitik dan model prediktif untuk menentukan jenis, dosis, dan waktu aplikasi pupuk yang optimal.	<i>Big data</i> analitik, model prediktif, sensor nutrisi, GIS	Mengurangi emisi N ₂ O dari kelebihan pupuk nitrogen; menekan pencemaran perairan (eutrofikasi); berkontribusi pada penurunan GHG emission pertanian.	Lan & Ban (2025); Bahmutsky dkk. (2024)
7	<i>Integrated Smart Farm System</i> /	Integrasi berbagai teknologi presisi (sensor, drone, AI,	IoT, AI/ML, drone, cloud computing,	Kebutuhan tenaga kerja berkurang 53%; hasil panen	An dkk. (2026); Shahab dkk.

No.	Jenis <i>Precision Agriculture</i>	Deskripsi	Teknologi Utama	Dampak Ekologis	Sumber
	Sistem Pertanian Terpadu Berbasis IoT	<i>big data</i>) dalam satu platform manajemen pertanian yang terhubung secara digital.	<i>big data</i> platform	meningkat ~20%; efisiensi input secara keseluruhan berdampak positif pada pengurangan jejak karbon pertanian.	(2024); Zeng dkk. (2026); Oosterwijk dkk. (2026)

❖ Peluang dan Tantangan Penerapan Pertanian Presisi di Indonesia

Sebagai negara agraris dengan jumlah rumah tangga usaha pertanian yang mencapai lebih dari 28,4 juta rumah tangga, Indonesia menyimpan potensi besar sekaligus menghadapi kompleksitas tersendiri dalam upaya modernisasi sektor pertaniannya (BPS, 2023). Sektor ini tidak hanya menjadi tumpuan penghidupan bagi lebih dari 27,52 persen angkatan kerja nasional dan lebih dari 86% angkatan kerja informal skala nasional (BPS, 2026), tetapi juga menanggung tanggung jawab ekologis yang semakin berat di tengah akselerasi perubahan iklim global. Di sisi lain, pertanian konvensional yang masih mendominasi praktik budidaya di Indonesia kerap diidentifikasi sebagai salah satu penyumbang emisi gas rumah kaca yang cukup signifikan, terutama dari aktivitas pengelolaan lahan sawah, pembakaran biomassa, dan penggunaan pupuk nitrogen sintetis secara berlebihan (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2022).

Kondisi ini mendorong berbagai pihak, mulai dari pemerintah hingga sektor swasta dan akademisi, untuk mengeksplorasi pendekatan pertanian yang lebih cerdas

dan terukur, salah satunya melalui adopsi teknologi *precision agriculture*. Meskipun adopsi teknologi ini masih berada pada tahap yang relatif awal, perkembangan ekosistem digital nasional dan meningkatnya kesadaran akan keberlanjutan lingkungan membuka ruang yang cukup luas bagi transformasi pertanian Indonesia menuju model yang lebih efisien secara sumber daya dan lebih ramah lingkungan.

Dalam kerangka kebijakan nasional, pemerintah Indonesia telah menempatkan digitalisasi pertanian sebagai salah satu pilar prioritas dalam dokumen Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2020–2024, yang di dalamnya memuat program pengembangan pertanian berbasis teknologi informasi dan komunikasi. Kementerian Pertanian Republik Indonesia, melalui berbagai programnya, telah menginisiasi beberapa langkah konkret dalam mendorong adopsi teknologi cerdas di sektor pertanian, antara lain melalui program *Agriculture War Room* (AWR), pengembangan sistem informasi lahan pertanian berbasis geospasial, serta uji coba pemanfaatan *drone* untuk keperluan pemetaan dan penyemprotan di beberapa sentra produksi padi dan hortikultura (Kementerian Pertanian, 2023; katadata.co.id, 2020). Selain

80 | Dr. rer.pol. Ernah S.P., M.Si, dkk.

itu, komitmen Indonesia dalam penurunan emisi melalui dokumen *Enhanced Nationally Determined Contribution* (ENDC) yang disampaikan ke UNFCCC pada September 2022 turut memperkuat urgensi penerapan teknologi pertanian presisi, khususnya dalam upaya pengurangan emisi GHG dari sektor pertanian sebagai bagian dari target penurunan emisi nasional sebesar 31,89% (*unconditional*) dan 43,20% (*conditional*) dengan dukungan internasional pada tahun 2030 (KLHK, 2022). Hal ini mencerminkan bahwa pertanian presisi bukan sekadar wacana teknologi, melainkan telah menjadi bagian integral dari agenda pembangunan berkelanjutan Indonesia secara lebih luas.

Kendati demikian, perluasan penerapan pertanian presisi di Indonesia tidak terlepas dari berbagai hambatan struktural yang cukup mendasar. Struktur kepemilikan dan penguasaan lahan pertanian yang relatif terfragmentasi menjadi salah satu hambatan utama dalam adopsi teknologi pertanian presisi di Indonesia. Hasil Sensus Pertanian 2023 menunjukkan bahwa rata-rata luas lahan yang dikuasai rumah tangga usaha pertanian hanya sekitar 0,72 hektar (Graham, 2026), sementara sebagian besar petani tergolong petani gurem yang mengusahakan lahan kurang dari 0,5 hektar (BPS, 2023). Kondisi ini menyulitkan penerapan

teknologi yang memerlukan skala ekonomi tertentu, seperti pemupukan dosis variabel (*variable rate technology*) maupun penggunaan drone pertanian secara mandiri.

Selain itu, tingkat literasi digital petani yang masih rendah, terutama pada kelompok usia di atas 45 tahun yang mendominasi struktur demografis petani Indonesia, turut memperlambat laju adopsi teknologi. Kondisi infrastruktur konektivitas internet yang belum merata, khususnya di wilayah pedesaan sentra produksi pangan seperti Nusa Tenggara Timur, Sulawesi, dan Papua, juga menjadi hambatan teknis yang tidak dapat diabaikan dalam penerapan sistem pertanian berbasis *Internet of Things* (IoT) secara masif. Dari perspektif pembiayaan, tingginya biaya investasi awal untuk pengadaan perangkat sensor, sistem irigasi otomatis, maupun platform pengelolaan data pertanian juga masih menjadi beban yang sulit dijangkau oleh mayoritas petani kecil yang mengandalkan modal terbatas dan akses kredit yang sempit. Tantangan-tantangan ini perlu diantisipasi secara sistemik agar transformasi menuju pertanian presisi dapat berjalan inklusif dan tidak hanya menguntungkan segelintir pelaku usaha berskala besar.

