Jurnal RISTER : Riset Sistem Cerdas
Vol. 3, No. 2, November 2026, hlm. 86-95

DOI: 10.25126/Riscer
e-ISSN: 3047-468X

Analisis Pemanfaatan Big Data Analytics pada Sistem Smart Agriculture Berbasis Internet of Things

Iin Purnamasari[1], Sukriadi[2], A. Anugrah Gusmi[3], Muh. Saifullah[4]
[1,2,3,4] Prodi Teknik Informatika, Universitas Lamappapoleonro
[1,2,3,4]Jl. Salotungo No.62 Watansoppeng, Kabupaten Soppeng, Sulawesi Selatan
Email: [1]iinpurnamasari017@gmail.com, [2]sukriadi@unipol.ac.id, [3]gitarahma783@gmail.com, [4]Iful270605@gmail.com

(Naskah masuk: dd-mm-yyyy, direvisi: dd-mm-yyyy, diterbitkan: dd-mm-yyyy)

Abstrak

Integrasi *Internet of Things* (IoT) dan *Big Data Analytics* (BDA) banyak diusulkan untuk pertanian cerdas, tetapi tinjauan terdahulu umumnya menekankan sensor atau kecerdasan buatan secara luas, sehingga lapisan pengelolaan dan analitik data serta kekuatan bukti efektivitasnya belum disintesis secara terpadu. Penelitian ini mensintesis secara komparatif pemanfaatan BDA pada pertanian cerdas berbasis IoT, mencakup alur data, pola arsitektur, bukti kuantitatif efektivitas, dan keterbatasan implementasi. Metode yang digunakan adalah tinjauan pustaka naratif terstruktur dengan sintesis tematik terhadap 32 artikel terbitan 2021–2026 yang dipilih berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi eksplisit, dengan catatan kualitas bukti pada angka kuantitatif. Hasilnya: (1) bukti terkonsentrasi pada lapisan pengindraan dan komunikasi (17 dari 32 artikel), sedangkan manajemen data dan arsitektur hanya 6 artikel; (2) penghematan air dilaporkan 25–60% dan peningkatan hasil panen sekitar 20–25%, tetapi bersumber dari studi heterogen yang jarang memisahkan kontribusi analitik dan umumnya belum dievaluasi di lahan; (3) hambatan utama meliputi konektivitas, interoperabilitas, privasi dan tata kelola data, biaya, serta kapasitas sumber daya manusia. Kontribusi artikel ini adalah peta distribusi bukti, perbandingan arsitektur, sintesis kuantitatif berlabel kualitas bukti, dan agenda penelitian berbasis evaluasi lapangan.

Kata kunci: *Big Data Analytics; Internet of Things; Pertanian Cerdas; Pertanian Presisi; Data Real-Time.*

Abstract

The integration of the Internet of Things (IoT) and Big Data Analytics (BDA) is widely proposed for smart agriculture, yet earlier reviews mostly emphasize sensors or artificial intelligence broadly, so the data management and analytics layers and the strength of effectiveness evidence have not been synthesized together. This study comparatively synthesizes the use of BDA in IoT-based smart agriculture, covering data flow, architecture patterns, quantitative evidence of effectiveness, and implementation limitations. A structured narrative literature review with thematic synthesis was conducted on 32 articles published in 2021–2026, selected using explicit inclusion and exclusion criteria, with evidence-quality notes attached to the quantitative figures. The findings: (1) evidence concentrates on the sensing and communication layer (17 of 32 articles), whereas data management and architecture is covered by only 6; (2) water savings of 25–60% and yield gains of roughly 20–25% are reported, but from heterogeneous studies that rarely isolate the contribution of analytics and mostly lack field evaluation; (3) the main barriers are connectivity, interoperability, data privacy and governance, cost, and human capacity. The contributions are an evidence distribution map, an architecture comparison, a quantitative synthesis labelled with evidence quality, and a field-evaluation-oriented research agenda.

Keywords: *Big Data Analytics; Internet of Things; Smart Agriculture; Precision Agriculture; Real-Time Data.*

1. PENDAHULUAN

Sektor pertanian menghadapi tekanan perubahan iklim, keterbatasan air, penurunan kualitas tanah, serta serangan hama dan penyakit, sementara keputusan di lapangan masih banyak bertumpu pada pengamatan langsung dan pengalaman petani yang tidak selalu mampu merespons perubahan kondisi secara cepat dan terukur. Pertanian cerdas (*smart agriculture*) menjawab persoalan ini melalui kombinasi sensor, jaringan komunikasi, dan sistem pengolahan data untuk meningkatkan

efisiensi dan produktivitas (Garg dan Alam, 2023). Pada lapisan pengindraan, *Internet of Things* (IoT) memungkinkan sensor suhu, kelembapan tanah, intensitas cahaya, dan pH tanah mengirim data secara kontinu untuk pemantauan dan pengendalian lingkungan pertanian (Rehman dkk., 2022).

