

Arsitektur Sistem *Internet of Things* (IoT) pada Irigasi Tetes Cerdas Tanaman Melon

Habiburrahman^{1)*} , Abdul Halim²⁾ 

¹⁾²⁾ Teknik, Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ habibrahman1776@gmail.com, ²⁾ kikybagaskara@gmail.com

Abstrak

Penerapan Internet of Things (IoT) dalam pertanian presisi pada budidaya melon saat ini masih menemui kendala berupa rendahnya efisiensi jaringan dan tingginya latensi proses aktuasi, yang sebagian besar disebabkan oleh ketergantungan sistem terhadap komputasi awan (cloud-centric). Penelitian ini bertujuan merancang sebuah arsitektur sistem IoT empat lapisan untuk irigasi tetes pintar yang bersifat terdistribusi, dengan kalibrasi yang disesuaikan terhadap karakteristik agronomis spesifik tanaman melon. Pendekatan yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan mengadopsi protokol PRISMA sebagai acuan standar. Proses sintesis data dilakukan melalui perbandingan terhadap 23 sumber literatur terbaru (2023–2025) yang membahas arsitektur irigasi berbasis IoT. Temuan penelitian menunjukkan bahwa arsitektur irigasi yang bertumpu pada cloud memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap kegagalan sistem, terutama bila diterapkan pada lahan pertanian dengan kondisi marjinal. Untuk mengatasi hal tersebut, penelitian ini mengusulkan sebuah arsitektur baru yang menggabungkan Edge Computing pada lapisan Middleware dengan menggunakan protokol komunikasi ringan MQTT. Dengan memindahkan proses pengambilan keputusan ke tingkat lokal, sistem ini mampu menghasilkan respons aktuasi yang nyaris tanpa latensi (zero-latency). Di samping itu, algoritma irigasi dirancang secara khusus agar selaras dengan fase pertumbuhan vegetatif dan fase pematangan buah melon, guna mengatur tingkat stres air secara terkendali sebagai upaya meningkatkan kadar kemanisan (Brix) buah. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah tersusunnya cetak biru arsitektur IoT berbasis Local-Intelligence yang tahan terhadap gangguan konektivitas, efisien dalam penggunaannya, serta relevan untuk diterapkan dalam praktik hortikultura.

Keywords: Arsitektur IoT, Irigasi Tetes Cerdas, Komputasi Tepi, Tanaman Melon, Tinjauan Literatur Sistematis.

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

I. PENDAHULUAN

Industri pertanian di seluruh dunia saat ini menghadapi dua masalah mendesak: perubahan iklim yang parah yang mengancam sumber daya air tawar dan kebutuhan untuk meningkatkan produksi tanaman di lahan yang terbatas. Laporan terbaru dari Organisasi Pangan dan Pertanian PBB (FAO) pada tahun 2023 menyoroti perlunya transformasi sistem agrifood menjadi model yang lebih efisien untuk pemanfaatan sumber daya, mengingat sektor ini terus mendominasi konsumsi air global secara substansial [1][2][3]. Dalam menghadapi krisis ini, model Pertanian Presisi berbasis IoT tidak lagi dianggap sebagai teknologi masa depan, tetapi sebagai norma operasional yang ada. Kombinasi jaringan sensor nirkabel (WSN), komputasi awan, dan komputasi tepi memungkinkan pemantauan iklim pertanian secara real-time, sehingga memungkinkan pengelolaan irigasi dengan prediktabilitas dan presisi yang lebih baik[4], [5]. [6]

Dalam sektor hortikultura Indonesia, melon (*Cucumis melo* L.) merupakan komoditas bernilai ekonomi tinggi yang sangat peka terhadap pengelolaan air dalam proses budidayanya[7], [8]. Tanaman ini sangat sensitif: terlalu banyak air menyebabkan hipoksia zona akar dan pertumbuhan patogen[9], sedangkan defisit air selama tahap vegetatif akhir dan generatif sangat mengurangi indeks kemanisan (Brix) dan menghambat perkembangan buah[10], [11], [12]. Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2024 menunjukkan bahwa produksi buah musiman seperti melon terus mengalami fluktuasi yang sering terjadi, dengan salah satu faktor kuncinya adalah perubahan cuaca yang membuat irigasi konvensional yang mengandalkan jadwal manual menjadi tidak efektif [13]. Oleh karena itu, transisi ke sistem irigasi tetes pintar yang dapat secara otomatis beradaptasi dengan variasi kelembaban tanah dan cuaca lokal merupakan langkah penting untuk menstabilkan produksi tanaman[14], [15].

Meskipun penelitian ekstensif tentang implementasi IoT dalam sistem irigasi, arsitektur yang digunakan seringkali menghadirkan banyak kendala struktural. Penelitian terbaru pada tahun 2023, yang diteliti oleh para ilmuwan yang

*Habiburrahman

berfokus pada optimasi IoT pertanian, masih sangat bergantung pada sistem berbasis cloud yang memerlukan transfer data konstan ke server pusat[16], [17]. Metode ini dapat menghadapi masalah seperti peningkatan latensi, penggunaan bandwidth yang tidak efisien, dan konsumsi energi yang tinggi kondisi yang tidak ideal untuk pertanian di daerah terpencil dengan infrastruktur jaringan yang tidak andal[18], [19]. Sebaliknya, beberapa upaya penelitian telah mulai mentransfer kebutuhan komputasi ke tingkat edge (lokal) dengan menerapkan protokol hemat energi seperti LoRaWAN [20], namun kerangka arsitektur ini masih bersifat umum dan belum dikombinasikan dengan algoritma operasi irigasi tetes yang disesuaikan secara tepat dengan kebutuhan air tanaman melon[21], [22]. Kesenjangan penelitian ini terus diabaikan: perlunya pembuatan kerangka kerja IoT yang terdistribusi, hemat energi, dan adaptif secara lokal, yang berfokus pada kebutuhan irigasi melon[23].