Di tengah berbagai hambatan tersebut, sejumlah inisiatif penerapan pertanian presisi di Indonesia mulai menunjukkan hasil yang menggembirakan, khususnya pada komoditas padi sebagai tanaman pangan strategis nasional. Salah satu implementasi yang relatif berkembang adalah penggunaan teknologi *remote sensing* berbasis citra satelit untuk pemetaan lahan pertanian dan estimasi produktivitas, yang telah dimanfaatkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) bekerja sama dengan Kementan dalam program Sistem Informasi Lahan Pertanian Pangan Berkelanjutan (SiLP2B). Pada skala yang lebih operasional, sejumlah perusahaan *agritech* dalam negeri seperti yang sempat eksis yaitu TaniHub, serta ada Habibi Garden, dan Mitra Sejahtera Membangun Bangsa (MSMB) telah me-ngembangkan platform digital yang mengintegrasikan pemantauan kondisi lahan, rekomendasi pemupukan berbasis data, serta konektivitas pasar bagi petani kecil. Inisiatif program semacam ini menunjukkan bahwa adopsi teknologi digital di tingkat rumah tangga petani mampu meningkatkan produktivitas pertanian, efisiensi penggunaan sumber daya, serta pendapatan usaha tani melalui penguatan kapasitas produksi dan akses pasar (Tang & Tang, 2025; Zhang & Zhu, 2025). Dalam konteks pertanian padi sawah, pemanfaatan

drone untuk penyemprotan pupuk dan pestisida mulai diterapkan di berbagai sentra produksi padi di Jawa Tengah, Jawa Timur, dan Sulawesi Selatan. Sejumlah laporan menunjukkan bahwa teknologi ini mampu meningkatkan efisiensi operasional, mempercepat proses penyemprotan, serta menghasilkan distribusi pupuk dan pestisida yang lebih merata dan tepat sasaran dibandingkan metode manual, sehingga berpotensi mengurangi pemborosan input pertanian (Soeprijanto dkk, 2024; Firmansyah, 2025; Balai Perakitan dan Modernisasi Pertanian Sulawesi Selatan, 2025).

Dari dimensi dampak ekologis, penerapan pertanian presisi di Indonesia berpotensi memberikan manfaat lingkungan yang signifikan, terutama dalam mengurangi emisi metana (CH_4) dari lahan sawah dan menekan pencemaran badan air akibat limpasan pupuk berlebih. Indonesia merupakan salah satu produsen padi terbesar di Asia Tenggara dengan sistem budidaya sawah tergenang yang masih mendominasi di berbagai wilayah produksi utama. Kondisi tersebut menjadikan subsektor padi sebagai salah satu sumber utama emisi metana dari sektor pertanian nasional (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [KLHK], 2022; Lampayan dkk., 2015; Kritee dkk., 2018).

Penerapan teknologi irigasi presisi, khususnya metode *Alternate Wetting and Drying* (AWD) yang dikombinasikan dengan sensor kelembaban tanah berbasis IoT, terbukti mampu menekan emisi metana dari sawah hingga 30-70% tanpa mengorbankan produktivitas secara berarti (Lampayan dkk., 2015; Kritee dkk., 2018). Sementara itu, pengelolaan pemupukan nitrogen yang lebih terukur melalui pendekatan *Variable Rate Technology* (VRT) berpotensi mereduksi pencemaran sumber air permukaan akibat eutrofikasi yang selama ini menjadi ancaman serius bagi ekosistem perairan di sentra pertanian intensif. Dengan demikian, adopsi pertanian presisi di Indonesia tidak hanya relevan dari perspektif produktivitas, tetapi juga memiliki urgensi ekologis yang tinggi dalam menjaga kualitas lingkungan hidup di sekitar kawasan pertanian.

Mengingat kompleksitas kondisi pertanian Indonesia yang beragam secara agroekologis maupun sosio-ekonomis, pendekatan adopsi pertanian presisi yang paling realistis untuk jangka pendek hingga menengah adalah melalui model kolaboratif berbasis kelompok tani atau koperasi pertanian. Model ini memungkinkan pembagian biaya investasi teknologi secara kolektif, sekaligus memperkuat kapasitas pendampingan teknis di tingkat lapangan. Selain

itu, integrasi pertanian presisi dengan skema perlindungan sosial petani, seperti subsidi pupuk yang diarahkan ulang menjadi subsidi teknologi sensor atau irigasi tetes berskala kecil, dapat menjadi mekanisme insentif yang lebih tepat sasaran. Pemerintah daerah juga memiliki peran strategis dalam memfasilitasi pilot project pertanian presisi di kawasan-kawasan dengan kepadatan produksi tinggi, yang hasilnya dapat menjadi acuan skalabilitas secara nasional. Mashori dkk. (2026), perkembangan teknologi penginderaan jauh berbasis UAV semakin memperluas peluang penerapan pertanian presisi melalui kemampuan pemantauan lahan secara *real-time*, peningkatan efisiensi penggunaan input, serta penyediaan data spasial beresolusi tinggi yang mendukung pengambilan keputusan budidaya yang lebih akurat.

Dengan dukungan ekosistem kebijakan yang koheren, penguatan infrastruktur digital perdesaan, dan pengembangan sumber daya manusia pertanian yang melek teknologi, transformasi pertanian presisi di Indonesia dapat diwujudkan sebagai solusi yang sekaligus menjawab tantangan ketahanan pangan, pemerataan ekonomi pedesaan, dan pemulihan kualitas lingkungan secara bersama.

BAB V

CONTOH ADOPSI TEKNOLOGI, PERKEMBANGAN DAN TANTANGAN DI INDONESIA

❖ Pendahuluan

Pada tanggal 11 juni 2005 Presiden RI telah mencanangkan Revitalisasi Pertanian, Perikanan dan Kehutanan (RPPK) sebagai salah satu dari *Triple Track Strategy* dari kabinet Indonesia Bersatu dalam rangka pengurangan kemiskinan dan pengangguran serta peningkatan daya saing ekonomi nasional dan menjaga kelestarian sumber daya pertanian, perikanan dan kehutanan. Arah RPPK mewujudkan “Pertanian tangguh untuk pemantapan ketahanan pangan, peningkatan nilai tambah dan daya saing produk pertanian serta peningkatan kesejahteraan petani”. Untuk itu diperlukan dukungan sumber daya manusia berkualitas melalui penyuluhan pertanian dengan pendekatan kelompok yang dapat mendukung sistem agribisnis berbasis pertanian (Tanaman Pangan, hortikultura, peternakan,

perkebunan). Sehubungan dengan itu perlu dilakukan pembinaan dalam rangka pertumbuhan dan perkembangan kelompok tani menjadi kelompok yang kuat dan mandiri untuk meningkatkan pendapatan petani dan keluarganya.

