

Analisis Komprehensif Ekosistem Pertanian Cerdas (Smart Agriculture) Masa Depan: Integrasi Arsitektur IoT Berbiaya Rendah, Efisiensi Energi Jaringan Sensor (WSN), Kecerdasan Buatan (AI), dan Sistem Keterlacakan Rantai Pasok

Yuris Ikrar Rabbani ^{1)*} , Wildan Ramadhani ²⁾ 

^{1,2)}Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾yurisikrar78@gmail.com ²⁾ danzkren65@gmail.com

Abstrak

Pertumbuhan populasi global dan kondisi iklim yang tidak menentu telah mengancam ketahanan pangan secara masif, sehingga menuntut adanya transisi pengelolaan pertanian dari metode konvensional menuju pertanian cerdas (*Smart Agriculture*) berbasis *Internet of Things* (IoT). Meskipun IoT menawarkan potensi yang revolusioner, adopsinya dalam skala luas kerap terhambat oleh mahalnya biaya implementasi perangkat komersial, inefisiensi konsumsi daya pada Jaringan Sensor Nirkabel (WSN), kerentanan keamanan transmisi data, dan belum terintegrasinya data dari lahan hingga ke tangan konsumen. Kajian ini menyajikan tinjauan analitis dan komprehensif terhadap ekosistem IoT pertanian masa depan untuk menjawab tantangan tersebut. Pada tingkat arsitektur perangkat keras (*hardware*), analisis menunjukkan bahwa penerapan *Monitoring and Control Framework* (MCF) yang bersifat *open-source* dan dapat digunakan di lintas domain terbukti mampu menekan biaya implementasi sistem hingga 20 kali lipat lebih murah dibandingkan solusi komersial yang ada di pasaran. Selanjutnya pada lapisan jaringan, kinerja dan efisiensi WSN dioptimalkan melalui fungsi pemilihan *cluster head* yang cerdas dengan mempertimbangkan sisa energi, jarak, dan *Signal to Noise Ratio* (SNR). Pendekatan efisiensi ini, jika dipadukan dengan enkripsi data berbasis *linear congruential generator*, terbukti menurunkan *overhead* perutean hingga 26% sekaligus mengamankan data dari ancaman siber. Di tingkat pemrosesan analitik, terjadi pergeseran dari pemrosesan Cloud terpusat menuju *Edge AI* dan *Deep Learning* secara *real-time* langsung pada ujung perangkat jaringan. Integrasi Kecerdasan Buatan (AI) ini memfasilitasi otomatisasi penuh seperti prediksi hasil panen, deteksi penyakit tanaman, hingga pengoperasian *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) secara otonom. Terakhir di sektor hilir, penggunaan objek pintar berteknologi RFID dan *Electronic Product Code* (EPC) memfasilitasi sistem Keterlacakan dalam Manajemen Rantai Pasok Pertanian (APSCM). Integrasi komprehensif dari inovasi berbiaya rendah, jaringan hemat energi, analitik AI presisi, dan keterlacakan produk ini akan menjadi fondasi utama dalam menciptakan ekosistem ketahanan pangan masa depan yang transparan dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *Smart Agriculture*, *Internet of Things* (IoT), Jaringan Sensor Nirkabel (WSN), Kecerdasan Buatan (AI), Keterlacakan Rantai Pasok.

Article history: Received 5 April 2026, first decision 22 April 2026, accepted 22 August 2026, available online 28 October 2026

I. PENDAHULUAN

Populasi dunia diperkirakan akan terus melonjak drastis dan menuntut peningkatan produksi pangan serta kebutuhan air hingga dua kali lipat menjelang tahun 2050. Di sisi lain, sektor pertanian saat ini saja telah mengonsumsi sekitar 70% dari ketersediaan air tawar global [1], [2]. Metode pertanian konvensional semakin terancam dan tidak lagi memadai akibat dampak dari perubahan iklim yang ekstrem, krisis lahan, cuaca yang tidak menentu, serta degradasi lingkungan. Kondisi kritis ini menciptakan urgensi global yang memaksa sektor agrikultur untuk bertransisi menuju Pertanian Cerdas (*Smart Agriculture*) berbasis *Internet of Things* (IoT), yang menjanjikan optimalisasi pemanfaatan sumber daya, pemantauan jarak jauh yang presisi, serta peningkatan hasil panen yang signifikan [3], [4], [5].

Implementasi dari *Smart Agriculture* sangat bergantung pada arsitektur ekosistem IoT berlapis, mulai dari lapisan persepsi berupa kumpulan sensor fisik di ladang, hingga lapisan aplikasi untuk manajemen data. Namun, adopsi teknologi mutakhir ini secara luas sering kali terhambat oleh mahalnya harga perangkat komersial dan belum matangnya standarisasi antar sistem IoT. Sebagai solusi inovatif untuk mengatasi rintangan ekonomi dan teknis

*) Yuris Ikrar Rabbani

tersebut, implementasi menggunakan arsitektur perangkat keras dan lunak dengan sistem sumber terbuka (*open-source*) seperti *Monitoring and Control Framework* (MCF) menjadi sangat krusial[5], [6]. Pendekatan kerangka kerja lintas-domain ini terbukti secara praktis mampu menghemat biaya implementasi awal hingga 20 kali lipat lebih terjangkau apabila dibandingkan dengan pengadaan instrumen pertanian komersial murni, tanpa mengorbankan fungsionalitas dan keandalan sistem[2], [3], [7].

Selain penyelesaian masalah biaya arsitektur, kelangsungan sistem ini ditopang kuat oleh Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) yang terus-menerus bertukar data, namun sayangnya sangat dibatasi oleh usia daya baterai, memori, komputasi, dan kerentanan keamanan transmisi[8], [9]. Guna memperpanjang usia pakai dan menstabilkan jaringan, WSN membutuhkan strategi perutean data yang hemat energi, yakni melalui pemilihan kepala kluster (*cluster head*) yang adaptif dengan memperhitungkan sisa daya energi dan kekuatan kualitas sinyal atau *Signal to Noise Ratio* (SNR). Lebih jauh, sifat komunikasi jaringan nirkabel di ruang terbuka membuatnya sangat rentan diretas; oleh karena itu, pengamanan transmisi membutuhkan algoritma enkripsi data yang sangat ringan dan tidak menyedot daya sensor secara drastis, salah satunya dengan menerapkan metode pembangkit bilangan acak seperti *linear congruential generator*[3], [10], [11].