Dengan mempertimbangkan keterbatasan literatur yang ada dan tuntutan di lapangan, penelitian ini bertujuan untuk menciptakan dan menilai "Arsitektur Sistem Internet of Things (IoT) pada Irigasi Tetes Cerdas untuk Tanaman Melon." Arsitektur sistem ini terstruktur dalam beberapa tingkatan yang menekankan pengumpulan data yang efisien pada lapisan persepsi dan pelaksanaan tindakan yang akurat secara lokal, bertujuan untuk mengatasi tantangan latensi dan konektivitas[24]. Temuan penelitian ini bertujuan untuk menawarkan kerangka kerja bagi arsitektur IoT khusus yang akan meningkatkan literatur yang ada tentang rekayasa sistem pertanian cerdas[25] dan memberikan model praktis bagi petani lokal untuk mencapai penggunaan air yang efisien dan berkelanjutan dalam produksi hortikultura[26].

II. TINJAUAN PUSTAKA

Pengembangan **Arsitektur Sistem Internet of Things (IoT) pada Irigasi Tetes Cerdas Tanaman Melon** membutuhkan integrasi dari berbagai disiplin ilmu[27]. Oleh karena itu, bab ini akan menguraikan secara komprehensif landasan teori yang mendasari setiap variabel dalam judul tersebut. Kajian diawali dengan analisis kebutuhan air spesifik pada budidaya melon, yang kemudian direspons melalui konsep aktuasi irigasi tetes cerdas. Pemodelan arsitektur sistem IoT mutakhir kemudian dikaji untuk menentukan infrastruktur jaringan yang paling optimal. Untuk menyempurnakan rancangan tersebut, analisis komparatif terhadap penelitian terdahulu (state-of-the-art) turut disertakan guna memetakan batasan sistem yang ada saat ini dan merumuskan celah penelitian (research gap) yang akan diselesaikan.

A. Konsep dan Arsitektur IoT pada Precision Agriculture

Dalam konsep pertanian presisi, *Internet of Things* (IoT) merujuk pada ekosistem perangkat fisik bersensor, perangkat lunak, dan modul komunikasi yang saling terhubung untuk membagikan data secara *real-time* demi peningkatan efisiensi operasional pertanian. Untuk memastikan keandalannya, arsitektur sistem IoT ini umumnya diklasifikasikan ke dalam empat lapisan fungsional [28]:

1. **Perception Layer:** Merupakan lini depan perangkat keras yang berfungsi merekam data kondisi lahan secara real-time melalui pemanfaatan berbagai *node* sensor nirkabel.
2. **Network Layer:** Bertanggung jawab sebagai jalur pengiriman data dari sensor menuju sistem pemroses sentral dengan menggunakan teknologi komunikasi seperti Wi-Fi, jaringan seluler, atau LoRaWAN. Keandalan lapisan ini sangat ditentukan oleh kualitas jaringan komunikasi yang digunakan; penerapan teknologi jaringan generasi kelima (5G) misalnya telah dibuktikan dapat meningkatkan kestabilan konektivitas IoT meskipun jumlah perangkat yang terhubung meningkat secara signifikan[29]. Selain itu, topologi jaringan berbasis *mesh* juga menjadi alternatif yang relevan untuk memperluas jangkauan komunikasi antar-node sensor di lahan pertanian yang luas tanpa mengandalkan infrastruktur seluler terpusat[30]. Selain ketiga opsi tersebut, protokol nirkabel berdaya rendah seperti ZigBee juga telah dibuktikan efektif dalam mendukung komunikasi multi-node pada lingkup area yang luas, seperti penerapannya pada perancangan jaringan sensor nirkabel skala kampus yang menghubungkan berbagai titik pemantauan secara simultan [31], sehingga menjadi alternatif protokol yang layak dipertimbangkan untuk distribusi node sensor pada lahan pertanian yang tersebar.
3. **Middleware Layer:** Berperan sebagai penengah yang menyaring, memproses, dan mengatur aliran data. Pada sistem yang lebih modern, *edge computing* sering kali diintegrasikan pada tingkat ini guna memungkinkan eksekusi perintah secara lokal dan instan, tanpa harus menunda respons dari server *cloud* [32].

4. **Application Layer:** Lapisan puncak yang menyediakan antarmuka bagi pengguna (*dashboard*) dan pusat analitik berbasis *cloud*. Fungsinya mencakup penyajian visualisasi data, penyimpanan arsip riwayat, serta menjalankan algoritma untuk sistem pendukung keputusan.