Kemampuan kelompok tani merupakan kunci keberhasilan pada penerapan sistem agribisnis, peningkatan peranan, peran serta petani dan anggota masyarakat pedesaan lainnya, dengan menumbuhkan kembangkan kerjasama antar petani dan pihak lainnya yang terkait untuk pengembangan usaha tani nya. Selain itu kemampuan kelompok tani dapat membantu menggali potensi, memecahkan masalah usaha tani anggotanya serta lebih efektif, dan memudahkan dalam mengakses informasi, pasar, teknologi, permodalan dan sumber daya lainnya. Dalam hal pemanfaatan teknologi yang tepat guna dalam usaha budidaya padi sawah, peran kelompok tani sangat penting terutama dalam hal penyediaan dan penyebaran informasi teknologi pertanian kepada anggotanya.

Tanaman pangan berperan penting pada peningkatan perekonomian nasional Indonesia (Samantha, 2026). Sektor pertanian memiliki peran strategis, diantaranya penyediaan bahan pangan, bahan Baku penyerapan tenaga kerja, sumber utama pendapatan rumah tangga perdesaan,

bioenergi, dan penurunan emisi gas (Samantha dkk., 2021; Samantha dkk., 2018). Renstra kementerian pertanian (2015) menjelaskan upaya pencapaian pembangunan pertanian pada RPJM tahap kedua (2010-2014) meliputi, (1) peningkatan swasembada berkelanjutan padi dan jagung, swasembada kedelai, gula, daging sapi, (2) peningkatan diversifikasi pangan, (3) peningkatan nilai tambah, daya saing dan ekspor, (4) peningkatan kesejahteraan petani melalui setrstrégi yang dikemas dalam 7 gema revitalisasi yang meliputi, (1) revitalisasi lahan, (2) revitalisasi perbenihan dan pembibitan, (3) revitalisasi infrastruktur pertanian, (4) revitalisasi SDM petani, (5) revitalisasi permodalan petani, (6) revitalisasi kelembagaan petani, dan (7) revitalisasi teknologi dan industri hilir.

Produk Domestik Bruto (PDB) pada sektor pertanian mencapai 10, 26% dengan pertumbuhan mencapai 3, 90% terhadap perekonomian nasional dari tahun 2010-2014. Hal ini didukung pula dengan strategi induk pembangunan (SIPP) yang mengacu pada paradigma pertanian. Paradigma ini memposisikan sektor pertanian sebagai penggerak transformasi pembangunan yang berimbang dan menyeluruh mencakup transformasi demografi, ekonomi

intersektorian spasial, institusional, dan tata kelola pembangunan.

Salah satu tantangan dalam pembangunan pertanian adalah adanya kecenderungan menurunnya produktivitas lahan (Samanta dkk., 2025). Disisi lain sumberdaya alam terus menurun sehingga perlu diupayakan untuk tetap menjaga kelestariannya. Demikian pula dalam usaha tani padi dapat berkelanjutan, maka teknologi yang diterapkan harus memperhatikan faktor lingkungan, baik lingkungan fisik maupun lingkungan sosial, sehingga agribisnis padi dapat berkelanjutan.

Tingkat penerapan teknologi komoditas pertanian merupakan tolak ukur keberhasilan pembangunan pertanian, terutama dilihat dari tingkat penerapan teknologi dan kemampuan sumber daya manusia dalam mengelola sumber daya alam hayati yang diambil sebanyak-banyaknya untuk kepentingan manusia dilihat dari pengetahuan keterampilan, sikap dan tindakan didalam kegiatan usaha taninya.

Penerapan teknologi dalam usahatani padi sawah berdampak pada peningkatan produktivitas beras dan pendapatan petani, hal ini disebabkan beberapa faktor, yang mempengaruhi dari penerapan teknologi diantaranya

90 | Dr. rer.pol. Ernah S.P., M.Si, dkk.

adalah faktor teknis (faktor teknis perilaku dan faktor teknis non perilaku), faktor sosial, dan faktor ekonomi. Pelaksanaan penerapan teknologi budidaya tanaman padi yang diterapkan oleh petani, yaitu: pengolahan lahan, persemaian, penanaman, pemupukan berimbang tepat lokasi, pemberian pupuk organik, penyulaman, pengairan, penyiangan, pengendalian Hama dan penyakit, panen dan pascapanen.

Pengembangan dan penerapan teknologi budidaya tanaman padi sawah tidak terlepas dari individu atau dinamika kelompok tani yang mengelolanya. Dinamika kelompok tani adalah gerakan bersama yang dilakukan oleh anggota kelompok tani secara serentak dan bersamaan dalam melaksanakan seluruh kegiatan kelompok tani dalam mencapai tujuannya. Dinamika kelompok tani mencakup seluruh kegiatan yang meliputi inisiatif, daya kreasi, dan tindakan-tindakan nyata yang dilakukan oleh pengurus dan anggota kelompok tani dalam melaksanakan rencana kerja kelompoknya yang telah disepakati bersama (Samantha, 2026a).

Samantha (2026), dinamika kelompok adalah suatu metode atau proses yang bertujuan meningkatkan nilai kerjasama kelompok. Sebagai metode dan proses, dinamika

kelompok berusaha menumbuhkan dan membangun kelompok, yang semula terdiri dari kumpulan individu yang belum saling mengenal satu sama lain menjadi satu kesatuan kelompok dengan satu tujuan, satu norma dan satu cara pencapaiannya disepakati bersama. Kedinamisan suatu kelompok sangat ditentukan oleh kedinamisan anggota kelompok melakukan interaksi dalam mencapai tujuan. Oleh karena itu untuk mengetahui dinamis tidaknya suatu kelompok dan untuk mengetahui apakah sistem sosial suatu kelompok tersebut dikatakan baik atau tidak dapat dilakukan dengan menganalisis anggota kelompok melalui perilaku para anggotanya. Samantha (2026), suatu kelompok yang dinamis biasanya ditandai dengan adanya kegiatan-kegiatan atau interaksi, baik didalam kelompok maupun dengan pihak luar kelompok tersebut sebagai upaya mencapai tujuan kelompok secara efektif dan efisien.