Otomatisasi ekosistem masa depan juga bergerak melebihi sekadar kemampuan sensor, yakni melalui keterlibatan analitik Kecerdasan Buatan (AI) yang perlahan bergeser dari pemrosesan komputasi awan menuju komputasi tepi (*Edge AI*) guna memberikan intervensi secara langsung di lokasi kejadian (*real-time*)[4], [12], [13]. Optimalisasi ini mendasari beroperasinya *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) atau *drone* untuk pemindaian penyakit tanaman, identifikasi gulma, dan penyemprotan pupuk presisi menggunakan algoritma *Deep Learning*. Di ranah hilir yang berhadapan dengan pelanggan, ekosistem agrikultur terintegrasi ini juga difungsikan untuk melacak pergerakan produk guna meminimalisasi pemborosan pangan. Penerapan label *Radio Frequency Identification* (RFID), *Electronic Product Code* (EPC), maupun *blockchain* dapat diimplementasikan ke dalam Manajemen Rantai Pasok (*Supply Chain Management*) untuk menjaga keterlacakan data riwayat panen secara transparan dan aman hingga ke tangan konsumen[7], [14], [15].

Merujuk pada kombinasi kompleks antara tantangan dan lompatan teknologi tersebut, kajian ini disusun untuk memberikan tinjauan analitis terhadap ekosistem pertanian cerdas masa depan secara menyeluruh. Analisis difokuskan pada penggabungan empat pilar utama: adopsi arsitektur IoT yang tangguh namun berbiaya rendah, optimalisasi kinerja serta pengamanan siber pada Jaringan Sensor Nirkabel (WSN), ketajaman prediksi komputasi Kecerdasan Buatan (AI), serta kesatuan sistem dengan keterlacakan rantai pasok industri. Integrasi seluruh elemen ini diharapkan dapat memformulasikan sebuah kerangka konseptual bagi dunia agrikultur masa depan yang tidak hanya mandiri dan cerdas, namun juga ekonomis, transparan, serta berkelanjutan dari tahapan persemaian hingga distribusi akhir[4], [5], [16].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Implementasi sistem pertanian cerdas pada skala yang luas sangat bergantung pada kekuatan arsitektur infrastrukturnya, yang dalam literatur modern umumnya dikonseptualisasikan ke dalam kerangka lima lapis (*five-layer architecture*), yang membentang dari lapisan sensor fisik terbawah (*perception layer*) hingga lapisan aplikasi dan bisnis (*business layer*) di pusat data[17], [18], [19]. Namun dalam praktiknya, adopsi teknologi multi-lapis ini di kalangan petani sering kali terhadang oleh hambatan ekonomi akibat tingginya harga perangkat komersial dari pabrikan besar, serta hambatan teknis berupa tidak adanya standarisasi yang menyebabkan buruknya interoperabilitas antarperangkat IoT. Untuk mengatasi kebuntuan tersebut, literatur terkini memperkenalkan terobosan melalui penerapan Kerangka Kerja Pemantauan dan Pengendalian (*Monitoring and Control Framework*/MCF) yang dibangun menggunakan basis perangkat keras dan perangkat lunak sumber terbuka (*open-source*) yang bersifat *domain-agnostic*[7], [19], [20]. Pendekatan ini memungkinkan perancangan sistem pemantauan menggunakan papan mikrokontroler berbiaya murah, seperti Arduino Uno atau NodeMCU ESP8266, yang digabungkan secara langsung dengan modul pemancar LoRa atau Wi-Fi serta berbagai sensor kelembapan generik. Analisis keuangan komparatif membuktikan bahwa pemanfaatan kerangka kerja sumber terbuka ini mampu memangkas biaya implementasi dan operasional sistem hingga 20 kali lipat lebih murah jika disejajarkan dengan harga stasiun cuaca agro-komersial, sembari tetap menyajikan keandalan perolehan data yang presisi di lingkungan ladang[9], [20], [21].

Pada tingkat akar rumput, tulang punggung dari lapisan persepsi dalam arsitektur IoT tersebut dijalankan oleh Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) yang secara terus-menerus merutekan dan mentransmisikan data mentah menuju stasiun peladen. Tantangan terbesarnya adalah perangkat WSN harus beroperasi dengan keterbatasan ekstrim pada sumber daya baterai, kapasitas memori, dan daya komputasi internal, sehingga menuntut penerapan algoritma lalu

lintas perutean data yang luar biasa efisien[3], [17], [19]. Berbagai kajian mengusulkan optimalisasi konsumsi energi ini dengan mengeksekusi fungsi keputusan multi-kriteria untuk menyeleksi titik kepala kluster (*cluster head*) pada jaringan. Formula algoritma ini secara cerdas menyeleksi titik transmisi terbaik dengan mengevaluasi sisa kapasitas baterai pada sensor, mengukur jarak lokasi node menuju stasiun basis, serta mempertimbangkan rasio kekuatan kualitas sinyal atau Signal to Noise Ratio (SNR)[7], [15], [19]. Pemantauan SNR terbukti secara efektif mencegah jaringan dari latensi koneksi, memaksimalkan ketahanan perutean, serta menekan rasio jatuhnya paket data (*packet drop*) di udara terbuka. Bersamaan dengan efisiensi energi, kerentanan jaringan tanpa kabel terhadap manipulasi dari serangan peretas menuntut adanya pengamanan siber tingkat sensor; di mana literatur mengusulkan integrasi mekanisme penyandian (*encryption*) ringan menggunakan metode pembangkit bilangan acak *linear congruential generator*[2], [22], [23]. Strategi kriptografi yang ringan ini secara efektif mampu menyembunyikan identitas aliran data dari ancaman sabotase tanpa memicu beban komputasi tambahan (*routing overhead*) yang dapat menyedot daya baterai sensor secara drastis[3], [4], [6].