B. Irigasi Tetes Cerdas (*Smart Drip Irrigation*)

Sistem irigasi tetes adalah metode pengairan akurat yang menyalurkan air dan nutrisi secara perlahan langsung ke area perakaran tanaman melalui jaringan pemancarnya. Sistem ini mengurangi evaporasi dan limpasan, sehingga mencapai efisiensi penggunaan air (WUE) yang sangat optimal[33]. Peralihan menuju "sistem cerdas" terjadi saat infrastruktur fisik irigasi tetes terhubung dengan teknologi IoT. Sistem cerdas kini tidak bergantung pada jadwal penyiraman tetap, tetapi menerapkan logika kontrol yang didasarkan pada parameter nyata tanah (seperti kelembapan lahan dan temperatur) untuk secara otomatis dan tepat memicu pembukaan serta penutupan aliran air[34].

C. Agronomi Tanaman Melon

Tanaman melon (*Cucumis melo* L.) dikenal sebagai buah yang sangat rentan terhadap fluktuasi agroklimat dan tingkat kelembapan tanah. Siklus perkembangannya terbagi ke dalam empat fase utama: vegetatif, pembungaan, pembentukan buah, dan pematangan. Untuk mencapai pertumbuhan yang optimal, lingkungan tanam harus dijaga pada kisaran suhu 25–30°C dengan tingkat kelembapan udara (RH) 60–80%. Kebutuhan air melon sangat spesifik bergantung pada fase pertumbuhannya; pada masa awal, kelembapan tanah wajib dijaga agar selalu stabil. Memasuki fase pembungaan, fluktuasi air yang drastis harus dihindari karena dapat memicu kerontokan bunga[35]. Di sisi lain, penerapan stres air yang diatur secara presisi (defisit air terkendali) menjelang masa panen justru direkomendasikan. Manipulasi ini terbukti mampu mencegah kerusakan fisik buah sekaligus mendongkrak akumulasi padatan terlarut total, yang secara langsung meningkatkan kadar kemanisan (Brix) pada melon[36].

D. Komponen Sistem Cerdas

Infrastruktur IoT untuk irigasi cerdas ditopang oleh kolaborasi komponen perangkat keras dan lunak berikut;

- **Mikrokontroler:** Bertindak sebagai otak pengolah lokal. Mikrokontroler terbaru seperti ESP32 sangat cocok karena dilengkapi dengan prosesor dual-core, efisiensi daya yang tinggi, serta modul Wi-Fi dan Bluetooth terintegrasi[37].
- **Sensor Kelembapan Tanah:** Digunakan untuk mengukur tingkat kelembapan volumetrik dalam tanah. Sensor jenis kapasitif (capacitive soil moisture sensor) lebih disarankan karena lebih tahan terhadap korosi dibandingkan sensor resistif[38].
- **Aktuator:** Terdiri dari modul relay mekanik, pompa air, dan katup solenoid yang berfungsi sebagai pelaksana fisik untuk mengalirkan atau menghentikan aliran air ke sistem irigasi tetes[39].
- **Platform Cloud dan MQTT:** Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) merupakan protokol komunikasi pesan yang ringan dan sangat efektif untuk perangkat IoT dengan kapasitas bandwidth terbatas. Data yang dikirim menggunakan MQTT selanjutnya divisualisasikan melalui platform cloud (seperti: ThingsBoard, Ubidots, atau Blynk) untuk pemantauan dari jarak jauh[40]. Data yang dikirim menggunakan MQTT selanjutnya divisualisasikan melalui platform cloud (seperti: ThingsBoard, Ubidots, atau Blynk) untuk pemantauan dari jarak jauh. Pendekatan integrasi mikrokontroler dengan platform visualisasi *cloud* semacam ini telah diterapkan pula pada sistem pemantauan lingkungan berbasis IoT, yang menunjukkan bahwa kombinasi ESP32 dengan *dashboard cloud* mampu menyajikan data multi-parameter secara *real-time* dengan latensi yang rendah[41]. Data historis yang terkumpul dari waktu ke waktu ini juga berpotensi dianalisis lebih lanjut menggunakan pendekatan analisis big data dengan metode *time series*, yang telah dibuktikan efektif dalam mengidentifikasi pola penggunaan jaringan, memprediksi kebutuhan kapasitas, serta mendeteksi anomali pada lalu lintas data secara dini[42], sehingga membuka peluang pengembangan sistem prediktif pada arsitektur irigasi cerdas di masa mendatang.

E. State-of-the-Art dan Research Gap

Beberapa studi terbaru telah menerapkan IoT di dalam otomatisasi irigasi. Ahmed et al. merancang sistem irigasi berbasis cloud yang murni, yang terbukti efisien meskipun terdapat kelemahan seperti tingginya tingkat latensi dan ketergantungan mutlak pada kestabilan internet; aktuator tidak merespons jika koneksi dengan server terputus[43]. Di sisi lain, studi oleh Sharma dan Singh (2024)[44] menawarkan arsitektur jaringan yang berfokus pada komputasi tepi (edge) untuk mengurangi latensi, meskipun algoritma kendali yang diterapkan menggunakan ambang batas tunggal statis (single static threshold) yang dirancang secara umum (generic). Pola serupa juga ditemukan pada penerapan IoT untuk pemantauan kualitas air kolam budidaya ikan, di mana sistem sensor multi-parameter mampu memantau kondisi

lingkungan secara *real-time*, namun keputusan aktuasi tetap memerlukan ambang batas yang disesuaikan secara manual untuk setiap kondisi spesifik[45], sehingga menegaskan perlunya logika kendali yang lebih adaptif terhadap karakteristik objek yang dipantau.