Sebagai sebuah kelompok maka kelompok tani yang merupakan kerjasama dari petani dalam satu wilayah untuk dapat mencapai petani yang berkualitas maka menjadi suatu keharusan bahwa kelompok tani tersebut harus memiliki gerak atau kekuatan yang dapat menentukan dan mempengaruhi perilaku kelompok dan anggota-anggotanya dalam mencapai tujuan secara efektif. Hal ini sangat

tergantung pada aktifitas dan kreatifitas anggota dalam melakukan kegiatan-kegiatannya (Samantha, 2026a). Dengan kata lain perkembangan kelompok tani tergantung dari dinamika kelompok yang bersangkutan.

❖ Contoh Studi Kasus Adopsi Teknologi Benih Sarinah

Keberhasilan usaha tani padi sawah kultivar sarinah (*Oriza sativa L*). mengungkap faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan usaha tani padi sawah tersebut agar para petani dapat merasakan manfaat secara finansial untuk meningkatkan ke-sejahteraannya dalam rangka mendukung swasembada beras khususnya (kultivar Sarinah) dan swasembada pangan pada umumnya. Dari beberapa faktor yang mempengaruhi terhadap keberhasilan usaha tani padi sawah, dipilih dua faktor yang ingin di teliti lebih dalam yaitu faktor penerapan teknolgi budidaya dan dinamika kelompok tani.

Tanaman Padi Sawah Kultivar Sarinah

Padi varietas sarinah telah menjalani uji laboratorium di Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Pasca Panen Kementerian Pertanian dengan hasil yang bisa dibanggakan. Deskripsi Padi Varietas Sarinah sebagai berikut:

Nama Varietas	:	Sarinah
Kategori	:	Cere
Tahun	:	2006
Tetua	:	Populasi S3254-2G-21-2 (Populasi Garut)
Rataan Hasil	:	8,0 t/ha
Potensi Hasil	:	6,98 t/ha
Pemulia	:	Aan A. Daradjat, Z. A. Simanullang, A. Rifki, Dede Kusdiaman, Triny S. Kadir,
Metode seleksi	:	Galur murni
Umur tanaman	:	110-125 hari
Bentuk tanaman	:	Tegak
Tinggi tanaman	:	107 – 116 cm
Anakan produktif	:	15 – 20 batang
Warna kaki	:	Hijau
Warna batang	:	Tidak berwarna
Warna telinga daun	:	Tidak berwarna
Warna lidah daun	:	Hijau
Warna daun	:	Hijau
Muka daun	:	Kasar
Posisi daun	:	Tegak
Daun bendera	:	Tegak
Bentuk gabah	:	Ramping

Warna gabah	:	Kuning bersih
Kerontokan	:	Mudah
Tekstur nasi	:	Pulen
Kadar amilosa	:	23,3 %
Bobot 1000 butir	:	25,5 g

Tanaman padi (*Oryza Sativa* L.) termasuk divisi Angiospermae, kelas monokotil family Graminae dan sub family Oryzae. Berdasarkan morfologinya, padi dapat digolongkan menjadi tiga species yaitu *Indica*, *Japonica* dan *Javanica*. Sedangkan berdasarkan tingginya padi dapat digolongkan menjadi dua yaitu padi tinggi (tinggi 1,7 m) dan padi pendek (tinggi 1 m) (Katayama, 1993).

Tanaman padi dapat hidup baik di daerah yang berhawa panas dan banyak mengandung uap air. Curah hujan yang baik rata-rata 200mm per bulan atau lebih, dengan distribusi selama 4 bulan, curah hujan yang dikehendaki per tahun sekitar 1500-2000mm. suhu yang baik untuk pertumbuhan padi 23 °C. Tinggi tempat yang cocok untuk tanaman padi berkisar 0-1500 m dpl. Tanah yang baik untuk pertumbuhan tanaman padi adalah tanah sawah yang kandungan fraksi pasir, debu dan lempung dalam perbandingan tertentu dengan diperlukan air dalam

jumlah yang cukup. Padi dapat tumbuh dengan baik pada tanah yang ketebalan lapisan atasnya antara 18-22 cm dengan pH antara 4-7 (Aksi Agribisnis Kanisius, 1990).

Basyir (1995) padi memiliki 3 stadia pertumbuhan utama yaitu 1) stadia vegetative, dimulai saat biji berkecambah sampai saat primordial bunga (55 hari), 2) stadia reproduktif, dimulai saat primordial bunga sampai berbunga penuh (35 hari) dan 3) stadia pemasakan, dimulai sejak pengisian biji sampai masak (30 hari). Lama stadia reproduktif dan stadia pemasakan pada semua varietas padi sama, tetapi lama stadia vegetative berbeda pada setiap varietas.

Padi merupakan tanaman musiman termasuk golongan rumput-rumputan yang usianya termuda yaitu kurang dari satu tahun dan cukup satu kali bereproduksi. Kanisius (1990) padi digolongkan dalam beberapa jenis. Menurut keadaan berasnya, dibedakan menjadi beras ketan dan biasa. Menurut cara dan tempat bertanam dibedakan menjadi: 1. Padi gogo yaitu padi yang ditanam di daerah tegalan; 2. Padi biasa yaitu padi yang ditanam disawah; 3. Padi rancak yaitu padi yang ditanam di daerah rawa-rawa. Menurut umur, dibedakan menjadi: Padi genjah, Padi tengahan, Padi dalam.

Keberhasilan budidaya tanaman ditentukan oleh pertumbuhannya. Jika pertumbuhan tanaman baik, maka hasil panen akan tinggi. Sebaliknya, apabila pertumbuhannya kurang baik maka hasilnya akan rendah. Dalam budidaya padi, pertumbuhan ditunjang oleh beberapa indikator tumbuh seperti tinggi tanaman, anakan, warna dan luas daun, dan bobot kering tanaman. Dengan memperlihatkan indikator-indikator tumbuh tersebut maka kondisi tanaman padi di lapangan dapat diperkirakan.