Ketika infrastruktur sensor dan transmisi data ini telah terbangun dengan stabil dan aman, hal ini membuka jalan bagi tingkatan otomatisasi tingkat lanjut yang diotaki oleh implementasi Kecerdasan Buatan (AI)[24], [25], [26]. Untuk mengeliminasi kemacetan *bandwidth* dan ketergantungan latensi terhadap peladen komputasi awan terpusat, tren arsitektur analitik pertanian masa depan kini bergerak tajam menuju paradigma komputasi tepi (*Edge Computing*)[27], [28], [29]. Melalui arsitektur Edge AI, berbagai algoritma turunan *Machine Learning* dan *Deep Learning* ditanamkan secara lokal ke dalam sirkuit mikrokontroler di batas luar jaringan, memungkinkan perangkat untuk membuat diagnosis independen secara instan (*real-time*)[5], [16], [30]. Pemanfaatan algoritma *Deep Learning*, terutama penerapan jaringan *Convolutional Neural Networks* (CNN), memungkinkan sistem untuk mengekstraksi parameter citra visual yang rumit guna memprediksi estimasi hasil panen, mendeteksi indikasi penyakit pada dedaunan secara dini, serta mengklasifikasi kehadiran gulma liar yang merugikan tanaman asli. Lebih jauh lagi, kemampuan komputasi analitik tepi ini berhasil diintegrasikan dengan manuver operasional Kendaraan Udara Nirawak (UAV) alias drone[8], [10], [31]. Dengan bermodalkan kamera multispektral bertenaga AI, UAV dapat diterbangkan untuk memetakan kesehatan biometrik tanaman secara detail dari udara, melaksanakan pengawasan lahan intensif, hingga bertindak sebagai aktuator eksekutor untuk melakukan penyemprotan bahan kimia pembasmi hama yang sangat spesifik dan terarah langsung ke area yang terjangkit, yang secara dramatis menekan efek toksik dari pestisida terhadap lahan pertanian yang luas[9], [11], [32].

Rantai keandalan ekosistem pertanian cerdas ini pada akhirnya tidak boleh berhenti hanya pada proses pra-panen di tanah budidaya semata, melainkan wajib menjangkau tahapan pasca-panen demi menjamin transparansi serta kualitas pangan ketika didistribusikan ke konsumen[1], [33], [34]. Mengakomodasi kebutuhan ini, adopsi Manajemen Rantai Pasok Produk Pertanian (APSCM) wajib dipadukan secara inheren ke dalam jaringan IoT[7], [20]. Literatur akademik sangat menekankan pemanfaatan objek pintar yang diaktifkan melalui pemindai frekuensi radio (*Radio Frequency Identification*/RFID) dan nomor identifikasi global *Electronic Product Code* (EPC) pada setiap komoditas hasil tani. Pelabelan canggih ini memonitor status fisik dan mengunci jejak logistik seluruh hasil panen dengan ketepatan yang tinggi[35], [36], [37]. Menyadari bahwa pergerakan aset logistik dan instrumen sensor sangat krusial, teknologi *Blockchain* atau buku besar terdesentralisasi diadopsi sebagai tameng pelindung pangkalan data IoT untuk memastikan tidak ada satupun entitas yang dapat menyelewengkan rekam jejak historis rantai pasok[17], [38], [39]. Kehadiran perlindungan *Blockchain* ini bukan sekadar menjamin keaslian histori produk organik di mata pelanggan, tetapi juga secara kritis bertindak sebagai lapisan pelindung yang mencegah alat mesin otonom—seperti drone udara dan traktor pintar—dari skenario manipulasi titik navigasi (*GPS spoofing*) yang dilancarkan oleh peretas siber[18], [21], [40]. Integrasi holistik yang merajut komponen keras berbiaya rendah, jaringan transmisi yang hemat daya dan aman, komputasi cerdas dari udara, hingga transparansi pasca-panen ini membuktikan bahwa arsitektur pertanian cerdas berbasis IoT merupakan satu-satunya solusi komprehensif untuk menuntaskan ancaman krisis ketahanan pangan dunia di dekade-dekade mendatang[7], [15], [19].

III. METODE

Penelitian ini menggunakan metode tinjauan pustaka sistematis (*systematic literature review*) yang dipadukan dengan analisis kritis untuk mengeksplorasi, mengevaluasi, dan mensintesis perkembangan teknologi terkini di dalam ekosistem pertanian cerdas[12], [13]. Melalui pendekatan ini, kajian difokuskan pada pengumpulan data sekunder secara ekstensif dari berbagai literatur akademik untuk membangun kerangka analisis yang komprehensif mengenai integrasi infrastruktur IoT, efisiensi Jaringan Sensor Nirkabel (WSN), penerapan Kecerdasan Buatan (AI), serta

manajemen keterlacakan rantai pasok[41], [42]. Metode analisis literatur dipilih karena memungkinkan peneliti untuk tidak hanya merangkum temuan masa lalu, tetapi juga mengidentifikasi batasan sistem saat ini, membandingkan efektivitas biaya dari arsitektur yang berbeda, serta memetakan tren perancangan agrikultur generasi berikutnya[43], [44], [45].

Untuk memastikan proses penelitian berjalan secara terstruktur dan terukur, tahapan pelaksanaan metodologi ini dijabarkan ke dalam beberapa poin subbab berikut:

3.1. Desain Penelitian

Penelitian ini dirancang sebagai studi deskriptif-analitis yang sepenuhnya bersandar pada tinjauan data sekunder (*literature review*). Pendekatan analisis dirancang dengan membedah ekosistem pertanian ke dalam lapisan-lapisan arsitektur jaringan secara hierarkis, mulai dari lapisan persepsi (pengumpulan data fisik di ladang), lapisan transportasi (perutean nirkabel), lapisan pemrosesan (komputasi AI), hingga lapisan bisnis (distribusi produk). Desain ini bertujuan untuk merajut inovasi teknologi dari berbagai penelitian yang terpisah menjadi satu kesatuan solusi pertanian masa depan yang solid.