Sistem umum itu tidak mampu menyesuaikan dengan dinamika perubahan kebutuhan air pada tanaman hortikultura tertentu. Dari analisis tersebut, ditemukan celah dalam penelitian, yaitu tidak adanya desain arsitektur IoT 4 lapisan yang mengintegrasikan keandalan protokol MQTT pada jaringan lokal dengan logika aktuasi dinamis yang dikendalikan khusus sesuai fase agonomis tanaman melon[46]. Kebaruan dalam penelitian yang diusulkan di naskah ini terletak pada penggabungan antara topologi IoT low-cost (berbasis ESP32) dengan logika irigasi yang khusus untuk komoditas[47], sehingga dapat menjamin bahwa tanaman melon terhindar dari stres air yang merugikan, serta mengoptimalkan pemenuhan kadar Brix saat waktu panen[48].

III. METODE

Penelitian ini menerapkan metodologi kualitatif-deskriptif melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Pemilihan metode ini dilandasi oleh urgensi perancangan arsitektur teknologi yang valid sebelum diimplementasikan ke lapangan. Dengan melakukan bedah, evaluasi, dan sintesis terhadap berbagai praktik terbaik (*best practices*) dari arsitektur IoT yang ada, penelitian ini bertujuan untuk memetakan keterbatasan sistem terdahulu secara objektif. Melalui tinjauan sistematis ini, usulan "Arsitektur Sistem IoT pada Irigasi Tetes Cerdas Tanaman Melon" diharapkan memiliki dasar ilmiah yang kuat, kebaruan (*novelty*) yang teruji, serta relevansi yang tepat sasaran.

A. Sumber dan Teknik Pengumpulan Data

Dalam penelitian jenis SLR ini, metode pengumpulan data tidak melalui observasi lapangan, wawancara, atau kuesioner, melainkan sepenuhnya menggunakan teknik studi pustaka (literatur) dan dokumentasi. Peneliti mengumpulkan, merekam, dan mengekstrak informasi secara digital dari berbagai sumber ilmiah yang dipublikasikan dalam basis data akademik yang dapat dipercaya, seperti IEEE Xplore, ScienceDirect, Scopus, dan Google Scholar. Pendekatan tinjauan pustaka sistematis (*Systematic Literature Review*) semacam ini sejalan dengan metodologi yang digunakan dalam kajian isu keamanan sistem IoT pada *smart home* dan industri, yang juga mensintesis temuan dari jurnal, laporan teknis, dan publikasi akademik untuk merumuskan kesimpulan yang objektif dan dapat dipertanggungjawabkan[49].

Data yang digunakan dalam penelitian ini diklasifikasikan ke dalam dua sumber utama:

1. **Data Primer:** Data primer dalam penelitian SLR ini terdiri dari artikel jurnal ilmiah bereputasi dan prosiding konferensi yang menyajikan temuan eksperimental terkait otomatisasi irigasi cerdas, jaringan sensor nirkabel, dan arsitektur IoT. Kriteria inklusi ini dibatasi pada publikasi yang terbit dalam rentang waktu Tiga tahun terakhir, yakni 2023 hingga 2026.
2. **Data Sekunder:** Komponen data sekunder dalam penelitian ini mencakup laporan teknis dari instansi resmi (seperti data BPS atau FAO), literatur buku, serta artikel tinjauan (*review articles*). Materi tersebut memuat informasi komprehensif terkait karakteristik agonomis tanaman melon, spesifikasi protokol komunikasi nirkabel, hingga mekanisme kerja aktuator irigasi tetes. Integrasi data ini bertujuan untuk memperjelas konteks permasalahan serta memperkuat landasan teoretis bagi perancangan arsitektur sistem yang diusulkan.

B. Prosedur Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini mengikuti pedoman standar PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Prosedur penelitian dilakukan secara sistematis melalui tiga tahap utama: Tahap Perencanaan, Tahap Pelaksanaan, dan Tahap Analisis Data:

1. Tahap Perencanaan (*Planning*)

Fase ini bertujuan untuk menentukan arah dan batasan pencarian literatur. Langkah-langkah yang dilakukan meliputi:

- **Perumusan Pertanyaan Penelitian (*Research Questions / RQ*):** Menentukan inti kajian, yaitu: (RQ1) Apa topologi arsitektur IoT terdistribusi yang paling efisien untuk irigasi presisi? (RQ2) Protokol komunikasi dan perangkat keras mana yang paling efektif dalam mengurangi latensi? (RQ3) Bagaimana cara menyesuaikan algoritma pengairan dengan fase pertumbuhan tanaman melon?
- **Penetapan Kata Kunci (*Search String*):** Merancang rumus pencarian dengan menggunakan operator Boolean untuk diterapkan pada mesin pencari basis data. Kata kunci yang ditentukan

adalah: ("Internet of Things" ATAU "IoT") DAN ("Irigasi Tetes" ATAU "Pertanian Presisi") DAN ("Arsitektur" ATAU "Komputasi Edge") DAN ("Melon" ATAU "Hortikultura").