Data dari sensor, stasiun cuaca, citra satelit, GPS, mesin pertanian, dan catatan produksi memiliki format, volume, dan kecepatan yang beragam, sehingga nilai gunanya bergantung pada kualitas pengelolaan dan analisisnya (Osinga dkk., 2022). Dalam artikel ini, *Big Data Analytics* (BDA) dipahami sebagai rangkaian pengumpulan, transmisi, penyimpanan, pemrosesan, analisis, dan visualisasi data yang mendukung pengambilan keputusan (Alahmad dkk., 2023; San Emeterio de la Parte dkk., 2023). Tuntutan waktu respons pada Agriculture 4.0 mendorong pemanfaatan penyimpanan terdistribusi, komputasi awan (*cloud*), dan komputasi tepi (*edge*) (Debauche dkk., 2022). Sebagai contoh, bila kelembapan tanah turun di bawah ambang batas, sistem dapat memberi peringatan atau mengaktifkan irigasi otomatis.

Sejumlah tinjauan terdahulu telah membahas bidang ini dari sudut berbeda. Alahmad dkk. (2023) menelaah sensor IoT dan big data untuk produksi tanaman presisi, Soussi dkk. (2024) menelaah sensor dan data cerdas melalui 99 artikel Web of Science periode 2018–2023, Adli dkk. (2023) mengulas AIoT, dan Raj dan Prahadeeswaran (2025) memadukan AI, IoT, UAV, dan robotika. Tinjauan tersebut cenderung berpusat pada perangkat sensor atau kecerdasan buatan secara luas, sehingga lapisan pengelolaan dan analitik data diperlakukan sebagai pendukung. Tinjauan yang secara khusus memadukan IoT dan analitik data, yaitu Zul Azlan dkk. (2025), mensintesis 28 studi terbitan 2019–2021 dari Scopus dan Web of Science, sehingga literatur setelah 2021, termasuk perkembangan arsitektur komputasi tepi–awan, belum tercakup. Selain itu, manfaat umumnya disajikan secara naratif; angka efektivitas jarang dibandingkan lintas studi dengan memperhatikan jenis sumber dan kualitas buktinya, dan klaim manfaat sering tidak dibedakan dari hasil implementasi lapangan.

Berdasarkan telaah tersebut, celah penelitian yang dituju adalah: (1) belum adanya sintesis pasca-2021 yang menempatkan alur data BDA, pola arsitektur, dan bukti efektivitas dalam satu kerangka pembanding; (2) belum dipetakannya distribusi bukti pada setiap lapisan alur data, sehingga ketimpangan fokus riset belum terlihat; dan (3) belum adanya perbandingan kritis angka efektivitas yang memperhatikan jenis sumber dan kualitas buktinya. Artikel ini tidak mengklaim kerangka alur data berlapis sebagai konsep baru, karena kerangka serupa telah diajukan oleh Zul Azlan dkk. (2025). Kebaruan kajian ini terletak pada cakupan periode 2021–2026, pemetaan distribusi bukti, perbandingan pola arsitektur, dan sintesis kuantitatif yang diberi catatan kualitas bukti.

Tujuan penelitian ini adalah mensintesis secara komparatif pemanfaatan BDA pada pertanian cerdas berbasis IoT dengan menjawab tiga pertanyaan penelitian: (RQ1) bagaimana alur data dan pola arsitektur yang dilaporkan literatur, dan di mana bukti riset terkonsentrasi; (RQ2) bukti kuantitatif apa yang dilaporkan mengenai efektivitasnya, dan seberapa kuat bukti tersebut; serta (RQ3) keterbatasan apa yang menghambat implementasinya. Kontribusi ilmiah artikel ini meliputi: (i) peta distribusi bukti pada empat lapisan, yaitu pengindraan–komunikasi, manajemen data–arsitektur, analitik, dan tata kelola–adopsi; (ii) perbandingan pola arsitektur *cloud*, *edge*, dan hibrida beserta keterbatasannya; (iii) tabel sintesis bukti kuantitatif dengan catatan kualitas; dan (iv) agenda penelitian berbasis evaluasi lapangan.

2. METODE

2.1 Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan tinjauan pustaka naratif terstruktur dengan sintesis tematik-naratif kualitatif. Kriteria seleksi dinyatakan secara eksplisit, tetapi rekaman proses penelusuran tidak didokumentasikan per tahap sehingga penelitian ini bukan tinjauan sistematis penuh; PRISMA 2020 (Page dkk., 2021) dipakai hanya sebagai panduan butir pelaporan. Karena sebagian besar artikel dalam korpus berupa tinjauan dan survei, angka kuantitatif yang disintesis pada umumnya merupakan angka sekunder yang dilaporkan ulang dari studi primer; keterbatasan ini dibahas pada Subbab 3.5. Pertanyaan penelitian adalah RQ1–RQ3 sebagaimana dirumuskan pada Pendahuluan.

2.2 Stategi Pencarian

Penelusuran literatur dilakukan pada Scopus, Web of Science Core Collection, dan Google Scholar sebagai pelengkap. Tanggal penelusuran dan jumlah rekaman pada setiap tahap tidak terdokumentasi sehingga tidak dilaporkan (lihat Subbab 3.5). Rangkaian kata kunci pada judul, abstrak, dan kata kunci adalah: ("big data" OR "data analytics") AND ("internet of things" OR IoT OR "wireless sensor") AND ("smart agriculture" OR "smart farming" OR "precision agriculture" OR "Agriculture 4.0"). Rentang tahun terbitan dibatasi 2021–2026.