3.2. Teknik Pengumpulan Data

Strategi pengumpulan data dilakukan dengan menelusuri artikel-artikel riset pada basis data publikasi ilmiah bereputasi, seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, dan Springer. Pencarian literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci (*keywords*) spesifik yang disesuaikan dengan fokus penelitian, antara lain: "*IoT-enabled smart agriculture*", "*open-source agriculture architecture*", "*wireless sensor network energy efficiency*", "*UAV and Deep Learning in farming*", serta "*food supply chain traceability*". Fokus pencarian dititikberatkan pada artikel jurnal dan prosiding konferensi yang dipublikasikan dalam rentang dekade terakhir guna menjamin tingkat kebaruan informasi[46], [47].

3.3. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Guna menjaga kualitas dan relevansi kajian, literatur yang dikumpulkan disaring secara ketat berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi.

- Kriteria Inklusi: Artikel yang dianalisis wajib memenuhi ruang lingkup utama penelitian, yakni mencakup implementasi kerangka kerja IoT berbiaya rendah dengan papan mikrokontroler (*open-source*), algoritma penghematan energi dan pengamanan siber pada WSN, eksperimen *Deep Learning* atau *drone* (UAV) pada tanaman, atau penggunaan pemindai RFID dan *blockchain* dalam rantai logistik pangan[48].
- Kriteria Eksklusi: Artikel yang berasal dari konferensi berskala rendah tanpa prosedur ulasan sejawat (*peer-review*) yang ketat, atau dokumen yang hanya membahas IoT secara umum tanpa memuat eksperimen teknis pada sektor agrikultur, langsung diabaikan dan dikeluarkan dari daftar analisis.

3.4. Prosedur Analisis dan Sintesis Data

Setelah literatur yang relevan berhasil dikurasi, tahapan terakhir adalah melakukan analisis konten (*content analysis*). Proses ini dilakukan melalui ekstraksi data dari masing-masing literatur untuk kemudian disintesis menjadi empat variabel analisis utama sesuai dengan judul, yaitu:

1. Analisis Arsitektur Berbiaya Rendah: Membandingkan harga dan keandalan komponen sumber terbuka (*open-source*) seperti *Monitoring and Control Framework* (MCF) terhadap instrumen agrikultur komersial di pasaran.
2. Analisis WSN dan Keamanan: Mengevaluasi algoritma fungsi keputusan multi-kriteria untuk pemilihan kepala klaster yang hemat baterai serta efektivitas enkripsi *linear congruential generator* dalam memproteksi lalu lintas data.
3. Analisis Komputasi Tepi dan AI: Mengkaji pergeseran pemrosesan menuju *Edge AI* dan keberhasilan kolaborasinya dengan kamera multispektral pada UAV untuk tindakan penyemprotan presisi.
4. Analisis Rantai Pasok: Menganalisis peran lapisan aplikasi dan bisnis dengan memanfaatkan kode produk elektronik (EPC) dan buku besar *blockchain* untuk memastikan konsumen dapat melacak jejak produk organik secara transparan[49], [50].

IV. HASIL

4.1 Temuan Spesifikasi Teknologi Komunikasi pada Arsitektur IoT

Berdasarkan tinjauan literatur mengenai lapisan jaringan dan arsitektur IoT, kelancaran pengiriman data pertanian sangat bergantung pada jenis protokol komunikasi yang digunakan. Literatur mengklasifikasikan teknologi komunikasi nirkabel berdasarkan spektrum, jangkauan transmisi, dan kecepatan datanya. Temuan menunjukkan bahwa tidak ada satu teknologi tunggal yang sempurna untuk semua kondisi; pemilihan jaringan sangat bergantung

pada kebutuhan spesifik ladang, seperti apakah sensor membutuhkan jangkauan luas (*Low Power Wide Area/LPWA*) atau kecepatan data tinggi (*WLAN*).

Data komparasi dari berbagai spesifikasi teknologi komunikasi yang diimplementasikan dalam pertanian cerdas disajikan secara rinci pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Karakteristik dan Spesifikasi Teknologi Komunikasi pada Sistem IoT Pertanian

Jenis Jaringan / Teknologi	Kategori Spektrum	Jarak Transmisi Maksimal	Tipe Jaringan	Kecepatan Data (Data Rate)
802.11a/b/g/n/ac	Tidak Berlisensi	100 meter	WLAN	2 - 700 Mbps
802.11ah	Tidak Berlisensi	1.000 meter (1 km)	WLAN	Hingga 78 Mbps
802.11p	Berlisensi	1.000 meter (1 km)	WLAN	3 - 27 Mbps
SigFox	Berlisensi	Pedesaan: 50 km Perkotaan: 10 km	LPWA	100 - 600 bps
LoRaWAN	Berlisensi	20 km	LPWA	0,3 - 100 kbps
NB-IoT	Berlisensi	35 km	LPWA	Hingga 250 kbps

4.2 Temuan Metrik Kinerja dan Efisiensi Jaringan Sensor Nirkabel (WSN)

Pada aspek transmisi data lokal, literatur menemukan bahwa Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) kerap mengalami kendala keterbatasan energi dan tingginya tingkat kegagalan pengiriman data akibat gangguan sinyal. Kajian terbaru menunjukkan bahwa penerapan algoritma pemilihan kepala klaster (*cluster head*) berbasis fungsi keputusan multi-kriteria—yang mengevaluasi sisa energi, jarak ke stasiun basis, dan *Signal to Noise Ratio* (SNR)—terbukti meningkatkan stabilitas jaringan secara signifikan.

Hasil eksperimen dari data literatur memperlihatkan bahwa penerapan fungsi pemilihan cerdas yang dipadukan dengan keamanan data berbasis *linear congruential generator* menghasilkan perbaikan metrik kinerja WSN sebagai berikut:

1. Penurunan rasio kegagalan (*packet drop ratio*): Terjadi perbaikan signifikan di mana kegagalan pengiriman paket data menurun rata-rata sebesar 38,5%.
2. Peningkatan *throughput* jaringan: Kecepatan transfer data efektif dalam jaringan meningkat dengan rata-rata sebesar 13,5%.
3. Pengurangan latensi: Waktu tunda (*delay*) pengiriman dari titik sensor ke server berhasil ditekan rata-rata sebesar 13,5%.
4. Efisiensi konsumsi daya: Penggunaan energi pada perangkat baterai sensor berkurang secara rata-rata sebesar 16%.
5. Reduksi beban perutean (*routing overhead*): Lalu lintas data tambahan yang tidak perlu berhasil dikurangi hingga 26%.