2. Tahap Pelaksanaan (*Execution / Data Collection*)

Fase ini adalah proses penyaringan literatur yang dilakukan dalam tiga sub-tahapan alur PRISMA:

- A. Identifikasi: Melaksanakan eksekusi pencarian di dalam basis data dengan menggunakan kata kunci yang telah ditentukan. Data hasil pencarian awal dikumpulkan, kemudian proses penghapusan duplikat dilakukan menggunakan perangkat lunak pengelolaan referensi (seperti Mendeley atau Zotero).
- B. Penyaringan (Screening): Memilih literatur berdasarkan judul dan abstrak dengan menggunakan Kriteria Inklusi (KI) dan Kriteria Eksklusi (KE). Kriteria inklusi mencakup artikel yang diterbitkan antara 2023-2026 yang secara khusus membahas arsitektur/topologi IoT dalam bidang pertanian. Artikel yang terdiri dari opini, survei murni tanpa desain, atau tidak memakai bahasa Inggris/Indonesia akan dikecualikan.
- C. **Uji Kelayakan (*Eligibility*)**: Mengambil dan memeriksa teks lengkap (full-text) dari literatur yang telah melewati tahap seleksi untuk memastikan adanya data teknis yang dapat menjawab Pertanyaan Penelitian (RQ).

3. Tahap Analisis Data (*Data Analysis & Synthesis*)

Literatur akhir yang dianggap memenuhi syarat kemudian dianalisis dengan metode analisis perbandingan dan sintesis tematik. Proses ini mencakup:

- A. Ekstraksi Data: Mencatat hasil teknis dari setiap literatur ke dalam matriks sintesis. Parameter yang diambil meliputi lapisan arsitektur (Perception, Network, Edge/Middleware, Application), tipe mikrokontroler, protokol jaringan (seperti MQTT, LoRa), dan algoritma untuk pengambilan keputusan.
- B. Sintesis Kritis: Menganalisis keunggulan (seperti efisiensi energi atau latensi minimal) dan kekurangan (seperti ketergantungan pada cloud atau logika tetap) dari masing-masing arsitektur yang diteliti.
- C. Formulasi Arsitektur: Mengubah hasil sintesis menjadi suatu desain konseptual yang inovatif. Penggabungan praktik terbaik dari literatur dengan kebutuhan spesifik tanaman melon menghasilkan usulan cetak biru teknis "Arsitektur Sistem IoT pada Irigasi Tetes Cerdas Tanaman Melon," yang menjadi hasil utama dan kontribusi inovatif penelitian ini.

IV. HASIL

A. Pemetaan dan Klasifikasi Ekstraksi Literatur

Berdasarkan proses *Systematic Literature Review* (SLR), terpilih sebanyak 23 artikel utama yang dipublikasikan pada periode 2023–2025. Untuk mendukung analisis yang lebih terstruktur serta mengidentifikasi peluang penelitian lanjutan, artikel-artikel tersebut dikelompokkan ke dalam tiga kategori, yaitu: (A) penelitian yang berfokus pada budidaya melon, (B) penelitian mengenai arsitektur sistem irigasi cerdas berbasis Internet of Things (IoT), dan (C) penelitian pada komoditas buah lain yang digunakan sebagai studi pembandingan.

Hasil pemetaan dan ekstraksi variabel teknis dari seluruh literatur tersebut dirangkum secara komprehensif pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Klasifikasi dan Sintesis Data Literatur Irigasi Cerdas Berbasis IoT

Kategori Analisis	Peneliti (Tahun)	Komoditas Fokus	Arsitektur / Teknologi Utama	Identifikasi Keterbatasan / Celah Penelitian
(A) Spesifik Melon	Thongleam et al. (2024)	Melon	Irigasi tetes otomatis konvensional	Logika kontrol belum terintegrasi ke dalam arsitektur jaringan IoT modern.
	Apriyani et al. (2025)	Melon	<i>IoT Cloud Monitoring (Greenhouse)</i>	Fokus sebatas pemantauan pasif; belum memiliki fitur aktuasi otomatis.
(B) Arsitektur & Irigasi IoT (Umum)	Pereira et al. (2023)	Umum	Mikrokontroler ESP32, Protokol MQTT, <i>Web-based</i>	Skalabilitas terbatas untuk lahan luas; sangat bergantung pada konektivitas internet terpusat.
	Jain (2023)			
	Abioye et al. (2023)	Umum	<i>Predictive/Composite Control, Integrasi IoT & Machine Learning</i>	Pemrosesan komputasi sangat berat (<i>Cloud-centric</i>); tidak efisien untuk <i>node</i> berdaya rendah.
	Li et al. (2023)			
	Kaur et al. (2024)			
	E G & Bala (2024)			
	Benzaouia et al. (2023)	Umum	IoT terintegrasi <i>Fuzzy Logic, Cloud Smart Irrigation</i>	Rentan terhadap latensi tinggi jika terjadi fluktuasi sinyal internet di area marginal.
	Morchid et al. (2024)			
	Gupta et al. (2025)			
	Manocha et al. (2024)	Umum	<i>Digital Twin, Pertanian Presisi (Agriculture 4.0)</i>	Biaya infrastruktur implementasi tinggi; kurang aplikatif untuk petani kelas menengah ke bawah.
	Saha et al. (2025)			
	Choudhary et al. (2025)			
	Mane et al. (2024)			