2.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria inklusi: (a) artikel jurnal atau prosiding terbitan 2021–2026; (b) berbahasa Inggris atau Indonesia; (c) membahas IoT pada pertanian beserta sekurang-kurangnya satu komponen pengelolaan atau analitik data (penyimpanan, pemrosesan, pembelajaran mesin, visualisasi, atau arsitektur); dan (d) teks lengkap tersedia. Kriteria eksklusi: (a) hanya membahas perangkat keras tanpa pengelolaan atau analitik data; (b) berada di luar bidang pertanian; (c) editorial, opini, atau abstrak konferensi tanpa teks lengkap; dan (d) duplikat.

2.4 Prosedur Seleksi

Seleksi mengikuti tahap identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi menurut kriteria pada Subbab 2.3. Penyaringan dilakukan oleh penulis berdasarkan judul, abstrak, dan teks lengkap, dan menghasilkan korpus akhir 32 artikel. Jumlah rekaman, duplikat, dan alasan eksklusi pada setiap tahap tidak terdokumentasi sehingga diagram alir PRISMA tidak disajikan, dan penyaringan tidak dilakukan oleh beberapa penilai independen; keterbatasan ini dibahas pada Subbab 3.5.

2.5 Penilaian Kualitas Bukti

Kualitas bukti tidak dinilai dengan skor numerik. Sebagai gantinya, setiap angka kuantitatif pada Tabel 3 diberi catatan kualitas bukti berdasarkan empat hal: jenis sumber (studi primer atau tinjauan sekunder), keseragaman dasar pembanding, asal data (lahan atau dataset publik), dan tingkat kematangan sistem yang dievaluasi.

2.6 Ekstraksi dan Sintesis Data

Data diekstraksi ke dalam matriks yang memuat penulis, tahun, jenis kajian, fokus, lapisan alur data, metode analitik, temuan kuantitatif, dan keterbatasan (Tabel 1 menyajikan ringkasannya). Setiap artikel dikode pada satu atau lebih dari empat lapisan: pengindraan dan komunikasi (S), manajemen data dan arsitektur (M), analitik (A), serta tata kelola dan adopsi (G). Sintesis dilakukan secara tematik-naratif per lapisan. Meta-analisis tidak dilakukan karena heterogenitas tanaman, kondisi pembanding, dan metrik; angka kuantitatif disajikan sebagai rentang dengan konteks dan catatan kualitas bukti, serta angka yang dilaporkan melalui tinjauan sekunder ditandai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Karakteristik Korpus dan Distribusi Bukti (RQ1)

Matriks ekstraksi pada Tabel 1 memuat 32 artikel dengan sebaran tahun terbit 2021 (6 artikel), 2022 (7), 2023 (10), 2024 (4), dan 2025–2026 (5). Berdasarkan pengodean penulis, 17 artikel (53%) mencakup lapisan pengindraan dan komunikasi, 14 (44%) mencakup analitik,

13 (41%) mencakup tata kelola dan adopsi, dan hanya 6 (19%) mencakup manajemen data dan arsitektur; satu artikel dapat dikode pada lebih dari satu lapisan. Ketimpangan ini menunjukkan bahwa landasan bukti lebih kuat untuk perangkat pengindraan daripada untuk pengelolaan data, padahal lapisan inilah yang menentukan apakah data IoT dapat diubah menjadi keputusan. Berdasarkan jenis kajiannya, 30 dari 32 artikel berupa tinjauan, survei, atau kajian dan hanya 2 berupa studi metode atau kerangka kerja; 7 artikel menyebut dirinya tinjauan atau survei sistematis. Dominasi tinjauan ini berarti angka kuantitatif pada korpus umumnya bersifat sekunder.