Peningkatan produksi padi dengan pengembangan teknologi yang ada mutlak untuk dapat mendukung ketahanan pangan di Indonesia. Peningkatan produksi pertanian telah ditempuh melalui program intensifikasi, ekstensifikasi dan diversifikasi. Peningkatan produksi ini tidak terlepas dari peran penggunaan pupuk sebagai faktor produksi penting.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Khaidar and M. Fikry, "Pengaruh teknologi *Internet of Things* terhadap manajemen aset digital secara real-time," *Jurnal Teknik Informatika*, vol. 17, no. 2, pp. 84–90, Apr. 2025.
- Ahmad, J., Wang, Y., Zhang, L., Ul, W., Shah, H., Yasmeen, R., Sameera, H., & Pathirana, K. (2026). Impact of climate change on agricultural production efficiency in leading agriculture-producing economies: A DEA Malmquist Productivity Index. *Agricultural Water Management*, 324(October 2025), 110114. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110114>
- Aksi Agribisnis Kanisius, 1990. *Budidaya Tanaman Padi*. Kanisius, Yogyakarta.
- Alpaydin, E. (2014). *Introduction to machine learning* (3rd ed.). MIT Press.

- An, C.-Y. S. S., & Kim, Seolmin; ; Song, C.; Jeong, H.; Ryu, J.; Park, J. (2026). Development of an integrated smart farm system for open-field soybean cultivation in a former. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 10(January), 1–23.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2017). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805.
- Azdagaz, F., Zirari, O., & Liouaeddine, M. (2025). Navigating climate change impacts on agricultural productivity, food and human health security in developing countries. *Global Transitions*, 7, 430–440. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2025.07.002>
- Babar, A. Z., & Akan, O. B. (2024). *Internet of Things* for precision agriculture: A review of architectures and applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 215, 108450.
- Badan Pusat Statistik. (2021). *Statistik Indonesia 2021*. BPS Indonesia.
- Badan Pusat Statistik. (2023). *Hasil Pencacahan Lengkap Sensus Pertanian 2023 – Tahap I*. Jakarta: BPS RI. <https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2023/12/04/2050/>, diakses pada 18 Juni 2026.

- Badan Pusat Statistik. (2023). Sensus Pertanian 2023. Badan Pusat Statistik.
<https://sensus.bps.go.id/main/index/st2023>, diakses pada 18 Juni 2026.
- Badan Pusat Statistik. (2024). Potensi pertanian Indonesia. Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik. (2025). Indikator pertanian Indonesia 2024. Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik. (2026). Emisi gas rumah kaca menurut jenis sektor (ribu ton CO₂e), 2000–2023 [Tabel Statistik]. Dikutip dari situs:
[https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/MjA3MiMx/emisi-gas-rumah-kaca-menurut-jenis-sektor--ribu-ton-co₂e---2000-2019.html](https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/MjA3MiMx/emisi-gas-rumah-kaca-menurut-jenis-sektor--ribu-ton-co2e---2000-2019.html), diakses pada 25 April 2026.
- Badan Pusat Statistik. (2026). Persentase tenaga kerja informal sektor pertanian (persen). Tabel Statistik. dikutip dari <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/2/MTE3MSMy/persentase-tenaga-kerja-informal-sektor-pertanian.html>, diakses pada 18 Juni 2026.

- Bahmutsky, S., Grassauer, F., Arulnathan, V., & Pelletier, N. (2024). Review article A review of life cycle impacts and costs of precision agriculture for cultivation of field crops. *Sustainable Production and Consumption*, 52(August), 347–362. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.010>
- Balafoutis, A. T., Beck, B., Fountas, S., dkk. (2017). Precision agriculture technologies positively contributing to GHG emissions mitigation, farm productivity and economics. *Sustainability*, 9(8), 1339.
- Balai Perakitan dan Modernisasi Pertanian Sulawesi Selatan. (2025). Aplikasi POC AGN menggunakan drone pada tanaman padi kegiatan pertanian modern di Soppeng.
- Banerjee, S., dkk. (2025). Digital agriculture systems: Integration of AI, IoT, and *big data*. *Agricultural Systems*, 205, 103567.
- Birner, R., Daum, T., & Pray, C. (2021). Who drives the digital revolution in agriculture? A review of supply-side trends, players and challenges. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 43(4), 1260–1285.
- Bongiovanni, R., Lowenberg-DeBoer, J., & Kayad, A. (2021). Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, 22(3), 1–15.

- Borgia, E. (2014). The *Internet of Things* vision: Key features, applications and open issues. *Computer Communications*, 54, 1–31.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). *Time series analysis: Forecasting and control* (5th ed.). Wiley.
- Bronson, K., & Knezevic, I. (2019). *Big data* in food and agriculture. *Big Data & Society*, 6(1), 1–5.
- Brynjolfsson, E., Hitt, L. M., & Kim, H. H. (2011). Strength in numbers: How does data-driven decisionmaking affect firm performance? *Management Science*, 57(1), 1–20.
- Chergui, A., & Kechadi, M. T. (2022). Geospatial *big data* analytics in agriculture. *Journal of Big Data Applications*, 9(2), 45–60.
- Christopher, M. (2016). *Logistics & supply chain management* (5th ed.). Pearson.
- Eastwood, C., Klerkx, L., Nettle, R., & Rue, B. T. (2019). Managing socio-ethical challenges in the development of *smart farming*: From a fragmented to a comprehensive approach. *Agricultural Systems*, 174, 1–10.

- Emediegwu, L. E., Wossink, A., & Hall, A. (2022). The impacts of climate change on agriculture in sub-Saharan Africa: A spatial panel data approach. *World Development*, 158, 105967. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.105967>
- FAO. (2019). Digital technologies in agriculture and rural areas: Status report. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Firmansyah, M. F., & Fadila, I. (2025). Pengaruh penggunaan drone dalam pemantauan tanaman padi di Jawa Timur (Nganjuk, Lamongan, Jember). Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi "SainTek".
- Food and Agriculture Organization. (2019). Digital technologies in agriculture and rural development. FAO.
- Food and Agriculture Organization. (2022). The state of food and agriculture 2022: Leveraging digitalization for agrifood systems transformation. FAO.
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2016). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831.