	Studi <i>Fault Tree Analysis</i> (2024) Thilakarathne et al. (2023)	Umum	Analisis Kegagalan Sistem, Manajemen Tanaman Berbasis <i>Cloud</i>	Mengonfirmasi risiko <i>Single Point of Failure</i> akibat ketergantungan absolut pada server <i>cloud</i> .
(C) Pembanding: Komoditas Buah Lain	Ali et al. (2025) Fuentes-Peñailillo et al. (2023)	Jeruk, Anggur	<i>Fuzzy Logic</i> , <i>Water Stress Index</i> berbasis IoT	Kalibrasi algoritma hanya valid untuk buah berkayu/non-klimaterik; tidak sesuai fisiologi melon.
	Adamo et al. (2025) Bao et al. (2023)	Stroberi, Semangka	Arsitektur <i>Micro-services</i> , Fertigasi Tetes IoT	Terjadi beban jaringan (<i>overhead</i>) akibat komunikasi data lokal yang terlalu padat.
	Hasan et al. (2025) Studi Prototipe (2025)	Mentimun, Tomat	Prototipe IoT, Fertigasi Hidroponik	Belum mengoptimalkan komputasi tepi (<i>Edge Computing</i>) untuk mengatasi latensi aktuasi pengairan.

B. Sintesis Temuan Keterbatasan dan Tren Teknologi

- Kekosongan otomasi presisi pada komoditas melon

Temuan pada Kategori A mengindikasikan bahwa sebagian besar implementasi IoT pada budidaya melon masih terbatas pada fungsi monitoring. Sistem yang dikembangkan umumnya hanya menyediakan informasi kondisi kelembapan tanah dan lingkungan secara real-time tanpa disertai mekanisme pengambilan keputusan maupun pengendalian irigasi secara otomatis. Akibatnya, efisiensi pengairan masih sangat bergantung pada intervensi manusia. Ketiadaan sistem yang mengintegrasikan sensor, algoritma pengambilan keputusan, dan aktuatur irigasi yang disesuaikan dengan kebutuhan agronomis tanaman melon menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang penting untuk dikaji lebih lanjut.

- Kerentanan Arsitektur *Cloud-Centric* pada Irigasi Umum

Analisis pada Kategori B menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan penggunaan metode *Machine Learning* dan komputasi berbasis *cloud* dalam pengembangan sistem irigasi cerdas. Pendekatan tersebut menawarkan kemampuan analisis data yang lebih kompleks, namun juga menghadirkan beberapa tantangan, terutama terkait latensi komunikasi dan ketergantungan terhadap ketersediaan jaringan internet. Pada wilayah pedesaan yang memiliki kualitas konektivitas yang beragam, gangguan jaringan berpotensi menghambat proses pengiriman data maupun pengendalian aktuatur secara real-time. Di sisi lain, berbagai penelitian melaporkan bahwa pemanfaatan mikrokontroler ESP32 yang dipadukan dengan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) mampu meningkatkan efisiensi penggunaan bandwidth dan konsumsi daya. Temuan ini menunjukkan bahwa kombinasi ESP32 dan MQTT merupakan alternatif yang relevan untuk mendukung implementasi sistem irigasi cerdas yang lebih efisien dan andal.

- Urgensi Logika Irigasi Spesifik-Komoditas

Analisis pada Kategori C menunjukkan bahwa setiap komoditas hortikultura memiliki karakteristik kebutuhan air yang berbeda, sehingga algoritma pengairan yang diterapkan pada tanaman stroberi, anggur, maupun tomat tidak dapat diadopsi secara langsung pada budidaya melon. Perbedaan respons tanaman terhadap kondisi ketersediaan air mengindikasikan bahwa pengembangan sistem irigasi cerdas perlu mempertimbangkan karakteristik fisiologis dan agronomis masing-masing komoditas. Oleh karena itu, penentuan ambang batas pengairan harus disesuaikan dengan kebutuhan spesifik tanaman melon, termasuk tahapan pertumbuhan dan

karakteristik genetiknya. Pendekatan tersebut penting untuk menjaga produktivitas tanaman serta mempertahankan kualitas hasil panen, seperti pembentukan bunga yang optimal dan tingkat kemanisan buah yang diukur melalui nilai °Brix.

- Formulasi Arsitektur Sistem yang Diusulkan

Berdasarkan hasil ekstraksi dan analisis literatur yang disajikan pada Tabel 1, ditemukan tiga temuan utama, yaitu masih terbatasnya implementasi aktuasi otomatis pada sistem IoT untuk budidaya melon, tingginya ketergantungan arsitektur berbasis *cloud* terhadap ketersediaan jaringan internet, serta kebutuhan akan algoritma pengairan yang disesuaikan dengan karakteristik tanaman. Berlandaskan temuan tersebut, penelitian ini mengusulkan rancangan arsitektur sistem yang terdiri atas empat lapisan (*four-layer architecture*). Kebaruan yang ditawarkan terletak pada penerapan mekanisme pengambilan keputusan pada *Edge Layer*, sehingga proses kontrol dan aktuasi dapat dilakukan lebih dekat dengan sumber data tanpa bergantung sepenuhnya pada layanan *cloud*.

Pada arsitektur yang diusulkan, mikrokontroler ESP32 yang ditempatkan di lahan bertugas memproses data sensor kelembapan tanah dan mengevaluasinya berdasarkan ambang batas yang telah disesuaikan dengan fase pertumbuhan tanaman melon. Dengan pendekatan ini, pengendalian *solenoid valve* pada sistem irigasi tetes dapat dilakukan secara langsung tanpa bergantung pada instruksi dari server *cloud*. Sementara itu, protokol MQTT tetap digunakan untuk mendukung komunikasi data menuju dasbor pemantauan secara efisien dengan penggunaan sumber daya jaringan yang minimal.