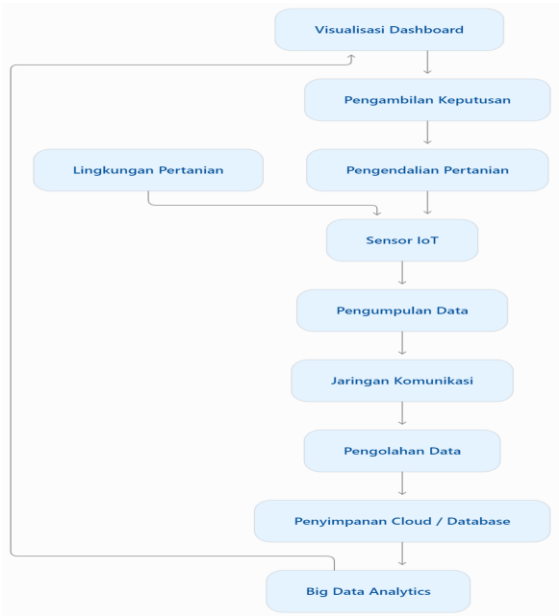
Tabel 1. Matriks Ekstraksi Literatur

Rujukan	Jenis kajian	Fokus kajian	Lapisan
Adli dkk. (2023)	Review sistematis	AIoT pada pertanian cerdas: kemajuan, aplikasi, dan tantangan adopsi	A, G
Alahmad dkk. (2023)	Review	Sensor IoT dan big data untuk produksi tanaman presisi; protokol komunikasi	S, A
Amiri-Zarandi dkk. (2022)	Review	Privasi big data pada pertanian cerdas	G
Benos dkk. (2021)	Review	Pembelajaran mesin dalam pertanian	A
Chergui & Kechadi (2022)	Review	Analitik data untuk manajemen tanaman dari perspektif big data	A
Debauche dkk. (2021)	Review metodologis	Manajemen data dan IoT pada pertanian cerdas	M
Debauche dkk. (2022)	Review	Arsitektur cloud dan terdistribusi untuk manajemen data Agriculture 4.0	M
Dhal dkk. (2023)	Overview	IoT dalam pertanian digital	S, G
Friha dkk. (2021)	Survei	Teknologi IoT baru untuk pertanian cerdas	S
Garg & Alam (2023)	Review	Tinjauan umum pertanian cerdas	S, A, G
Iaksch dkk. (2021)	Review	Digitalisasi dan big data pada pertanian cerdas	A, G
Kalyani & Collier (2021)	Survei sistematis	Kombinasi komputasi cloud, fog, dan edge	M
Lynda dkk. (2023)	Studi metode	Struktur semantik untuk mengklasifikasikan dataset sensor IoT pertanian	M, A
Manono dkk. (2026)	Review	Sensor cerdas pada pertanian presisi: kondisi terkini dan tantangan	S, G
Mansoor dkk. (2025)	Review	Sensor cerdas dan IoT pada pertanian presisi: tren dan tantangan	S, G
Mowla dkk. (2023)	Survei	IoT dan jaringan sensor nirkabel untuk pertanian	S
Mughele dkk. (2024)	Review sistematis	Peran IoT, big data, dan pembelajaran mesin pada pertanian presisi	S, A
Musa dkk. (2024)	Review	Jaringan sensor nirkabel dan implementasi sensor NPK	S
Osinga dkk. (2022)	Kajian	Big data dalam pertanian: peluang dan solusi	A, G
Pathmudi dkk. (2023)	Review sistematis	Teknologi IoT untuk pertanian cerdas dan berkelanjutan	S, G
Prakash dkk. (2023)	Review	IoT, komunikasi nirkabel, sensor, dan perangkat keras otomasi	S
Raj & Prahadeeswaran (2025)	Review (PRISMA)	Teknologi pertanian cerdas: AI, IoT, UAV, dan robotika	A, G
Rajak dkk. (2023)	Kajian	IoT dan sensor cerdas: cakupan dan tantangan	S, G
Rehman dkk. (2022)	Review	Teknologi IoT untuk pemantauan dan pengendalian	S
Saini dkk. (2024)	Review	IoT dan analitik data mutakhir pada pertanian presisi	S, A
San Emeterio de la Parte dkk. (2023)	Kerangka kerja	Manajemen data IoT semantik spasio-temporal untuk interoperabilitas	M
Shaikh dkk. (2022)	Review	Teknologi sensor berbasis IoT	S
Sinha & Dhanalakshmi (2022)	Survei	Kemajuan dan tantangan IoT pada pertanian cerdas	S, G
Soussi dkk. (2024)	Review sistematis	Sensor cerdas dan data cerdas (99 artikel, WoS 2018–2023)	S, A
Subeesh & Mehta (2021)	Review	Otomasi dan digitalisasi dengan AI dan IoT	A
Yu dkk. (2025)	Review	Komputasi kolaboratif cloud–edge–perangkat pada pertanian cerdas	M
Zul Azlan dkk. (2025)	Review sistematis (PRISMA)	IoT dan analitik data pertanian (28 studi, 2019–2021)	A, G

Catatan: jenis kajian dan pengodean lapisan merupakan penilaian penulis berdasarkan judul, abstrak, dan teks lengkap.

3.2 Alur Data dan Pola Arsitektur (RQ1)

Sintesis literatur menunjukkan alur data yang konsisten dengan Gambar 1. Lingkungan lahan diamati oleh sensor IoT; data dikumpulkan dan dikirim melalui jaringan komunikasi (Shaikh dkk., 2022; Mowla dkk., 2023); data kemudian dibersihkan, diseragamkan formatnya, dan disimpan pada basis data terdistribusi atau layanan *cloud* (Debauche dkk., 2021); tahap analitik memakai metode statistik, pembelajaran mesin, atau teknik lain (Benos dkk., 2021; Chergui dan Kechadi, 2022); hasilnya divisualisasikan pada *dashboard* untuk mendukung keputusan, yang diterjemahkan menjadi pengendalian seperti irigasi otomatis dan menghasilkan umpan balik ke lahan. Perbedaan bermakna antarkajian bukan pada urutan tahap, melainkan pada tempat tahap pemrosesan dan analitik dilaksanakan.



