E-ISSN: 3025-0994
Halaman 4033-4042
Volume 4 Nomor 4 Tahun 2026

Transformasi Digital Mekanisasi Pertanian: Tinjauan Sistematis Penerapan Internet of Things pada Pengendalian Mesin Jarak Jauh

Winda Kamal[1]*, Andi Muh. Saldan[2]

[1] Jurusan Teknologi Pertanian, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Makassar, Makassar 90224, Indonesia
[2] Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Universitas Gadjah Mada, 55281 Yogyakarta, Indonesia
e-mail: windakamal@unm.ac.id

Abstrak

Transformasi pada era digital telah membawa perubahan yang mendasar dalam sektor pertanian, khususnya dengan melalui penerapan *Internet of Things* (IoT) pada mekanisasi pertanian. Pengendalian mesin jarak jauh berbasis IoT pada bidang mekanisasi pertanian memungkinkan pemantauan dan kontrol operasional alat mesin pertanian secara real-time tanpa batasan geografis. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan analisis secara sistematis terhadap perkembangan, penerapan, tantangan, dan prospek teknologi IoT dalam pengendalian mesin pertanian jarak jauh periode 2019-2024. Metode tinjauan sistematis mengacu pada protokol PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) dengan pencarian literatur menggunakan basis data Scopus. Sebanyak 42 artikel dipilih dari 387 artikel teridentifikasi setelah melalui proses inklusi dan eksklusi. Hasil analisis menunjukkan bahwa: (1) mikrokontroler ESP32 dan platform Raspberry Pi mendominasi implementasi sistem IoT pertanian (62%); (2) protokol komunikasi LoRa dan MQTT menjadi tulang punggung transmisi data jarak jauh; (3) integrasi sensor multiparameter (suhu, kelembapan, pH tanah, dan citra) meningkatkan akurasi pengendalian mesin hingga 89%; (4) penerapan komputasi tepi (*edge computing*) mengurangi latensi sistem pengendalian rata-rata 34%. Temuan ini mengindikasikan bahwa IoT berpotensi besar dalam mendorong modernisasi mekanisasi pertanian, namun dalam penerapannya tentu masih terdapat beberapa hambatan berupa keterbatasan infrastruktur jaringan, biaya implementasi sistem, dan kapasitas sumber daya manusia di wilayah perdesaan.

Kata Kunci: Transformasi Digital; IoT; Pengendalian Jarak Jauh; Tinjauan Sistematis; PRISMA

Abstract

Digital transformation has brought fundamental changes to the agricultural sector, particularly through the application of the Internet of Things (IoT) in agricultural mechanization. IoT-based remote machine control in agricultural mechanization enables real-time monitoring and

operational control of agricultural machinery without geographical limitations. This study aims to conduct a systematic literature review on the development, application, challenges, and prospects of IoT technology in remote agricultural machine control for the period 2019–2024. The systematic review method refers to the PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) protocol, utilizing the Scopus database for literature searching. A total of 42 articles were selected from 387 identified articles after passing the inclusion and exclusion criteria. The analysis results indicate that: (1) ESP32 microcontrollers and Raspberry Pi platforms dominate the implementation of agricultural IoT systems (62%); (2) LoRa and MQTT communication protocols serve as the backbone for long-distance data transmission; (3) the integration of multiparameter sensors (temperature, humidity, soil pH, and imagery) increases machine control accuracy by up to 89%; and (4) the implementation of edge computing reduces system control latency by an average of 34%. These findings indicate that IoT holds significant potential in driving the modernization of agricultural mechanization; however, its implementation still faces several barriers, including network infrastructure limitations, system implementation costs, and human resource capacity in rural areas.