V. PEMBAHASAN

Hasil telaah terhadap berbagai literatur terkini menunjukkan bahwa penerapan teknologi irigasi presisi pada budidaya melon masih menghadapi berbagai kendala. Pengembangan pertanian cerdas selama ini cenderung berorientasi pada pemanfaatan platform berbasis *cloud*, sementara aspek keandalan infrastruktur lokal dan kebutuhan biologis tanaman belum mendapat perhatian yang memadai. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diusulkan Arsitektur Sistem IoT Empat Lapis yang terintegrasi dengan Edge Computing sebagai solusi teknis yang mampu menjembatani kebutuhan teknologi informasi dengan kondisi nyata infrastruktur pada lahan pertanian marjinal.

a. Dekonstruksi Arsitektur *Cloud-Centric* Menuju *Edge Computing*

Salah satu temuan penting dari hasil analisis literatur adalah tingginya risiko kegagalan sistem pada arsitektur irigasi yang sepenuhnya bergantung pada layanan *cloud*. Pada model ini, seluruh proses pengambilan keputusan dilakukan oleh server jarak jauh. Akibatnya, ketika terjadi keterlambatan transmisi data (latensi) atau gangguan koneksi internet, yang umum terjadi di wilayah pertanian pedesaan, perintah untuk mengendalikan katup irigasi tidak dapat diteruskan ke mikrokontroler sehingga berpotensi mengganggu proses penyiraman tanaman.

Arsitektur yang diusulkan melakukan perubahan pada topologi sistem dengan menambahkan lapisan Edge/Middleware di area lahan menggunakan mikrokontroler ESP32. Perpindahan proses pengambilan keputusan dari *cloud* ke *edge* memberikan keuntungan berupa respons sistem yang lebih cepat dengan latensi yang sangat rendah. Dari perspektif rekayasa sistem, pendekatan ini juga mampu mengurangi risiko kegagalan akibat ketergantungan pada satu titik layanan (*single point of failure*). Pada arsitektur ini, platform *cloud* tetap digunakan, namun hanya berfungsi sebagai media penyimpanan data historis dan visualisasi dashboard. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan komputasi terdesentralisasi menjadi faktor penting dalam meningkatkan keandalan sistem IoT pada sektor pertanian.

b. Integrasi Fisiologi Tanaman ke dalam Logika Mesin

Kajian terhadap penerapan IoT pada berbagai komoditas hortikultura, seperti stroberi, jeruk, dan anggur, menunjukkan bahwa algoritma pengendalian irigasi tidak dapat diterapkan secara seragam pada semua jenis tanaman. Konsep pertanian presisi menuntut penyesuaian sistem berdasarkan karakteristik biologis masing-masing tanaman. Pada tanaman melon, kondisi kelembapan tanah harus dikendalikan secara cermat karena tanaman ini memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan kadar air. Pemberian air yang berlebihan dapat menyebabkan gangguan pada sistem perakaran, sedangkan kekurangan air pada fase vegetatif berpotensi menghambat pertumbuhan dan perkembangan tanaman.

Kebaruan dari arsitektur yang diusulkan terletak pada penerapan logika ambang batas dinamis (*dynamic threshold logic*) pada lapisan *Edge Layer* yang disesuaikan dengan fase pertumbuhan tanaman melon. Sistem tidak hanya mengandalkan nilai kelembapan tanah secara statis, tetapi juga mempertimbangkan kebutuhan air pada setiap tahap pertumbuhan. Pada fase vegetatif awal, sistem menjaga kelembapan tanah pada kondisi yang optimal untuk mendukung pertumbuhan tanaman. Sementara itu, pada fase pematangan buah, sistem menerapkan pengurangan pemberian air secara terkontrol guna merangsang peningkatan akumulasi padatan

terlarut. Pendekatan ini berpotensi meningkatkan kualitas hasil panen, terutama kadar kemanisan buah, serta mengurangi risiko kesalahan dalam pengelolaan irigasi.

c. Efisiensi Protokol dan Fleksibilitas Infrastruktur

Dalam pengembangan arsitektur sistem IoT skala luas, efisiensi penggunaan daya dan bandwidth merupakan aspek penting yang perlu diperhatikan. Pemanfaatan protokol *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) pada *Network Layer* memberikan efisiensi komunikasi data yang lebih baik dibandingkan protokol HTTP konvensional. Melalui mekanisme *publish/subscribe*, mikrokontroler hanya mengirimkan data sensor maupun status aktuator ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan yang signifikan. Pendekatan ini mampu mengurangi jumlah transmisi data sehingga penggunaan bandwidth menjadi lebih hemat dan sistem dapat beroperasi dengan lebih efisien.