- Getahun, S., Kefale, H., & Gelaye, Y. (2024). Application of Precision Agriculture Technologies for Sustainable Crop Production and Environmental Sustainability : A Systematic Review. *The Scientific World Journal*, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/2126734>
- Graham, L. (2026). Figures of an agrarian nation: Indonesia's Agricultural Census, 1963–2023. *Journal of Agrarian Change*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1111/joac.70095>
- Gujarati, D. N. (2004). *Basic econometrics* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Indoor Farm System. 2025. The rise of urban farms: How hydroponic vertical farming is transforming the urban supply chain. Indoor Farm System. Dikutip dari situs: <https://indoorfarmsys.com/hydroponic-vertical-farming-systems/>, diakses pada 26 April 2026.
- Irshad, A., Alsolami, F., Alqurashi, F., Abushark, Y. B., & Sarker, I. H. (2022). Engineering Applications of *Artificial intelligence* Novel energy management scheme in IoT enabled smart irrigation system using optimized intelligence methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114(June), 104996.

- Jakku, E., Taylor, B., Fleming, A., Mason, C., Fielke, S., Thorburn, P., & Sounness, C. (2019). "If they don't tell us what they do with it, why would we trust them?" Trust, transparency and benefit-sharing in *Smart Farming*. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90–91, 100285.
- Jayaraman, P. P., Yavari, A., Georgakopoulos, D., dkk. (2016). *Internet of Things platform for smart farming: Experiences and lessons learned*. *Sensors*, 16(11), 1884.
- 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.
- Katadata. (2020). Kementan luncurkan AWR berteknologi modern. Katadata. <https://katadata.co.id/berita/nasional/5e9a495e0cb48/kementan-luncurkan-awr-berteknologi-modern>, diakses pada 18 Juni 2026.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2022). Enhanced nationally determined contribution: Republic of Indonesia. UNFCCC.

- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2020). Strategi transformasi digital pertanian Indonesia. Kementan RI.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2023). Laporan tahunan Kementerian Pertanian tahun 2023. Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- 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*, 90–91, 100315.
- Kritee, K., Nair, D., Zavala-Araiza, D., Proville, J., Rudek, J., Adhya, T. K., Loecke, T., Esteves, T., Balireddygar, S., Dava, O., Ram, K. S., Abhilash, V., Mahajan, D., Singh, S., Rajkumar, A., & Hamburg, S. P. (2018). High nitrous oxide fluxes from rice indicate the need to manage water for both long- and short-term climate impacts. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(39), 9720–9725.
- Kumar, V., Vaibhav, K., Kedam, N., Patel, A., Ram, T., & Rathnayake, U. (2024). Smart Agricultural Technology A comprehensive review on smart and sustainable agriculture using IoT technologies. *Smart Agricultural Technology*, 8(June), 100487.

Kusrini, & Luthfi, E. T. (2009). Algoritma data mining. Andi Offset.

Lampayan, R. M., Rejesus, R. M., Singleton, G. R., & Bouman, B. A. M. (2015). Adoption and economics of alternate wetting and drying water management for irrigated lowland rice. *Field Crops Research*, 170, 95–108.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.10.013>

Lan, J., & Ban, Q. (2025). The Farm-Level Economic and Environmental Benefits of Precision Agriculture Technology Adoption: A Meta-Analysis of Global Evidence. *Sustainability*, 17(24), 1–23.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su172411223>

Laney, D. (2001). 3D data management: Controlling data volume, velocity, and variety. META Group.

Li, Q., Ge, J., Zhang, X., Wu, X., Fan, H., & Yang, L. (2025). Assessment of the interaction between digital infrastructure and ecological resilience : Insights from Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China. *Journal of Cleaner Production*, 486(September 2024).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144364>

- Liakos, K. G., Busato, P., Moshou, D., Pearson, S., & Bochtis, D. (2018). *Machine learning* in agriculture: A review. *Sensors*, 18(8), 2674.
- Loggerindo. 2021. Praktik irigasi modern dengan data logger. Loggerindo. Dikutip dari situs: <https://loggerindo.co.id/2021/02/praktik-irigasi-modern-dengan-data-logger/>, diakses pada 27 April 2026.
- Lowenberg-DeBoer, J., & Erickson, B. (2019). Setting the record straight on precision agriculture adoption. *Agronomy Journal*, 111(4), 1552–1569.
- Lowenberg-DeBoer, J., Huang, I. Y., Grigoriadis, V., & Blackmore, S. (2021). Economics of precision agriculture: Evidence and issues. *Annual Review of Resource Economics*, 13, 1–22.
- Malabadi, R. B., Kolkar, K. P., Chalannavar, R. K., Viviana, K., Coronado, C., Mammadova, S. S., Baijnath, H., Neidilê, A., Munhoz, R., & Abdi, G. (2024). Greenhouse farming : Hydroponic vertical farming- *Internet of Things (IOT) Technologies : An updated review*. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 23(2). <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.2.2595>

- Manucharyan, M. (2025). Climate change impacts on sustainable agriculture: Evidence from Armenia. *Unconventional Resources*, 6(February), 100159. <https://doi.org/10.1016/j.uncres.2025.100159>
- Manx Technology Group. 2026. Soil monitoring with IoT – Smart agriculture. Dikutip dari situs: <https://manxtechgroup.com/soil-monitoring-with-iot-smart-agriculture/>, diakses pada 27 April 2026.
- Manx Technology Group. 2026. Soil monitoring with IoT – Smart agriculture. Dikutip dari situs: <https://manxtechgroup.com/soil-monitoring-with-iot-smart-agriculture/>, diakses pada 27 April 2026.
- Mashori, A. S., Li, F., Aman, M., Zhang, W., dkk. (2026). Remote sensing through UAVs for precision agriculture: Applications, technical foundations, current barriers, and future opportunities. *Smart Agricultural Technology*, 14, 102074. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.102074>
- Mayer-Schönberger, V., & Cukier, K. (2013). *Big data: A revolution that will transform how we live, work, and think*. Houghton Mifflin Harcourt.

- McBratney, A., Whelan, B., Ancev, T., & Bouma, J. (2019). Future directions of precision agriculture. *Precision Agriculture*, 20(6), 1201–1215.
- Missault, N., Bell, V. A., Cooper, D. M., Sharp, R. T., Whitmore, A. P., Milne, A. E., & Davies, H. N. (2026). Impact of climate change on freshwater macronutrients and agricultural yields across Britain. *Journal of Environmental Management*, 401(January), 128927. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.128927>
- N.THING. 2026. AI vertical farm solutions & *smart farming* platform. Dikutip dari situs: <https://www.nthing.net/en>, diakses pada 27 April 2026.
- Nguyen, D. L., Cao, H. Van, Thanh, V., Duong, T., Anh, N., & Nguyen, T. (2025). Smart Agricultural Technology Digital Technology Adoption and its impact on household Efficiency: case study drones in rural Vietnam. *Smart Agricultural Technology*, 11(April), 100980.