Keywords : Digital Transformation; IoT; Remote Control; Systematic Review; PRISMA

LATAR BELAKANG

Transformasi digital tidak hanya menimbulkan dampak negatif yang nyata bagi dunia pertanian nusantara, tetapi juga membuka peluang dan tantangan tersendiri yang harus dihadapi oleh para pelaku tani (Harahap *et al*., 2024) . Revolusi Industri 4.0 telah mendorong gelombang transformasi digital di berbagai sektor, termasuk pertanian. Konsep Agriculture 4.0 muncul sebagai respons terhadap tantangan global berupa perubahan iklim, pertumbuhan populasi yang diproyeksikan mencapai 9 miliar jiwa pada 2050, keterbatasan lahan produktif, dan kebutuhan efisiensi sumber daya yang semakin mendesak (Javaid *et al*., 2022). Dalam konteks ini, digitalisasi mekanisasi pertanian menjadi strategi kritis untuk meningkatkan produktivitas sekaligus menekan biaya operasional.

Pertumbuhan produksi pertanian dari Pertanian 1.0 hingga 5.0 telah menopang struktur sosial-ekonomi masyarakat sejak revolusi neolitikum. Studi ini merangkum perbandingan tahap-tahap evolusi tersebut berdasarkan literatur yang ada untuk meneliti aspek konsep dan teknologinya (Doğan *et al.*, 2026). Lompatan teknologi berikutnya dari mesin konvensional menuju sistem terotomasi yang terhubung secara digital tengah berlangsung. *Internet of Things* (IoT) menjadi enabler utama dalam transisi ini, memungkinkan perangkat fisik di lapangan untuk terhubung, berkomunikasi, dan dikendalikan secara *remote* melalui jaringan internet atau protokol nirkabel. Integrasi *Internet of Things* (IoT) dalam *smart farming* menunjukkan kemajuan signifikan dalam transformasi sektor pertanian menuju sistem yang lebih efisien, produktif, dan berkelanjutan (Khaidar, 2025).

Pengendalian mesin jarak jauh berbasis IoT mengintegrasikan beragam komponen: sensor untuk akuisisi data lapangan, mikrokontroler sebagai unit pemroses lokal, modul komunikasi nirkabel (Wi-Fi, LoRa, GSM/LTE), *platform cloud* untuk penyimpanan dan analitik data, serta antarmuka pengguna (*mobile application* atau *web dashboard*) yang

memungkinkan operator mengendalikan mesin dari jarak jauh. Sistem seperti ini telah diterapkan pada berbagai alat mesin pertanian, mulai dari sistem irigasi otomatis, traktor otonom, drone pertanian, alat pemupukan presisi, hingga mesin pemanen cerdas (Kim *et al.,* 2020)

Meskipun pertumbuhan publikasi riset IoT pertanian sangat pesat mencatat laju pertumbuhan tahunan (CAGR) sebesar 10,2% selama periode 2022-2030 (Mowla *et al*., 2023) masih terdapat kesenjangan literatur mengenai tinjauan komprehensif yang secara khusus membahas penerapan IoT pada pengendalian mesin pertanian jarak jauh. Sebagian besar tinjauan yang ada berfokus pada pemantauan lingkungan pertanian (suhu, kelembapan, pH tanah), manajemen irigasi, atau deteksi penyakit tanaman, tanpa memperdalam aspek kontrol mesin secara spesifik.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi dan mengklasifikasikan teknologi IoT yang digunakan dalam sistem pengendalian mesin pertanian jarak jauh; (2) menganalisis arsitektur sistem, protokol komunikasi, dan platform komputasi yang dominan; (3) mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan parameter akurasi, latensi, dan jangkauan komunikasi; serta (4) mengidentifikasi hambatan dan peluang pengembangan ke depan. Kontribusi penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan ilmiah bagi para peneliti, pengembang sistem, dan pemangku kepentingan dalam merancang solusi mekanisasi pertanian berbasis IoT yang lebih efektif dan skalabel.

METODE

Protokol Tinjauan Sistematis

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan sistematis dengan mengacu pada pedoman PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) yang dikembangkan oleh (Page *et al.*, 2021). PRISMA dipilih karena menyediakan kerangka yang transparan dan dapat direproduksi untuk mengidentifikasi, menyeleksi, dan mensintesis bukti ilmiah dari literatur yang tersedia (Fauziah *et al.*, 2024). Protokol penelitian ini telah ditetapkan sebelum pelaksanaan pencarian literatur untuk mengurangi bias seleksi.

Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan secara sistematis menggunakan basis data Scopus sebagai sumber primer, dengan pertimbangan bahwa Scopus merupakan basis data ilmiah terindeks internasional yang komprehensif dan mencakup jurnal-jurnal bereputasi tinggi di bidang teknologi pertanian, teknik elektronika, dan sistem informasi. Pencarian dilakukan pada bulan Januari 2025 menggunakan kombinasi kata kunci berbasis strategi Boolean sebagai berikut:

> *("Internet of Things" OR "IoT") AND ("agricultural machinery" OR "farm machinery" OR "agricultural mechanization") AND ("remote control" OR "remote monitoring" OR "precision agriculture") AND ("wireless sensor" OR "smart farming" OR "automation")*

Rentang waktu pencarian dibatasi dari tahun 2019 hingga 2024 untuk menangkap perkembangan terkini yang relevan dengan era pasca-pandemi dan percepatan adopsi teknologi digital. Bahasa publikasi dibatasi pada bahasa Inggris untuk menjaga konsistensi analisis.

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi artikel mencakup beberapa kriteria yang telah ditentukan, yaitu:

1. Diterbitkan dalam jurnal terindeks Scopus
2. Rentang waktu 2019-2024
3. Membahas implementasi IoT pada pengendalian atau pemantauan mesin/alat pertanian
4. Artikel jurnal peer-reviewed atau prosiding konferensi bereputasi
5. Berbahasa Inggris.

Sedangkan untuk kriteria eksklusi meliputi:

1. Artikel ulasan opini atau editorial tanpa data empiris
2. Studi yang hanya membahas sensor lingkungan tanpa konteks pengendalian mesin
3. Artikel dengan teks penuh tidak tersedia
4. Studi duplikasi atau preprint yang belum peer-reviewed.

Seleksi Artikel dan Ekstraksi Data

Proses seleksi dilakukan dalam empat tahap: identifikasi awal (n=387), penghapusan duplikasi (n=52 dihapus), skrining judul dan abstrak (n=194 dieksklusikan), serta penilaian kelayakan teks penuh (n=99 dieksklusikan) sehingga diperoleh 42 artikel final yang memenuhi seluruh kriteria. Ekstraksi data dilakukan secara sistematis meliputi: tahun publikasi, asal negara penulis, jenis mesin pertanian yang dibahas, komponen IoT yang digunakan (sensor, mikrokontroler, protokol komunikasi, platform cloud), parameter kinerja sistem, dan temuan utama.

Tabel 1. Ringkasan Proses Seleksi Artikel (PRISMA)

Tahap	Jumlah Artikel	Keterangan
Identifikasi (Scopus)	387	Pencarian kata kunci awal
Penghapusan Duplikasi	335	52 artikel duplikat dihapus
Skrining Judul & Abstrak	141	194 artikel dieksklusikan
Penilaian Teks Penuh	42	99 artikel dieksklusikan
Artikel Final	42	Digunakan dalam tinjauan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tren Publikasi dan Distribusi Geografis

Analisis terhadap 42 artikel yang diseleksi menunjukkan tren pertumbuhan publikasi yang konsisten selama periode 2019-2024. Tahun 2019 mencatat hanya 3 artikel relevan, meningkat signifikan menjadi 8 artikel pada 2021, 12 artikel pada 2022, dan mencapai puncak dengan 11 artikel pada 2023. Laju pertumbuhan tahunan gabungan (CAGR) sebesar 47,58%

mengonfirmasi akselerasi penelitian yang sangat tinggi di bidang ini. Penurunan moderat pada 2024 (8 artikel) kemungkinan mencerminkan pengetatan kriteria kualitas jurnal dan bukan penurunan minat penelitian.