4.3 Temuan Tingkat Akurasi AI dan Aplikasi Wahana Udara Nirawak (UAV)

Pada lapisan komputasi analitik, literatur mencatat adanya pergeseran mekanisme penyelesaian masalah menuju sistem otonom yang digerakkan oleh Kecerdasan Buatan (AI). Dalam aplikasi deteksi anomali pada daun tanaman, invasi hama, maupun klasifikasi gulma liar, mayoritas kajian mengandalkan pendekatan *Deep Learning*, secara khusus arsitektur *Convolutional Neural Networks* (CNN). Ekstraksi literatur menemukan bahwa pemrosesan citra multispektral yang diambil melalui kamera resolusi tinggi pada wahana udara nirawak (UAV) atau *drone* mampu menghasilkan diagnosis pertanian secara seketika (*real-time*).

Selain itu, pada sistem aktuator fisik, pengendalian pompa air irigasi cerdas di lapangan telah mengadopsi kontroler berbasis *Proportional Integral Derivative* (PID) serta *Fuzzy Logic*. Temuan kajian menegaskan bahwa integrasi kontroler ini membuat pompa air menyalurkan irigasi dengan tingkat presisi yang tinggi sesuai dengan titik kebutuhan acuan (*setpoint*), sehingga mencegah terjadinya pemberian air berlebih (*overshoot*) yang berpotensi merusak tanaman.

4.4 Temuan Instrumen Keterlacakan (Traceability) Rantai Pasok Pertanian

Tahapan hilir dalam ekosistem agrikultur mutakhir menuntut adanya pemantauan jalur distribusi pangan. Hasil kajian literatur mengidentifikasi bahwa arsitektur keterlacakan (*traceability*) beroperasi menggunakan dua elemen teknologi utama pada objek pintar (*smart objects*), yakni label identifikasi frekuensi radio (RFID) dan *Electronic*

Product Code (EPC). Instrumen ini disematkan pada setiap paket hasil panen untuk membaca, merekam, dan mentransmisikan pergerakan produk dari ladang ke konsumen.

Lebih jauh, temuan terbaru dalam literatur menunjukkan adopsi struktur buku besar terdesentralisasi atau *Blockchain* sebagai sistem basis data lapis atas. Integrasi kontrak pintar (*smart contract*) berbasis *Blockchain* ini berfungsi memastikan bahwa seluruh catatan historis rantai pasok logistik produk pertanian terkunci secara kriptografis, sehingga informasi kualitas pangan kebal terhadap segala bentuk serangan modifikasi dan peretasan siber.

V. PEMBAHASAN

5.1 Implikasi Penggunaan Arsitektur Sumber Terbuka (Open-Source) pada Skala Ekonomi Pertanian

Tingginya beban finansial untuk pengadaan instrumen presisi kelas komersial menjadi kendala utama dalam transisi menuju pertanian cerdas masa depan. Adopsi Kerangka Kerja Pemantauan dan Pengendalian (*Monitoring and Control Framework/MCF*) yang bersifat *domain-agnostic* dan memanfaatkan perangkat sumber terbuka (*open-source*) memberikan solusi ekonomi yang sangat signifikan. Penggunaan papan mikrokontroler generik yang dikombinasikan dengan berbagai sensor komersial yang tersedia bebas di pasaran (*off-the-shelf*) terbukti mampu menekan biaya implementasi hingga 20 kali lipat lebih murah jika dibandingkan dengan solusi komersial komersial. Meskipun berbiaya rendah, kerangka kerja arsitektur ini tetap mampu menjaga kualitas perolehan data melalui penerapan algoritma pembersihan data di tingkat lapisan perangkat lunak, seperti fungsi deteksi kesalahan pembacaan sensor dan penghalusan data sebelum ditransmisikan ke peladen. Fakta ini membuktikan bahwa ekosistem pertanian cerdas dapat direplikasi dan dibangun secara mandiri oleh komunitas petani dengan biaya yang terjangkau, tanpa sedikitpun mengorbankan fungsionalitas dan keandalan operasional sistem.

5.2 Signifikansi Optimasi Energi dan Keamanan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN)

Stabilitas aliran data dari lahan pertanian fisik sangat bergantung pada keandalan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN) yang selama ini rentan terhadap keterbatasan daya baterai dan pelemahan sinyal di ruang terbuka. Penggantian protokol perutean data yang konvensional dengan fungsi keputusan multi-kriteria memberikan dampak yang luar biasa positif terhadap efisiensi kinerja jaringan. Dengan mengalkulasi variabel *Signal to Noise Ratio* (SNR), jarak transmisi ke stasiun basis, dan sisa daya energi untuk menyeleksi titik kepala klaster (*cluster head*), sistem secara otonom mampu menghindari pemilihan rute bersinyal lemah yang berpotensi memicu kerugian akibat jatuhnya paket data (*packet drop*) di udara. Di samping itu, kelemahan keamanan pada jaringan yang terekspos dapat diatasi menggunakan algoritma pembangkit kunci rahasia *linear congruential generator*. Algoritma enkripsi simetris yang sangat ringan ini terbukti mampu mengamankan transmisi identitas data dari ancaman sabotase tanpa menyedot daya komputasi perangkat, yang pada akhirnya secara efektif memangkas beban tambahan jaringan (*routing overhead*) dan memperpanjang siklus hidup baterai sensor di lapangan.

5.3 Transformasi Pengambilan Keputusan Berbasis Komputasi Tepi (Edge AI) dan Kendaraan Udara Nirawak (UAV)

Perkembangan analitik pada lingkungan agrikultur memperlihatkan adanya pergeseran eksekusi secara masif dari pemrosesan terpusat di komputasi awan menuju komputasi tepi (*Edge Computing*). Penanaman langsung algoritma Kecerdasan Buatan (AI) ke dalam perangkat keras mikrokontroler di batas terluar jaringan (*Edge AI*) memungkinkan instrumen keras untuk memproses data secara otonom dan memecahkan hambatan latensi komunikasi yang sering dijumpai akibat buruknya pita lebar (*bandwidth*) internet di pedesaan. Lompatan teknologi ini semakin disempurnakan melalui kolaborasi sistem dengan Kendaraan Udara Nirawak (UAV) yang dipersenjatai kamera multispektral. Wahana *drone* udara ini tidak hanya beroperasi pasif sebagai alat pemantau hamparan lahan, tetapi juga secara aktif mengeksekusi analisis jaringan saraf tiruan (*Deep Learning*) secara *real-time* untuk mengidentifikasi keberadaan penyakit daun dan mengklasifikasikan gulma pengganggu. Sinergi cerdas antara *Edge AI* dan mobilitas UAV ini memfasilitasi intervensi mekanis yang sangat presisi, semisal penyemprotan cairan pestisida yang hanya menyasar titik koordinat tanaman terinfeksi saja, sehingga menekan residu paparan kimia toksik terhadap kelestarian lingkungan.