- Oosterwijk, A., Chouchane, H., Ryan, M., & Soma, K. (2026). Environmental , economic , and social impacts of precision agricultural technology : Convergences and divergences between theory and practice. *Journal of Rural Studies*, 123(July 2025), 104007. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2026.104007>
- Prasetyo, E. (2012). *Data mining: Konsep dan aplikasi menggunakan MATLAB*. Andi Offset.
- PT Solusi Lingkungan Industri Nusantara. 2024. *Macam-macam sistem irigasi*. SLIN. Dikutip dari situs: <https://slin.co.id/macam-macam-sistem-irigasi/>, diakses pada 26 April 2026.
- R. P. Lubis Dan I. A. L. Gaol, “Desain Dan Implementasi *Smart Farming*: Penyiraman Otomatis Berbasis Sensor Kelembapan Dan Plts,” *Kohesi J. Sains Dan Teknol.*, Vol. 8, No. 6, Hal. 111–120, 2025
- Rahmawati. (2021). Digitalisasi pertanian dan peningkatan pendapatan petani. *Jurnal Agribisnis Indonesia*, 9(2), 101–110.

- Raoufi, H., Jafari, H., Ahmad, W., & Salehi, E. (2025). Regional Sustainability Assessing the impact of climate change on agricultural production in central Afghanistan. *Regional Sustainability*, 5(3), 100156. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2024.100156>
- Rejeb, A., Rejeb, K., & Keogh, J. G. (2021). *Big data analytics in supply chain management: A systematic literature review*. *Journal of Supply Chain Management Systems*, 10(3), 25–40.
- Rismawan, A. A. 2023. Menanam sayur kangkung, solusi alternatif pengembangan ekonomi keluarga. *Pikiran Rakyat Sumedang Raya*. Dikutip dari situs: <https://sumedangraya.pikiran-rakyat.com/ekbis/pr-3317029570/menanam-sayur-kangkung-solusi-alternatif-pengembangan-ekonomi-keluarga?page=all>, diakses pada 26 April 2026.
- Robbins, L. (1932). *An essay on the nature and significance of economic science*. Macmillan.
- Rosenheim, J. A., dkk. (2022). Satellite-based data for precision agriculture: Applications and opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 280, 113150.

- Rotz, S., Gravely, E., Mosby, I., Duncan, E., Finnis, E., Horgan, M., ... Fraser, E. D. G. (2019). Automated pastures and the digital divide: How agricultural technologies are shaping labour and rural communities. *Journal of Rural Studies*, 68, 112–122.
- Samanta, Y., Permana, N. S., Mahmiludin, D., Ramdan, M., Putra, R. A., J. R. B. K. (2025). Faktor-Faktor Yang Memengaruhi Produksi Padi Sawah. *Paradigma Vol.8 No.1*. <https://doi.org/10.33603/jpa.v8i1.10763>
- Samantha dkk. (2018). Kajian Ketahanan Pangan Rumah Tangga Petani Penggarap Teh. Y. Samantha. *Jurnal Agribisains Vol 4 No 2* 30–37.
- Samantha, Y. (2026a). *Dinamika Organisasi dan Pengembangan Masyarakat*. CV Eureka Media Aksara.
- Samantha, Y. (2026b). Identifikasi Sektor Basis Komoditas Padi di Provinsi Jawa Timur : Pendekatan Location Quotient. 8(2). *Paradigma Vol.8 No.2*. <https://doi.org/10.33603/jpa.v8i2.11950>
- Samantha, Y. (2026c). Peran Daerah Basis Produksi Padi Dalam Mendukung Ketahanan Pangan Regional : Analisis Location Quotient (LQ) Provinsi Jawa Tengah. 6(01), 66–74. <https://doi.org/10.55180/aft.v6i1.2376>

- Samantha, Y., Menganti, N. S., & Amaliah, L. R. (2021). Study of Food Security Based on Expenditure Household Farmers Tea on the Community Plantation at Citengah Village, Sumedang Selatan District. Joint Proceedings of the 2nd and the 3rd International Conference on Food Security Innovation (ICFSI 2018-2019), 9, 52–57. <https://doi.org/10.2991/absr.k.210304.010>
- Samantha, Y., Permana, N. S., Dasipah, E., Marwanasari, D., & Nugraha, E. H. (2025). Adoption of Cultivation Technologies And Farmer Group Dynamics as Determinants of Sarinah Rice Farming Performance : A Path-Analysis Approach. *Agric Vol. 37 No.2* 129–146. <https://doi.org/10.24246/agric.2025.v37.i2.p129-146>
- Santoso, A. B., dkk. (2024). Adoption of precision agriculture technologies in Indonesia: Challenges and opportunities. *Indonesian Journal of Agricultural Economics*, 15(2), 45–60.
- Sari, D., dkk. (2020). Sistem informasi pertanian dan efisiensi usaha tani di Indonesia. *Jurnal Agribisnis Indonesia*, 8(1), 45–58.

- Sattar, A., Li, F., Aman, M., Zhang, W., Jia, S., Ali, A., Jabeen, N., Hao, W., & Yan, Y. (2026). Smart Agricultural Technology Remote Sensing through UAVs for precision agriculture: Applications , technical foundations , current barriers , and future opportunities. *Smart Agricultural Technology*, 14(April), 102074. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2026.102074>
- Shahab, H., Iqbal, M., Sohaib, A., Ullah, F., & Waqas, M. (2024). IoT-based agriculture management techniques for sustainable farming: A comprehensive review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 220(January), 108851. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108851>
- Shahab, H., Naeem, M., Iqbal, M., Aqeel, M., & Sajid, S. (2025). Smart Agricultural Technology IoT-driven smart agricultural technology for *real-time* soil and crop optimization. *Smart Agricultural Technology*, 10(February), 100847. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847>