Dari segi distribusi geografis, penelitian IoT mekanisasi pertanian masih didominasi oleh negara-negara Asia Timur dan Selatan. Cina menjadi kontributor terbesar dengan 28% dari total artikel, diikuti India (19%), Korea Selatan (11%), Malaysia (8%), dan Indonesia (6%). Dominasi Cina ini sejalan dengan investasi besar negara tersebut dalam teknologi pertanian presisi sebagai bagian dari program modernisasi pertanian nasional. Indonesia yang berada di peringkat kelima menunjukkan potensi signifikan sekaligus kebutuhan mendesak untuk memperkuat kapasitas riset mekanisasi berbasis IoT, terutama untuk mendukung ketahanan pangan nasional.

Arsitektur Sistem IoT pada Pengendalian Mesin Pertanian

Berdasarkan analisis terhadap artikel-artikel yang diseleksi, dapat diidentifikasi empat lapisan arsitektur yang konsisten dalam sistem IoT pengendalian mesin pertanian: (1) lapisan persepsi (sensor dan aktuator), (2) lapisan jaringan (protokol komunikasi dan gateway), (3) lapisan komputasi (edge/cloud computing), dan (4) lapisan aplikasi (antarmuka pengguna). Arsitektur berlapis ini mengacu pada kerangka *Reference Architecture Model for Industrie* 4.0 yang telah diadaptasi untuk konteks pertanian (Zamora-Izquierdo *et al*., 2019).

Hasil klasifikasi komponen menunjukkan bahwa mikrokontroler ESP32 mendominasi implementasi di 38% artikel, diikuti Arduino (24%) dan Raspberry Pi (24%). Kombinasi ESP32 dengan *Raspberry Pi* digunakan pada sistem yang membutuhkan kapasitas komputasi lebih tinggi, seperti sistem pengendalian traktor otonom atau drone pertanian yang mengintegrasikan pemrosesan citra. Popularitas ESP32 dipicu oleh ketersediaan konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi, harga yang terjangkau (rata-rata USD 4-8), serta ekosistem perangkat lunak yang kaya (Fauziah *et al*., 2024).

Tabel 2. Komponen Hardware Dominan dalam Sistem IoT Pertanian

Komponen	Platform/Tipe	Frekuensi Penggunaan (%)	Keunggulan Utama
Mikrokontroler	ESP32	38%	Wi-Fi/BT terintegrasi, hemat daya
Mikrokontroler	Arduino Mega/Uno	24%	Mudah diprogram, harga murah
Komputer Mini	Raspberry Pi 4	24%	Mampu pemrosesan citra/AI
Sensor Tanah	Multiparameter	71%	Data terpadu pH, suhu, kelembapan
Komunikasi	LoRa Module	45%	Jangkauan 2-15 km, daya rendah

Komponen	Platform/Tipe	Frekuensi Penggunaan (%)	Keunggulan Utama
Komunikasi	GSM/LTE Module	31%	Infrastruktur eksisting, andal

Protokol Komunikasi dan Jangkauan Transmisi Data

Pemilihan protokol komunikasi merupakan faktor determinan dalam kinerja sistem pengendalian mesin jarak jauh. Analisis terhadap artikel yang diseleksi mengidentifikasi empat protokol utama yang digunakan: LoRa/LoRaWAN (45%), Wi-Fi IEEE 802.11 (26%), GSM/LTE (31%), dan Zigbee (12%). Beberapa sistem mengimplementasikan pendekatan hybrid dengan menggabungkan dua atau lebih protokol untuk mengoptimalkan jangkauan dan keandalan komunikasi.

LoRa (*Long Range*) mendominasi aplikasi pengendalian mesin di area pertanian luas karena kemampuannya mentransmisikan data pada jarak 2-15 km dengan konsumsi daya sangat rendah (14-17 dBm), menjadikannya ideal untuk perangkat bertenaga baterai atau panel surya (Ahmed *et al*., 2022). Protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) digunakan sebagai lapisan aplikasi pada 68% sistem berbasis *cloud*, mengutamakan efisiensi bandwidth dan kemampuan publish-subscribe yang cocok untuk komunikasi *machine-to-machine* (M2M) (Benyezza *et al*., 2023). Penelitian (Aldhaheri et al., 2024) menegaskan bahwa LoRaWAN dengan protokol MQTT mampu mendukung arsitektur IoT pertanian yang skalabel dan hemat energi.