Gambar 1. Alur Integrasi IoT dan Big Data Analytics pada Sistem Pertanian Cerdas

Tabel 2 membandingkan pola arsitektur yang muncul dalam korpus. Arsitektur *cloud* terpusat yang tersirat pada banyak alur data berasumsi konektivitas dan pasokan daya yang stabil, asumsi yang tidak selalu terpenuhi di lahan pertanian (Raj dan Prahadeeswaran, 2025). Pola *edge* dan hibrida mengatasi latensi dan ketergantungan jaringan, tetapi memindahkan beban ke integrasi: Yu dkk. (2025) membahas fragmentasi modul dan inkonsistensi data lintas platform sebagai isu utama pada arsitektur kolaboratif *cloud–edge–*perangkat. Pilihan arsitektur dengan demikian merupakan kompromi, bukan peningkatan yang selalu lebih baik. Perbandingan langsung antarpola belum dapat disajikan pada tinjauan ini karena matriks ekstraksi tidak memuat metrik latensi, biaya, atau energi yang seragam lintas studi.

Tabel 2. Perbandingan Pola Arsitektur Pengelolaan Data pada Pertanian Cerdas

Pola arsitektur dan rujukan	**Keunggulan**	**Keterbatasan**
Cloud terpusat: data dikirim ke pusat data awan (Kalyani & Collier, 2021; Debauche dkk., 2022)	Kapasitas penyimpanan dan komputasi besar; mudah menggabungkan data historis dari banyak sumber	Bergantung pada konektivitas stabil; latensi, *bandwidth*, dan keamanan menjadi kendala analitik waktu nyata
Komputasi tepi/kabut (*edge/fog*): pemrosesan di dekat sumber data (Kalyani & Collier, 2021; Raj & Prahadeeswaran, 2025; Yu dkk., 2025)	Respons lebih cepat; mengurangi ketergantungan pada jaringan dan volume data yang dikirim	Kapasitas komputasi dan energi perangkat terbatas; pemeliharaan perangkat tersebar
Hibrida *cloud–edge–*perangkat: inferensi lokal, analitik berat di *cloud* (Yu dkk., 2025)	Mengatasi latensi, *bandwidth*, dan ketahanan sambil mempertahankan analitik skala besar	Kompleksitas integrasi; fragmentasi modul; inkonsistensi data lintas platform
Manajemen data semantik: model data spasio-temporal untuk data heterogen (San Emeterio de la Parte dkk., 2023; Lynda dkk., 2023)	Meningkatkan interoperabilitas antarperangkat dan antarsumber data	Memerlukan penyelarasan skema dan standar antarperangkat

Catatan: karakteristik dan keterbatasan merupakan sintesis penulis dari rujukan yang tercantum.

3.3 Sintesis Bukti Kuantitatif Efektivitas (RQ2)

Tabel 3 merangkum angka efektivitas yang dilaporkan beserta catatan kualitas buktinya. Bukti yang tersedia terpusat pada irigasi: penghematan air dilaporkan berkisar 25–60% pada sistem berbasis pembelajaran mesin dan IoT, dan peningkatan hasil panen sekitar 20–25% pada intervensi berbasis AI atau irigasi cerdas IoT (Raj dan Prahadeeswaran, 2025). Rentang yang lebar menunjukkan bahwa besar efek sangat bergantung pada tanaman, kondisi pembanding, dan skala sistem. Angka-angka ini tidak dapat digeneralisasi sebagai efek BDA, karena sistem yang dievaluasi memadukan sensor, otomasi irigasi, dan analitik sekaligus, dan tidak satu pun dari angka tersebut memisahkan kontribusi komponen analitik.

Tabel 3. Sintesis Bukti Kuantitatif Efektivitas dan Catatan Kualitas Bukti

Aspek dan sumber	Hasil yang dilaporkan	Catatan kualitas bukti
Penghematan air, irigasi berbasis pembelajaran mesin dan IoT (Raj & Prahadeeswaran, 2025)	Sistem berbiaya rendah untuk petani kecil: 25%; model hibrida pada pisang: 31,4%; LoRa dengan pembelajaran mesin: hingga 46%; ML berbasis *cloud*: di atas 50%; *Random Forest* (akurasi 84,6% untuk waktu irigasi): hingga 60%	Tanaman, pembanding, dan skala berbeda; angka sekunder; kontribusi analitik tidak dipisahkan dari sistem IoT
Intervensi berbasis AI vs praktik konvensional (Raj & Prahadeeswaran, 2025)	Air −55%; energi −51%; pupuk −20%; hasil panen +20%	Dasar pembanding tidak seragam; belum diverifikasi silang ke studi primer
Irigasi cerdas berbasis IoT (Raj & Prahadeeswaran, 2025)	Hasil panen hingga +25%; konsumsi air hingga −40%	Efek IoT dan analitik tidak terpisah; bukti terbatas pada irigasi
Akurasi prediksi dan klasifikasi (Raj & Prahadeeswaran, 2025)	Klasifikasi tanaman 99,7% (*Random Forest*, data Kaggle); prediksi hasil gandum R^2 99,9% (data World Bank dan FAO 1992–2013); prediksi kebutuhan irigasi 98,4%; diagnosis penyakit hingga 90%	Sebagian memakai dataset publik, bukan evaluasi lahan; generalisasi terbatas
Kematangan dan metode evaluasi (Zul Azlan dkk., 2025; studi 2019–2021)	Kurang dari sepertiga studi mencapai tahap pilot atau siap produksi; evaluasi didominasi analisis statistik dan uji kinerja; hanya satu dari 28 studi memakai laju pertumbuhan tanaman	Kesenjangan antara kinerja teknis dan hasil agronomis