- Shahab, H., Naeem, M., Iqbal, M., Aqeel, M., & Sajid, S. (2025). Smart Agricultural Technology IoT-driven smart agricultural technology for *real-time* soil and crop optimization. *Smart Agricultural Technology*, 10(February), 100847. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100847>
- Siegel, E. (2016). *Predictive analytics: The power to predict who will click, buy, lie, or die*. Wiley.
- Soeprijanto, A., Penangsang, O., Wibowo, R. S., & Aryani, N. K. (2024). Penerapan teknologi tepat guna menggunakan drone dilengkapi sistem penyemprotan pestisida dalam rangka meningkatkan produktivitas kelompok petani padi di Desa Krogowanan Magelang. *Sewagati*, 8(6), 2370–2378.
- Tang, Y., & Tang, L. (2025). Digital technology adoption and farm household income in ethnic minority areas: Evidence from Xinjiang, China. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9, 1595575. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1595575>

- Toselli, M., Baldi, E., Ferro, F., Rossi, S., & Cillis, D. (2023). *Smart Farming* Tool for Monitoring Nutrients in Soil and Plants for Precise Fertilization. *Horticulturae*, 9(1011), 1–14. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9091011>
- Tzachor, A., Devare, M., King, B., Avin, S., & Ó hÉigeartaigh, S. S. (2021). Responsible *artificial intelligence* in agriculture requires systemic understanding of risks and externalities. *Nature Machine Intelligence*, 3, 104–111.
- Vermeulen, B., Pyka, A., & Vermeulen, B. (2024). The Twin Digital and Green Transition : Paradigm Shift or Tech Fix ? *Journal of Innovation Economics & Management*, 4, 1–29. <https://doi.org/10.3917/jie.045.0001>
- Vermeulen, B., Pyka, A., & Vermeulen, B. (2024). The Twin Digital and Green Transition : Paradigm Shift or Tech Fix ? *Journal of Innovation Economics & Management*, 4, 1–29. <https://doi.org/10.3917/jie.045.0001>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., & Bogaardt, M. J. (2017). *Big data in smart farming: A review*. *Agricultural Systems*, 153, 69–80.

- XAG. 2022. Vietnam farmers adopt XAG agricultural drone to reduce costs of rice production. Diakses dari situs: <https://www.xa.com/en/news/official/xag/196>, diakses pada 27 April 2026.
- Xu, Y., Xu, X., Li, J., Guo, X., Gong, H., & Ouyang, Z. (2023). Excessive synthetic fertilizers elevate greenhouse gas emissions of smallholder-scale staple grain production in China. *Journal of Cleaner Production*, 430(June), 139720.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139720>
- Y. Wang dkk. 2023. Can Digital Intelligence and Cyber-Physical-Social Systems Achieve Global Food Security and Sustainability? *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 10, no. 11, pp. 2070-2080. doi: 10.1109/JAS.2023.123951.
- Zeng, B., Wang, Y., Zhang, W., Wen, X., & Lu, Y. (2026). The impact of digital intelligent development on agricultural ecological efficiency: Evidence from China. *Economic Analysis and Policy*, 91(December 2025), 774–790.
<https://doi.org/10.1016/j.eap.2026.03.037>

- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 13(6), 693–712.
- Zhang, H., & Zhu, H. (2025). The impact of agricultural digitization on land productivity: An empirical test based on micro panel data. *Land*, 14(1), 187. <https://doi.org/10.3390/land14010187>
- Zhang, Y., & Liu, X. (2019). *Internet of Things* in agriculture: Applications and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 497–506

BIODATA PENULIS



Dr. rer.pol. Ernah, S.P., M.Si

Penulis adalah dosen dan peneliti Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran. Penulis mendapatkan gelar Sarjana Pertanian dan Magister Sains dari Institut Pertanian Bogor dan mendapatkan gelar Doctor of Economics pada Hannover University Jerman serta aktif sebagai Pengurus Pusat PERHEPI. Penulis sudah menghasilkan tulisan ilmiah berupa buku dan artikel yang dipublikasikan di jurnal nasional, jurnal internasional bereputasi, dan media massa.



Dr. Widhi Netraning Pertiwi, S.Pd, M.Sc

Penulis adalah dosen tetap dan peneliti di Program Studi Agribisnis Universitas Muhammadiyah Bandung. Penulis lulus dari Program Studi Pendidikan Ekonomi (Ekonomi Pembangunan) Fakultas Ekonomi Universitas Negeri Semarang tahun 2012 dan mendapatkan gelar Master of Science dari Program Studi Agribisnis Fakultas

Pertanian Universitas Gadjah Mada di tahun 2015, serta menyelesaikan program Doktor di Program Studi Doktor Ilmu Pertanian Konsentrasi Agribisnis pada tahun 2024. Penulis juga merupakan reviewer pada jurnal nasional dan menghasilkan tulisan ilmiah pada jurnal nasional dan internasional dengan bidang kepakaran (keilmuan) manajemen risiko agribisnis, kelembagaan agribisnis dan transformasi digital agribisnis.



Kundrat, SP., M.EP

Penulis adalah dosen dan Ketua Program Studi Agribisnis Universitas Bale Bandung. Penulis lulus dari Program Studi Agronomi Sekolah Tinggi Pertanian Bale Bandung pada Tahun 2003 dan Mendapatkan gelar Magister ekonomi Pertanian pada Program Studi Ilmu ekonomi Pertanian Universitas Padjadjaran pada Tahun 2013. Penulis merupakan editor, yang sudah menghasilkan beberapa tulisan Ilmiah yang dipublikasikan di jurnal nasional.



Bayu Rizky Pratama, Ph.D. Penulis adalah dosen di jurusan Agroteknopreneur, Sekolah Vokasi, Universitas Padjadjaran. Penulis menyelesaikan study S3 di departement of *Agricultural and Resources Economics*, Kangwon National University, South Korea, 2026. Pada praktisnya, penulis memiliki spesifikasi penelitian pada bidang Agricultural and Resources Economics, Environmental Economics, serta sedang mendalami pada Behavioral Economics.



Yuliana Samantha S.P, M.EP
Penulis adalah dosen dan peneliti Fakultas Pertanian Universitas Winaya Mukti. Penulis lulus dari Program Studi Sosial Ekonomi Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran pada tahun 2012 dan mendapat gelar Magister Ekonomi Pertanian pada Program Studi Ilmu Ekonomi Pertanian Universitas Padjadjaran di tahun 2015. Penulis merupakan peneliti dan reviewer yang sudah menghasilkan banyak tulisan ilmiah yang dipublikasikan di jurnal nasional dan buku.