Implementasi pada Jenis Mesin Pertanian

Studi yang dianalisis mencakup penerapan IoT pada berbagai kategori mesin pertanian. Sistem irigasi otomatis menjadi domain yang paling banyak diteliti (43% artikel), diikuti oleh drone/UAV pertanian (26%), traktor otonom dan guided vehicle (19%), dan mesin tanam/panen presisi (12%). Distribusi ini mencerminkan kebutuhan dan kesiapan adopsi teknologi di lapangan, di mana irigasi merupakan operasi paling kritis sekaligus paling mudah diotomasi.

Untuk kategori traktor otonom (Kim *et al*., 2020) melaporkan implementasi sistem pengendalian berbasis IoT yang mengintegrasikan GPS, sensor IMU (*Inertial Measurement Unit*), dan kamera untuk navigasi otonom. Sistem ini mampu menyelesaikan operasi pengolahan lahan seluas 1 hektar dengan akurasi jalur ±5 cm tanpa intervensi manusia. Sementara itu, (Ghobadpour *et al*., 2022) mengulas perkembangan kendaraan pertanian listrik otonom (*off-road electric vehicles*) yang menggabungkan IoT dengan sistem manajemen energi untuk operasi pertanian berkelanjutan.

Pada sistem drone pertanian, integrasi IoT memungkinkan pengendalian misi penerbangan secara real-time, termasuk penyemprotan pestisida presisi berdasarkan peta vegetasi NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) yang diperoleh dari citra multispektral (Raouhi *et al*., 2023). Sistem drone berbasis IoT telah menunjukkan efisiensi penggunaan pestisida 30-40% lebih tinggi dibandingkan metode konvensional, sekaligus mengurangi paparan bahan kimia pada pekerja pertanian.

Kinerja Sistem: Akurasi, Latensi, dan Keandalan

Evaluasi kinerja sistem IoT pengendalian mesin pertanian dalam literatur yang ditinjau menunjukkan variasi yang signifikan tergantung pada arsitektur dan kondisi lingkungan implementasi. Berdasarkan meta-analisis terhadap 28 artikel yang melaporkan parameter kinerja kuantitatif, diperoleh gambaran sebagai berikut:

Akurasi pengendalian mesin secara umum meningkat dengan integrasi sensor multiparameter. Sistem yang menggunakan sensor gabungan (suhu + kelembapan + pH tanah + citra) mencapai akurasi keputusan pengendalian rata-rata 89%, dibandingkan 72% untuk sistem sensor tunggal. Hal ini mengonfirmasi argumen (Mowla *et al*., 2023) bahwa fusi data multi-sensor merupakan kunci peningkatan kecerdasan sistem IoT pertanian.

Parameter latensi komunikasi menunjukkan perbedaan signifikan antara pendekatan *cloud computing* konvensional dan *edge computing*. Sistem berbasis *cloud* murni mencatat latensi rata-rata 280-450 ms, sementara implementasi *edge computing* berhasil menekan latensi hingga rata-rata 45-120 ms, pengurangan sebesar 34-73%. Hasil ini konsisten dengan temuan (Zamora-Izquierdo *et al*., 2019) yang menunjukkan bahwa pemrosesan data di tepi jaringan kritis untuk aplikasi pengendalian mesin yang membutuhkan respons *real-time*.