Dua catatan kritis perlu dikemukakan. Pertama, akurasi prediksi yang sangat tinggi (misalnya 99,7% dan 99,9%) berasal dari dataset publik dan bukan dari evaluasi lahan, sehingga mencerminkan kinerja model pada data tertentu, bukan manfaat bagi petani. Kedua, kajian terhadap 28 studi oleh Zul Azlan dkk. (2025) menunjukkan bahwa kurang dari sepertiga studi mencapai tahap pilot atau siap produksi dan hanya satu studi yang memakai indikator pertumbuhan tanaman; temuan ini menguatkan bahwa kinerja teknis lebih sering dilaporkan daripada hasil agronomis. Dengan demikian, klaim bahwa integrasi BDA dan IoT efektif perlu dibatasi pada tingkat indikatif sampai tersedia evaluasi lapangan dengan pembanding yang jelas.

3.4 Analisis Kritis Keterbatasan Implementasi (RQ3)

Konektivitas dan daya. Pemantauan waktu nyata dan analitik berbasis *cloud* bergantung pada koneksi dan listrik yang andal, padahal keduanya sering terbatas di wilayah pertanian terpencil (Raj dan Prahadeeswaran, 2025; Mansoor dkk., 2025). Raj dan Prahadeeswaran (2025) juga mencatat bahwa sekitar 30,27% aplikasi IoT bertumpu pada Wi-Fi, yang jangkauannya terbatas untuk lahan luas. Komputasi tepi dan perangkat bertenaga surya diajukan sebagai mitigasi, tetapi menambah kebutuhan integrasi dan pemeliharaan (Yu dkk., 2025).

Interoperabilitas dan kualitas data. Perbedaan jenis perangkat dan format data menyulitkan integrasi antarsistem; San Emeterio de la Parte dkk. (2023) mengusulkan manajemen data semantik spasio-temporal, dan Lynda dkk. (2023) mengklasifikasikan dataset sensor IoT secara semantik. Zul Azlan dkk. (2025) mengidentifikasi sulitnya komponen dari produsen berbeda saling berkomunikasi serta sulitnya menggali informasi dari data pertanian berukuran besar. Pendekatan-pendekatan ini masih berupa kerangka atau studi metode, dan bukti penerapannya pada skala lahan belum tersedia dalam korpus.

Biaya dan kapasitas sumber daya manusia. Biaya investasi awal, kompleksitas pengelolaan data, dan kebutuhan keahlian teknis dilaporkan sebagai hambatan, terutama bagi petani kecil (Mansoor dkk., 2025; Raj dan Prahadeeswaran, 2025). Hal ini berimplikasi bahwa rancangan sistem perlu menekankan biaya rendah, kemudahan penggunaan, dan pelatihan, bukan hanya akurasi model.

Privasi dan tata kelola data. Amiri-Zarandi dkk. (2022) membahas risiko privasi big data pada pertanian cerdas, dan Raj dan Prahadeeswaran (2025) menyoroti kepemilikan dan kedaulatan data ketika petani berbagi data dengan perusahaan teknologi. Tanpa kerangka tata kelola yang jelas, risiko penyalahgunaan data dapat menurunkan kepercayaan dan partisipasi petani.

Bukti dan kematangan. Osinga dkk. (2022) membedakan peluang dari solusi, yaitu bahwa potensi big data belum otomatis menjadi manfaat yang terwujud. Rendahnya kematangan sistem pada studi yang dikaji Zul Azlan dkk. (2025) sejalan dengan pandangan tersebut.

3.5 Celah Penelitian, Agenda, dan Keterbatasan Kajian

Berdasarkan sintesis di atas, lima agenda penelitian diusulkan. Pertama, uji lapangan terkontrol dengan pembanding yang jelas dan indikator agronomis (hasil panen, penggunaan air dan pupuk, biaya). Kedua, evaluasi yang memisahkan kontribusi komponen analitik dari sistem IoT sebagai pembanding, misalnya irigasi berbasis ambang batas sederhana terhadap irigasi berbasis model prediktif. Ketiga, pengukuran latensi, biaya, dan energi pada arsitektur *cloud*, *edge*, dan hibrida di bawah konektivitas terbatas. Keempat, penerapan dan pengujian model data semantik serta standar interoperabilitas pada skala lahan. Kelima, perancangan kerangka tata kelola data dan peningkatan literasi digital petani.