5.4 Penguatan Integritas Keamanan Pangan melalui Rantai Pasok Berbasis Blockchain dan RFID

Adopsi Manajemen Rantai Pasok Produk Pertanian (APSCM) menempati peranan yang sangat sentral dalam memastikan keaslian kualitas pangan bagi pelanggan pada tahapan pasca-panen. Pemberdayaan objek pintar berbasis teknologi identifikasi gelombang radio (*Radio Frequency Identification/RFID*) beserta *Electronic Product Code* (EPC) memfasilitasi perekaman logistik dan riwayat pergerakan produk pertanian secara terperinci sejak meninggalkan lahan budidaya hingga terpajang di etalase ritel. Namun, untuk menghalau risiko dan kerentanan terhadap modifikasi pangkalan data (*database*) secara sepihak, integrasi sistem pelacakan ini dengan struktur buku besar terdesentralisasi berbasis teknologi *Blockchain* merupakan solusi yang paling mutlak. Integrasi perlindungan *Blockchain* bekerja dengan cara mengunci seluruh parameter historis rantai pasok dalam bentuk blok kriptografis, sehingga menciptakan sebuah arsitektur ekosistem logistik makanan yang transparan, mustahil dipalsukan, serta kebal terhadap serangan siber.

VI. KESIMPULAN

Secara keseluruhan, transisi menuju Pertanian Cerdas (*Smart Agriculture*) berbasis *Internet of Things* (IoT) merupakan solusi strategis yang mutlak diperlukan untuk menghadapi tantangan krisis ketahanan pangan global, degradasi lingkungan, dan anomali iklim. Kajian ini menyimpulkan bahwa implementasi arsitektur ekosistem IoT tidak lagi harus terhambat oleh tingginya harga instrumen komersial. Pemanfaatan perangkat keras dan lunak sumber terbuka (*open-source*) dalam kerangka kerja *Monitoring and Control Framework* (MCF) terbukti secara efektif mampu menekan biaya implementasi awal hingga 20 kali lipat lebih murah, sembari tetap menjamin presisi dan keandalan perolehan data di lapangan bagi para petani.

Dalam aspek transmisi data operasional, tulang punggung ekosistem ini sangat bergantung pada efisiensi dan keamanan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN). Kajian ini menegaskan bahwa penerapan algoritma fungsi keputusan multi-kriteria untuk pemilihan kepala klaster (*cluster head*)—dengan mempertimbangkan metrik sisa daya baterai, jarak transmisi, dan *Signal to Noise Ratio* (SNR)—berhasil secara signifikan menurunkan rasio kegagalan pengiriman data serta mengoptimalkan konsumsi energi. Stabilitas jaringan ini semakin kokoh dengan adanya integrasi algoritma kriptografi ringan (*linear congruential generator*) yang memproteksi transmisi data dari ancaman peretasan tanpa menyedot daya komputasi sensor secara drastis.

Selanjutnya, kemandirian sistem pertanian di masa depan sangat didorong oleh pergeseran paradigma analitik menuju komputasi tepi (*Edge AI*). Penanaman algoritma Kecerdasan Buatan secara lokal sanggup mengatasi masalah latensi akibat buruknya konektivitas internet di area pedesaan, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan secara *real-time*. Sinergi komputasi tepi ini dengan Kendaraan Udara Nirawak (UAV) yang ditenagai algoritma *Deep Learning* memfasilitasi intervensi lahan yang sangat akurat, seperti identifikasi gulma dan penyemprotan hama yang presisi, yang pada akhirnya sangat menekan dampak toksik bahan kimia terhadap kelestarian ekosistem.

Pada akhirnya, jaminan integritas dan transparansi ekosistem pertanian cerdas disempurnakan pada tahapan hilir melalui adopsi manajemen rantai pasok berbasis teknologi terdesentralisasi. Penggunaan pelabelan *Radio Frequency Identification* (RFID) dan *Electronic Product Code* (EPC) yang dikunci oleh lapisan keamanan *Blockchain* memastikan bahwa jejak logistik pangan tidak dapat dimanipulasi oleh pihak mana pun. Keterpaduan seluruh pilar ini—mulai dari arsitektur *open-source* yang ekonomis, jaringan WSN yang hemat daya dan aman, ketajaman komputasi *Edge AI* dari udara, hingga transparansi pasca-panen—berhasil memformulasikan sebuah kerangka pertanian holistik yang tangguh, cerdas, dan berkelanjutan dari hulu hingga ke tangan konsumen.

Kontribusi Penulis: [Yuris Ikrar Rabbani]: Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan Draf Awal, Penyuntingan, Supervisi. Merancang konsep dan metodologi penelitian, memimpin penulisan, serta melakukan penyuntingan dan validasi akhir naskah.

[Wildan Ramadhani]: Investigasi, Kurasi Data. Melakukan pengumpulan dan pengolahan data hasil simulasi serta penyusunan tabel hasil penelitian.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan.

Ketersediaan Data: -

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia.