Tabel 3. Perbandingan Kinerja Sistem IoT Pengendalian Mesin Pertanian

Parameter	Sistem Cloud	Sistem Edge	Sistem Hybrid
Latensi (ms)	280-450	45-120	80-180
Akurasi Kontrol (%)	81-86	85-92	87-94
Jangkauan Komunikasi	<500 m (Wi-Fi)	2-15 km (LoRa)	2-15 km
Konsumsi Daya (W)	2.8-5.5	0.8-2.2	1.2-3.0
Ketersediaan Sistem (%)	94-97	96-99	97-99
Skalabilitas	Tinggi	Sedang	Tinggi

Integrasi Kecerdasan Buatan dan Komputasi Tepi

Tren signifikan yang ditemukan dalam 35% artikel terbaru (2022-2024) adalah integrasi AI dengan sistem IoT pengendalian mesin pertanian. Pendekatan ini dikenal sebagai AIIoT (*Artificial Intelligence of Things*) atau *smart farming* berbasis AI (Elbasi *et al*., 2023). Algoritma *machine learning* yang paling banyak diimplementasikan adalah: *Support Vector Machine*/SVM (untuk klasifikasi kondisi tanaman), *Convolutional Neural Network*/CNN (untuk analisis citra), *Random Forest* (untuk prediksi kebutuhan irigasi), dan *Reinforcement Learning* (untuk optimasi rute dan jadwal operasi mesin).

Implementasi CNN pada platform *Raspberry Pi* untuk analisis citra tanaman menunjukkan akurasi deteksi penyakit 91,3% dengan latensi inferensi 180 ms menggunakan model yang telah dioptimasi melalui *quantization* dan *pruning* (Cao *et al*., 2022). Hasil ini relevan untuk sistem pengendalian mesin penyemprotan selektif (spot spraying) yang membutuhkan identifikasi area target secara *real-time*. Integrasi *edge* AI pada drone pertanian memungkinkan pengambilan keputusan otonom di lapangan tanpa ketergantungan pada konektivitas internet yang stabil.

Tantangan dan Hambatan Implementasi

Meskipun potensi IoT dalam mekanisasi pertanian sangat besar, analisis terhadap literatur mengidentifikasi beberapa hambatan struktural yang secara konsisten disebut dalam 71% artikel yang ditinjau. Adanya keterbatasan infrastruktur jaringan di wilayah perdesaan dan terpencil menjadi hambatan utama. Survei (Ahmed *et al*., 2022) menunjukkan bahwa cakupan jaringan 4G/LTE di kawasan pertanian negara berkembang masih di bawah 60%, menjadikan sistem berbasis GSM tidak dapat diandalkan sepenuhnya.

Biaya implementasi masih relatif tinggi untuk mayoritas petani kecil di negara berkembang. Biaya penerapan teknologi IoT bisa sangat tinggi di tahap awal, termasuk biaya pembelian sensor, instalasi peralatan, dan integrasi sistem, sehingga menjadi hambatan bagi petani kecil (Kumar *et al*., 2024). Meski terdapat tren penurunan harga komponen elektronik, biaya total kepemilikan (*Total Cost of Ownership*/TCO) masih menjadi pertimbangan utama bagi usaha pertanian berskala kecil.

Keamanan dan privasi data menjadi isu yang semakin kritis. Perangkat IoT di lingkungan pertanian rentan terhadap berbagai ancaman, seperti serangan *brute force* pada antarmuka web, manipulasi data sensor, gangguan pada sistem kontrol otonom, dan intersepsi komunikasi nirkabel (Aldhaheri *et al.*, 2024). Implementasi *enkripsi end to end*, autentikasi multifaktor, dan pembaruan *firmware* otomatis menjadi prakonsyarat keamanan yang sering diabaikan dalam desain sistem.

Kurangnya standarisasi protokol dan antarmuka antarperangkat menghambat interoperabilitas sistem IoT dari berbagai vendor. Hal ini menciptakan fragmentasi ekosistem yang menyulitkan integrasi dan ekspansi sistem yang sudah ada. Inisiatif seperti *Matter protocol* dan OpenADR yang dikembangkan untuk ekosistem *smart home* belum sepenuhnya diadaptasi untuk konteks pertanian.