Kajian ini memiliki keterbatasan. Korpus didominasi artikel tinjauan sehingga angka kuantitatif bersifat sekunder dan sebagian besar bersumber dari satu tinjauan (Raj dan Prahadeeswaran, 2025); pengodean lapisan dan jenis kajian dilakukan oleh penulis; pencarian dibatasi pada basis data dan bahasa tertentu, dan proses penelusuran serta seleksi tidak didokumentasikan per tahap (jumlah rekaman, duplikat, dan alasan eksklusi) serta tidak dilakukan oleh beberapa penilai independen, sehingga kajian ini tidak dapat direplikasi sepenuhnya dan rentan bias seleksi; kualitas bukti dinilai secara kualitatif, bukan dengan skor baku; dan hanya lima artikel berasal dari 2025–2026. Penelitian lanjutan sebaiknya menelusuri studi primer secara langsung dan, bila memungkinkan, melakukan meta-analisis.

4. KESIMPULAN

Tinjauan terhadap 32 artikel terbitan 2021–2026 menjawab tiga pertanyaan penelitian. Terhadap RQ1, alur data pada pertanian cerdas berbasis IoT membentuk gelung dari sensor, pengumpulan dan transmisi, pengolahan dan penyimpanan, analisis, visualisasi, hingga keputusan dan pengendalian; bukti riset terkonsentrasi pada lapisan pengindraan dan komunikasi (17 artikel), sedangkan lapisan manajemen data dan arsitektur hanya dicakup 6 artikel, dan pilihan antara arsitektur *cloud*, *edge*, dan hibrida merupakan kompromi antara latensi, ketergantungan jaringan, dan kompleksitas integrasi. Terhadap RQ2, angka yang dilaporkan menunjukkan penghematan air 25–60% dan peningkatan hasil panen sekitar 20–25%, tetapi angka tersebut sekunder, heterogen, terpusat pada irigasi, dan tidak memisahkan kontribusi analitik, sehingga klaim efektivitas hanya dapat dinyatakan sebagai indikatif.

Terhadap RQ3, hambatan utama adalah konektivitas dan daya, interoperabilitas dan kualitas data, biaya dan kapasitas sumber daya manusia, serta privasi dan tata kelola data. Kontribusi ilmiah artikel ini adalah peta distribusi bukti pada empat lapisan, perbandingan pola arsitektur, sintesis kuantitatif dengan catatan kualitas bukti, dan agenda penelitian. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan evaluasi lapangan dengan

pembanding yang jelas dan indikator agronomis, serta meninjau studi primer secara langsung agar efektivitas integrasi kedua teknologi dapat diukur secara empiris.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Lamappapoleonro atas dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini, serta kepada semua pihak yang telah membantu sehingga artikel ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

Adli, H. K., Remli, M. A., Wan Salihin Wong, K. N. S., Ismail, N. A., González-Briones, A., Corchado, J. M., & Mohamad, M. S., 2023. Recent advancements and challenges of AIoT application in smart agriculture: A review. Sensors, 23(7), 3752. https://doi.org/10.3390/s23073752

Alahmad, T., Neményi, M., & Nyéki, A., 2023. Applying IoT sensors and big data to improve precision crop production: A review. Agronomy, 13(10), 2603. https://doi.org/10.3390/agronomy13102603

Amiri-Zarandi, M., Dara, R. A., Duncan, E., & Fraser, E. D. G., 2022. Big data privacy in smart farming: A review. Sustainability, 14(15), 9120. https://doi.org/10.3390/su14159120

Benos, L., Tagarakis, A. C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., & Bochtis, D., 2021. Machine learning in agriculture: A comprehensive updated review. Sensors, 21(11), 3758. https://doi.org/10.3390/s21113758

Chergui, N., & Kechadi, M. T., 2022. Data analytics for crop management: A big data view. Journal of Big Data, 9, 123. https://doi.org/10.1186/s40537-022-00668-2

Debauche, O., Mahmoudi, S., Manneback, P., & Lebeau, F., 2022. Cloud and distributed architectures for data management in Agriculture 4.0: Review and future trends. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 34(9), pp.7494–7514. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.015

Debauche, O., Trani, J.-P., Mahmoudi, S., Manneback, P., Bindelle, J., Mahmoudi, S., Guttadauria, A., & Lebeau, F., 2021. Data management and Internet of Things: A methodological review in smart farming. Internet of Things, 14, 100378. https://doi.org/10.1016/j.iot.2021.100378

Dhal, S., Wyatt, B. M., Mahanta, S., Bhattarai, N., & Acharya, B. S., 2023. Internet of Things (IoT) in digital agriculture: An overview. Agronomy Journal, 116(3), pp.1144–1163. https://doi.org/10.1002/agj2.21385

Friha, O., Ferrag, M. A., Shu, L., Maglaras, L., & Wang, X., 2021. Internet of Things for the future of smart agriculture: A comprehensive survey of emerging technologies. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 8(4), pp.718–752. https://doi.org/10.1109/JAS.2021.1003925

Garg, D., & Alam, M., 2023. Smart agriculture: A literature review. Journal of Management Analytics, 10(2), pp.359–415. https://doi.org/10.1080/23270012.2023.2207184