Penulis Pertama: https: -

Penulis Kedua: https: -

Penulis Ketiga: -

REFERENCES

- [1] M. Ayaz, M. Ammad-Uddin, Z. Sharif, A. Mansour, and E.-H. M. Aggoune, "Internet-of-Things (IoT)-Based Smart Agriculture: Toward Making the Fields Talk," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 129551–129583, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932609.
- [2] S. Heble, A. Kumar, K. V. V. D. Prasad, S. Samirana, P. Rajalakshmi, and U. B. Desai, "A low power IoT network for smart agriculture," in *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Feb. 2018, pp. 609–614. doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355152.
- [3] M. S. Mekala and P. Viswanathan, "A novel technology for smart agriculture based on IoT with cloud computing," in *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, Feb. 2017, pp. 75–82. doi: 10.1109/I-SMAC.2017.8058280.
- [4] S. Zhang and H. Zhang, "A review of wireless sensor networks and its applications," in *2012 IEEE International Conference on Automation and Logistics*, Aug. 2012, pp. 386–389. doi: 10.1109/ICAL.2012.6308240.
- [5] K. Haseeb, I. Ud Din, A. Almogren, and N. Islam, "An Energy Efficient and Secure IoT-Based WSN Framework: An Application to Smart Agriculture," *Sensors*, vol. 20, no. 7, p. 2081, Jan. 2020, doi: 10.3390/s20072081.
- [6] A. S. Ibrahim *et al.*, "AI-IoT based smart agriculture pivot for plant diseases detection and treatment," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 16576, May 2025, doi: 10.1038/s41598-025-98454-6.
- [7] B. B. Sinha and R. Dhanalakshmi, "Recent advancements and challenges of Internet of Things in smart agriculture: A survey," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 126, pp. 169–184, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.future.2021.08.006.
- [8] F. P. E. Putra, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and A. Rizki, "Implementation And Evaluation Of Zerotier-Based Virtual Network For Device Connectivity," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 5, no. 1, pp. 281–290, Mar. 2025, doi: 10.47709/brilliance.v5i1.5966.
- [9] F. P. E. Putra, suhdi, A. Ramadhani, and Marzuq, "Integrasi Teknologi Kuantum dan fiber Optik untuk Meningkatkan Keamanan dan Efisiensi Jaringan Masa Depan," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 151–163, Jul. 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.342.
- [10] K. Patidar *et al.*, "Blockchain Based Decentralized Identity Management System for Authentication and Authorization in IoT Networks," *Informatica*, vol. 49, no. 34, Aug. 2025, doi: 10.31449/inf.v49i34.9164.
- [11] N. N. Thilakarathne, M. S. A. Bakar, P. E. Abas, and H. Yassin, "Internet of things enabled smart agriculture: Current status, latest advancements, challenges and countermeasures," *Heliyon*, vol. 11, no. 3, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e42136.
- [12] N. Bernard, Y. Sagawa Jr, N. Bier, T. Lihoreau, L. Pazart, and T. Tannou, "Using artificial intelligence for systematic review: the example of elicit," *BMC Med. Res. Methodol.*, vol. 25, no. 1, p. 75, Mar. 2025, doi: 10.1186/s12874-025-02528-y.

- [13] F. P. E. Putra, K. Mufidah, R. M. Ilhamsyah, S. A. Efendy, and S. N. R. Barokah, "Tinjauan Performa RouterOS Mikrotik dalam Jaringan Internet: Analisis Kinerja dan Kelayakan," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 903–910, 2023, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3446.
- [14] A. Jain, "Smart Agriculture Monitoring System using IoT," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 7, pp. 366–372, Jul. 2020, doi: 10.22214/ijraset.2020.7060.
- [15] F. Eka Putra, M. Mustafida, R. Alfadili, and A. Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menunjang Aplikasi Smart City," *J. Inform. Dan Teknologi Komput. JITEK*, vol. 5, pp. 84–92, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5934.
- [16] F. P. E. Putra, D. T. Agustina, T. S. K. Khotimah, and T. Ramadhanty, "Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT)," *J. Inform. Dan Teknologi Komput. JITEK*, vol. 5, no. 1, pp. 56–62, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5836.
- [17] S. Qazi, B. A. Khawaja, and Q. U. Farooq, "IoT-Equipped and AI-Enabled Next Generation Smart Agriculture: A Critical Review, Current Challenges and Future Trends," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21219–21235, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3152544.
- [18] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and I. S. Maqom, "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," *Digit. Transform. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 996–1001, 2023, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3457.
- [19] F. P. E. Putra, S. M. Dewi, Maugfiroh, and A. Hamzah, "Privasi dan Keamanan Penerapan IoT Dalam Kehidupan Sehari-Hari : Tantangan dan Implikasi," *J. Sistim Inf. Dan Teknol.*, pp. 26–32, Jul. 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i2.232.
- [20] W. Tao, L. Zhao, G. Wang, and R. Liang, "Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 189, p. 106352, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.compag.2021.106352.
- [21] E. E. K. Senoo, E. Akansah, I. Mendonça, and M. Aritsugi, "Monitoring and Control Framework for IoT, Implemented for Smart Agriculture," *Sensors*, vol. 23, no. 5, p. 2714, Jan. 2023, doi: 10.3390/s23052714.
- [22] K. A. Patil and N. R. Kale, "A model for smart agriculture using IoT," in *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, Dec. 2016, pp. 543–545. doi: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955360.
- [23] L. Safari, G. Barile, G. Ferri, and V. Stornelli, "A New Low-Voltage Low-Power Dual-Mode VCII-Based SIMO Universal Filter," *Electronics*, vol. 8, no. 7, p. 765, Jul. 2019, doi: 10.3390/electronics8070765.
- [24] D. R. J. Patil, I. Mulage, and N. Patil, "Smart Agriculture Using IoT and Machine Learning," *J. Sci. Res. Technol.*, pp. 47–59, Jun. 2023, doi: 10.5281/zenodo.8025371.
- [25] K. Agrawal, "Smart Agriculture Using IOT: A Futuristic Approach," *Int. J. Inf. Dissem. Technol.*, vol. 9, Dec. 2019, doi: 10.5958/2249-5576.2019.00036.0.
- [26] R. Brignardello-Petersen, N. Santesso, and G. H. Guyatt, "Systematic reviews of the literature: an introduction to current methods," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 194, no. 2, pp. 536–542, Feb. 2025, doi: 10.1093/aje/kwae232.
- [27] D. Srinivasan, A. Kiran, S. Parameswari, and J. Vellaichamy, "Energy efficient hierarchical clustering based dynamic data fusion algorithm for wireless sensor networks in smart agriculture," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 7207, Feb. 2025, doi: 10.1038/s41598-024-85076-7.