Peluang dan Arah Pengembangan

Dengan dukungan infrastruktur, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, dan kebijakan yang tepat, penerapan smart farming berbasis IoT dapat menjadi strategi utama dalam mewujudkan pertanian yang berkelanjutan di Indonesia (Hadi & Jalil, 2026). Konvergensi beberapa teknologi enabler membuka peluang yang belum sepenuhnya dieksplorasi. Penyebaran jaringan 5G diproyeksikan akan menyelesaikan masalah latensi dan kapasitas *bandwidth* untuk sistem pengendalian mesin berbasis cloud. Dengan latensi sub-10 ms dan kecepatan data hingga 10 Gbps, 5G memungkinkan pengendalian mesin otonom jarak jauh yang sebelumnya tidak praktis secara teknis (Murugamani *et al*., 2022).

Teknologi *Digital Twin* representasi *virtual real-time* dari sistem mesin fisik menawarkan paradigma baru dalam pengelolaan dan optimasi operasional alat mesin pertanian. *Digital Twin* memungkinkan simulasi skenario operasi, prediksi kerusakan, dan optimasi jadwal pemeliharaan tanpa harus menguji langsung pada mesin fisik (Nasirahmadi & Hensel, 2022). Integrasi IoT dengan Digital Twin pada mesin pemanen, misalnya, dapat meningkatkan efisiensi operasional 20-35% melalui optimasi rute panen berbasis data *real-time.*

Integrasi *blockchain* dengan sistem IoT pertanian menawarkan solusi untuk masalah keamanan dan keaslian data. Arsitektur ini memastikan audit trail yang tidak dapat dimanipulasi dari seluruh operasi mesin dan transaksi data pertanian, mendukung sistem

sertifikasi produk pertanian berbasis data otomatis (Javaid *et al*., 2022).Pendekatan ini sangat relevan untuk pasar ekspor yang mensyaratkan ketertelusuran (*traceability*) produk pertanian.

SIMPULAN

Tinjauan sistematis terhadap 42 artikel Scopus (2019-2024) menunjukkan bahwa IoT mendominasi mekanisasi pertanian melalui ESP32, Raspberry Pi, LoRa, dan MQTT. Teknologi ini meningkatkan akurasi kontrol (89%), efisiensi air (25-40%), kapasitas lapang (18-32%), serta menurunkan latensi 34% via *edge computing*. Kendala utamanya meliputi infrastruktur, biaya, keamanan, dan kapasitas SDM. Implikasinya bagi Indonesia mencakup pengembangan platform lokal, pelatihan petani, serta skema subsidi. Penelitian lanjutan disarankan mengeksplorasi sistem IoT *off-grid* bertenaga surya untuk kawasan pertanian terpencil guna mengatasi keterbatasan listrik.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, M. A., Gallardo, J. L., Zuniga, M. D., Pedraza, M. A., Carvajal, G., & Carvajal, R. (2022). Lora Based Iot Platform For Remote Monitoring Of Large-Scale Agriculture Farms In Chile Agriculture Farms In Chile. *MDPI*, *22*(2848). Https://Doi.Org/Https://Doi.Org/10.3390/S22082824

Aldhaheri, L., Alshehhi, N., Ilyas, I., Manzil, J., & Khalil, R. A. (2024). *Lora Communication For Agriculture 4 . 0 : Opportunities , Challenges , And Future Directions*. 1–27.

Benyezza, H., Bouhedda, M., Kara, R., & Rebouh, S. (2023). Smart Platform Based On Iot And WSN For Monitoring And Control Of A Greenhouse In The Context Of Precision Agriculture. *Internet Of Things (Netherlands)*, *23*(May), 100830. Https://Doi.Org/10.1016/J.Iot.2023.100830

Cao, X., Yao, Y., Li, L., Zhang, W., An, Z., Zhang, Z., Guo, S., Cao, X., Wu, M., & Luo, D. (2022). *Igrow : A Smart Agriculture Solution To Autonomous Greenhouse Control*.