Iaksch, J., Fernandes, E., & Borsato, M., 2021. Digitalization and big data in smart farming – A review. Journal of Management Analytics, 8(2), pp.333–349. https://doi.org/10.1080/23270012.2021.1897957

Kalyani, Y., & Collier, R., 2021. A systematic survey on the role of cloud, fog, and edge computing combination in smart agriculture. Sensors, 21(17), 5922. https://doi.org/10.3390/s21175922

Lynda, D., Brahim, F., Hamid, S., & Hamadoun, C., 2023. Towards a semantic structure for classifying IoT agriculture sensor datasets: An approach based on machine learning and web semantic technologies. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 35(8), 101700. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101700

Manono, B. O., Mwami, B., Mutavi, S., & Nzilu, F., 2026. Precision farming with smart sensors: Current state, challenges and future outlook. Sensors, 26(3), 882. https://doi.org/10.3390/s26030882

Mansoor, S., Iqbal, S., Popescu, S. M., Kim, S. L., Chung, Y. S., & Baek, J.-H., 2025. Integration of smart sensors and IoT in precision agriculture: Trends, challenges and future prospectives. Frontiers in Plant Science, 16, 1587869. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1587869

Mowla, M. 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, pp.145813–145852. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3346299

Mughele, E. S., Okuyade, O., Abdullahi, I. M., Maliki, D., & Duada, I. A., 2024. Roles of IoT, big data and machine learning in precision agriculture: A systematic review. Scientia Africana, 23(1), pp.33–44. https://doi.org/10.4314/sa.v23i1.3

Musa, P., Sugeru, H., & Wibowo, E. P., 2024. Wireless sensor networks for precision agriculture: A review of NPK sensor implementations. Sensors, 24(1), 51. https://doi.org/10.3390/s24010051

Osinga, S. A., Paudel, D., Mouzakitis, S. A., & Athanasiadis, I. N., 2022. Big data in agriculture: Between opportunity and solution. Agricultural Systems, 195, 103298. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103298

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., et al., 2021. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Pathmudi, V. R., Khatri, N., Kumar, S., Abdul-Qawy, A. S. H., & Vyas, A. K., 2023. A systematic review of IoT technologies and their constituents for smart and sustainable agriculture applications. Scientific African, 19, e01577. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01577

Prakash, C., Singh, L. P., Gupta, A., & Lohan, S. K., 2023. Advancements in smart farming: A comprehensive review of IoT, wireless communication, sensors, and hardware for agricultural automation. Sensors and Actuators A: Physical, 362, 114605. https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114605

Raj, M., & Prahadeeswaran, M., 2025. Revolutionizing agriculture: A review of smart farming technologies for a sustainable future. Discover Applied Sciences, 7, 937. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07561-6

Rajak, P., Ganguly, A., Adhikary, S., & Bhattacharya, S., 2023. Internet of Things and smart sensors in agriculture: Scopes and challenges. Journal of Agriculture and Food Research, 14, 100776. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100776

Rehman, A., Saba, T., Kashif, M., Fati, S. M., Bahaj, S. A., & Chaudhry, H., 2022. A revisit of Internet of Things technologies for monitoring and control strategies in smart agriculture. Agronomy, 12(1), 127. https://doi.org/10.3390/agronomy12010127

Saini, A. K., Yadav, A. K., & Dhiraj, 2024. A comprehensive review on technological breakthroughs in precision agriculture: IoT and emerging data analytics. European Journal of Agronomy. https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127440

San Emeterio de la Parte, M., Martínez-Ortega, J.-F., Hernández Díaz, V., et al, 2023. Big data and precision agriculture: A novel spatio-temporal semantic IoT data management framework for improved interoperability. Journal of Big Data, 10, 52. https://doi.org/10.1186/s40537-023-00729-0

Shaikh, F. K., Karim, S., Zeadally, S., & Nebhen, J., 2022. Recent trends in Internet-of-Things-enabled sensor technologies for smart agriculture. IEEE Internet of Things Journal, 9(23), pp.23583–23598. https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3210154

Sinha, B. B., & Dhanalakshmi, R., 2022. Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey. Future Generation Computer Systems, 126, pp.169–184. https://doi.org/10.1016/j.future.2021.08.006

Soussi, A., Zero, E., Sacile, R., Trinchero, D., & Fossa, M., 2024. Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review. Sensors, 24(8), 2647. https://doi.org/10.3390/s24082647

Subeesh, A., & Mehta, C. R., 2021. Automation and digitization of agriculture using artificial intelligence and Internet of Things. Artificial Intelligence in Agriculture, 5, pp.278–291. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.11.004

Yu, P., Teng, F., Zhu, W., Shen, C., Chen, Z., & Song, J., 2025. Cloud–edge–device collaborative computing in smart agriculture: Architectures, applications, and future perspectives. Frontiers in Plant Science, 16, 1668545. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1668545

Zul Azlan, Z. H., Junaini, S. N., Khan, A. S., & Mustafa, W. A., 2025. Data-driven agriculture: Unveiling the power of Internet of Things and data analytics for transformative farming practices. Journal of Sensors, 2025, 6205646. https://doi.org/10.1155/js/6205646