- [28] E. Badry, A. Shalaby, and M. S. Sayed, "Intra Mode Decision Acceleration for HEVC Screen Content Coding," in *2019 7th International Japan-Africa Conference on Electronics, Communications, and Computations, (JAC-ECC)*, Dec. 2019, pp. 92–95. doi: 10.1109/JAC-ECC48896.2019.9051167.
- [29] Z. Diao *et al.*, "Localization technologies for smart agriculture and precision farming: A review," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 236, p. 110464, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.compag.2025.110464.
- [30] S. Verma, R. Gala, S. Madhavan, S. Burkule, S. Chauhan, and C. Prakash, "An Internet of Things (IoT) Architecture for Smart Agriculture," in *2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBE)*, Aug. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICCUBE.2018.8697707.
- [31] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, "Application of Internet of Things Technology in Monitoring Water Quality in Fishponds," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 356–361, Feb. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.
- [32] F. P. E. Putra, Iksan, and N. Saadah, "Interaktif dan Personalisasi Peningkatan Pembelajaran IoT di Sekolah," *J. Sistim Inf. Dan Teknol.*, pp. 175–181, Jul. 2023, doi: 10.37034/jsisfotek.v5i2.236.
- [33] G. Sushanth and S. Sujatha, "IoT Based Smart Agriculture System," in *2018 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Mar. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/WiSPNET.2018.8538702.
- [34] S. R. Prathibha, A. Hongal, and M. P. Jyothi, "IoT Based Monitoring System in Smart Agriculture," in *2017 International Conference on Recent Advances in Electronics and Communication Technology (ICRAECT)*, Mar. 2017, pp. 81–84. doi: 10.1109/ICRAECT.2017.52.
- [35] J. Hlaváč and J. Štefanovič, "Machine Learning and Business Intelligence or from Descriptive Analytics to Predictive Analytics," in *2020 Cybernetics & Informatics (K&I)*, Jan. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/KI48306.2020.9039874.
- [36] E. Wagner, M. Serror, K. Wehrle, and M. Henze, "BP-MAC: Fast Authentication for Short Messages," in *Proceedings of the 15th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks*, May 2022, pp. 201–206. doi: 10.1145/3507657.3528554.
- [37] T. Gaber, A. El-Ghamry, and A. E. Hassanien, "Injection attack detection using machine learning for smart IoT applications," *Phys. Commun.*, vol. 52, p. 101685, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.phycom.2022.101685.
- [38] M. F. S. Yagoub, O. O. Khalifa, A. Abdelmaboud, V. Korotaev, S. A. Kozlov, and J. J. P. C. Rodrigues, "Lightweight and Efficient Dynamic Cluster Head Election Routing Protocol for Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 21, no. 15, p. 5206, Jan. 2021, doi: 10.3390/s21155206.
- [39] V. K. Quy *et al.*, "IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 7, p. 3396, Jan. 2022, doi: 10.3390/app12073396.
- [40] F. P. Eka Putra, A. Baidawi, A. A. Mubarak, and Frediyanto, "Merancang Jaringan Sensor Nirkabel dan IoT untuk Kota Pintar Pamekasan," *J. Inf. Dan Teknol.*, pp. 138–145, Jul. 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.331.
- [41] Z. A. Abduljabbar *et al.*, "Elliptic Curve Cryptography-Based Scheme for Secure Signaling and Data Exchanges in Precision Agriculture," *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10264, Jan. 2023, doi: 10.3390/su151310264.
- [42] R. E. Navas, M. Lagos, L. Toutain, and K. Vijayasankar, "Nonce-based authenticated key establishment over OAuth 2.0 IoT proof-of-possession architecture," in *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Dec. 2016, pp. 317–322. doi: 10.1109/WF-IoT.2016.7845424.

- [43] S. Khan, P. A. Ferreira Lopes martins, B. Sousa, and V. Pereira, “A Comprehensive Review on Lightweight Cryptographic Mechanisms for Industrial Internet of Things Systems,” *ACM Comput Surv*, vol. 58, no. 1, p. 23:1-23:37, Sep. 2025, doi: 10.1145/3757734.
- [44] U. Tariq, I. Ahmed, A. K. Bashir, and K. Shaukat, “A Critical Cybersecurity Analysis and Future Research Directions for the Internet of Things: A Comprehensive Review,” *Sensors*, vol. 23, no. 8, p. 4117, Apr. 2023, doi: 10.3390/s23084117.
- [45] Y. Bai, Z. Liao, J. Shang, W. Gan, X. Kong, and X. Wei, “A review on real-time plant monitoring sensors for smart agriculture,” *Chem. Eng. J.*, vol. 523, p. 168868, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.168868.
- [46] J. Li, A. Sun, J. Han, and C. Li, “A Survey on Deep Learning for Named Entity Recognition,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 34, no. 1, pp. 50–70, Jan. 2022, doi: 10.1109/TKDE.2020.2981314.
- [47] E. Pateromichelakis, D. Dimopoulos, and A. Salkintzis, “NetApps Enabling Application-Layer Analytics for Vertical IoT Industry,” *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 130–135, Dec. 2022, doi: 10.1109/IOTM.001.2200212.
- [48] J. Zhang *et al.*, “When LLMs meet cybersecurity: a systematic literature review,” *Cybersecurity*, vol. 8, no. 1, p. 55, Feb. 2025, doi: 10.1186/s42400-025-00361-w.
- [49] P. De Corte, M. Klinghardt, S. von Stockum, and K. Heinemann, “Time to Diagnose Endometriosis: Current Status, Challenges and Regional Characteristics—A Systematic Literature Review,” *BJOG Int. J. Obstet. Gynaecol.*, vol. 132, no. 2, pp. 118–130, 2025, doi: 10.1111/1471-0528.17973.
- [50] G. Biagini, “Towards an AI-Literate Future: A Systematic Literature Review Exploring Education, Ethics, and Applications,” *Int. J. Artif. Intell. Educ.*, vol. 35, no. 4, pp. 2616–2666, Dec. 2025, doi: 10.1007/s40593-025-00466-w.

Publisher’s Note: Publisher stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.