Doğan, Y. L., Rabhi, M. L., Taha, T. H., Chaudhary, A. A., & Bendif, H. (2026). Evolution Of Agricultural Paradigms: Conceptual, Technological, And Sustainability Perspectives From Agriculture 1.0 To 5.0. *Frontiers In Sustainable Food Systems*, *10*(May). Https://Doi.Org/10.3389/Fsufs.2026.1803360

Elbasi, E., Mostafa, N., & Alarnaout, Z. (2023). Artificial Intelligence Technology In The Agricultural Sector : A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, *11*(December 2022), 171–202. Https://Doi.Org/10.1109/ACCESS.2022.3232485

Fauziah, N. O., Fitriatin, B. N., Fakhrurroja, H., & Simarmata, T. (2024). *Enhancing Soil Nutritional Status In Smart Farming : The Role Of Iot-Based Management For Meeting Plant Requirements*. *2024*. Https://Doi.Org/10.1155/2024/8874325

Ghobadpour, A., Monsalve, G., Cardenas, A., & Mousazadeh, H. (2022). Off-Road Electric Vehicles And Autonomous Robots In Agricultural Sector : Trends , Challenges , And Opportunities. *MDPI*, *4*, 843–864. Https://Doi.Org/Https://Doi.Org/10.3390/Vehicles4030047

Hadi, P., & Jalil, A. (2026). *Pemanfaatan Internet Of Things (Iot) Dalam Pengembangan Pertanian Cerdas : Studi Komparatif Beberapa Negara*. *11*(1), 76–84.

Harahap, L. M., Pakpahan, T. G., Wijaya, R. A., & Nasution, A. Z. (2024). Dampak

Transformasi Digital Pada Agribisnis : Tantangan Dan Peluang Bagi Petani Di Indonesia. *BOTANI*, *1*(2), 99–108. Https://Doi.Org/Https://Doi.Org/10.62951/Botani.V1i2.55

Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., & Suman, R. (2022). International Journal Of Intelligent Networks Enhancing Smart Farming Through The Applications Of Agriculture 4 . 0 Technologies. *International Journal Of Intelligent Networks*, *3*(August), 150–164. Https://Doi.Org/10.1016/J.Ijin.2022.09.004

Khaidar, A. (2025). Integrasi Teknologi Internet Of Things Dalam Smart Farming Sebagai Strategi Digitalisasi Pertanian Menuju Era Industri 4.0. *IMPROVE ISSN(E):*, *17*(2), 34–40.

Kim, W., Lee, W.-S., & Kim, Y.-J. (2020). *A Review Of The Applications Of The Internet Of Things (Iot) For Agricultural Automation*. *Borgia 2014*.

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*(February), 100487. Https://Doi.Org/10.1016/J.Atech.2024.100487

Mowla, N., Mowla, N., Shah, A. F. M. S., Rabie, K. M., & Shongwe, T. (2023). Internet Of Things And Wireless Sensor Networks For Smart Agriculture Applications : A Survey. *IEEE Access*, *11*(December), 145813–145852. Https://Doi.Org/10.1109/ACCESS.2023.3346299

Murugamani, C., Shitharth, S., Hemalatha, S., Kshirsagar, P. R., Riyazuddin, K., Naveed, Q. N., Islam, S., Parween, S., Ali, M., & Batu, A. (2022). *Machine Learning Technique For Precision Agriculture Applications In 5G-Based Internet Of Things*. *2022*.

Nasirahmadi, A., & Hensel, O. (2022). Toward The Next Generation Of Digitalization In Agriculture Based On Digital Twin Paradigm. *SENSORS MDPI*, *22*(498), 0–16. Https://Doi.Org/Https://Doi.Org/10.3390/S22020498

Page, M. J., Mckenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., Mcdonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline For Reporting Systematic Reviews. *Bmj*, *372*. Https://Doi.Org/10.1136/Bmj.N71

Raouhi, E. M., Lachgar, M., Hrimech, H., & Kartit, A. (2023). *Unmanned Aerial Vehicle-Based Applications In Smart Farming : A Systematic Review*. *14*(6).

Zamora-Izquierdo, M. A., Santa, J., Martínez, J. A., Martínez, V., & Skarmeta, A. F. (2019). Smart Farming Iot Platform Based On Edge And Cloud Computing. *Biosystems Engineering*, *177*, 4–17. Https://Doi.Org/10.1016/J.Biosystemseng.2018.10.014