Integrasi ESP32 dalam arsitektur yang diusulkan tidak hanya mendukung pemrosesan logika secara lokal, tetapi juga menawarkan efisiensi biaya perangkat keras. Permasalahan skalabilitas yang umum ditemukan pada sistem otomasi berbiaya rendah dapat diminimalkan karena setiap perangkat *edge* yang ditempatkan pada berbagai titik lahan mampu berkomunikasi melalui broker MQTT lokal sebelum data diteruskan ke server utama. Dengan mekanisme ini, sistem menjadi lebih fleksibel untuk dikembangkan pada area yang lebih luas tanpa meningkatkan kompleksitas maupun biaya implementasi secara signifikan. Pengalaman pengembangan infrastruktur jaringan IoT skala lapangan pada kawasan perkotaan turut mengonfirmasi bahwa pendekatan jaringan terdistribusi semacam ini efektif dalam menekan beban pada titik pusat jaringan sekaligus mempermudah proses pemeliharaan sistem di masa mendatang[50].

d. Kontribusi dan Implikasi Penelitian

Rancangan arsitektur IoT pada irigasi tetes cerdas ini memberikan kontribusi ganda, baik pada tataran teoretis maupun praktis:

- **Kontribusi Ilmu Pengetahuan:** Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan rekayasa sistem di bidang pertanian cerdas melalui perumusan model arsitektur IoT empat lapis yang menerapkan konsep *local intelligence*. Arsitektur yang diusulkan menunjukkan bahwa penerapan komputasi tepi (*edge computing*) yang dikombinasikan dengan algoritma yang disesuaikan dengan karakteristik fisiologis tanaman melon dapat meningkatkan keandalan sistem dan mempercepat respons aktuasi dibandingkan dengan pendekatan yang sepenuhnya bergantung pada layanan cloud.
- **Implikasi Praktis:** Arsitektur yang dihasilkan berpotensi menjadi acuan dalam pengembangan dan implementasi sistem irigasi cerdas bagi petani hortikultura, pengelola kebun skala menengah, maupun pengembang teknologi pertanian. Kemampuan sistem untuk beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan penuh pada koneksi internet secara real-time memberikan tingkat keandalan yang lebih tinggi, khususnya pada lahan dengan keterbatasan infrastruktur jaringan. Selain itu, penerapan arsitektur ini dapat mendukung peningkatan efisiensi penggunaan air (*Water Use Efficiency/WUE*) serta mengurangi risiko kegagalan panen yang disebabkan oleh kesalahan pengelolaan irigasi secara manual.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merumuskan rancangan "Arsitektur Sistem *Internet of Things* (IoT) pada Irigasi Tetes Cerdas Tanaman Melon" melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Secara keseluruhan, kajian ini menyimpulkan bahwa implementasi arsitektur irigasi yang berpusat pada komputasi awan (*Cloud-centric*) memiliki kerentanan fatal terhadap latensi dan kegagalan sistem (*system failure*) akibat fluktuasi koneksi jaringan di area pertanian marginal. Untuk menjawab permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan arsitektur empat lapisan (*Four-Layer Architecture*) yang mendesentralisasi pengambilan keputusan melalui integrasi Komputasi Tepi (*Edge Computing*) pada *Middleware Layer*.

Penggunaan mikrokontroler lokal (ESP32) yang dipadukan dengan protokol komunikasi nirkabel berbobot ringan (*Message Queuing Telemetry Transport* / MQTT) terbukti secara teoretis mampu menekan konsumsi *bandwidth* dan mempercepat waktu respons aktuasi menjadi seketika (*zero-latency*). Kombinasi mikrokontroler ESP32 dengan jaringan nirkabel yang dirancang secara tepat juga telah terbukti aplikatif pada berbagai konteks pemantauan lingkungan terdistribusi, mulai dari kampus, kawasan perkotaan, hingga kolam budidaya perikanan [51], sehingga memperkuat justifikasi bahwa arsitektur serupa layak diadaptasi untuk kebutuhan irigasi tetes cerdas tanaman melon. Lebih jauh, kebaruan (*novelty*) utama dari arsitektur ini dicapai melalui penanaman algoritma cerdas di tingkat *Edge* yang dikalibrasi secara spesifik mengikuti fluktuasi kebutuhan air pada fase agronomis tanaman melon (fase vegetatif, pembungaan, dan pematangan). Melalui pendekatan ini, sistem tidak

hanya merespons parameter lingkungan secara kaku, tetapi juga memahami kebutuhan biologis tanaman untuk mencegah asfiksia akar dan mengoptimalkan stres air terkontrol demi mencapai kadar kemanisan (*Brix*) yang maksimal.

Pada akhirnya, hasil penelitian ini menegaskan bahwa masa depan otomasi pertanian presisi tidak semata-mata bergantung pada kecanggihan pemrosesan di *server* pusat (*cloud*), melainkan pada kemandirian dan kecerdasan sistem di tingkat lokal. Usulan arsitektur ini menawarkan proyeksi efisiensi ganda, yakni efisiensi penggunaan sumber daya air (*Water Use Efficiency*) sekaligus penghematan konsumsi daya perangkat keras. Cetak biru arsitektur ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam memodernisasi praktik budidaya hortikultura, meningkatkan ketahanan sistem terhadap infrastruktur jaringan yang buruk, serta melindungi petani melon dari risiko gagal panen akibat malapraktik irigasi.

Author Contributions: [Habiburrahman]: *Konseptualisasi, Metodologi, Penulisan - Draf Asli, Penulisan - Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi.* [Abdul Halim]: *Perangkat Lunak, Investigasi, Kurasi Data, Penulisan - Draf Asli.*

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang diterbitkan.

Pendanaan: -

Ucapan Terima Kasih: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak memiliki konflik kepentingan

Persetujuan Berdasarkan Informasi ORCID: Tidak tersedia

Ketersediaan Data: -

Penulis Pertama: <https://orcid.org/0000-0001-9088-1234>

Penulis Kedua: <https://orcid.org/0000-0002-1234-5678>

Penulis Ketiga: -

REFERENSI

- [1] S. S. Mane, V. Narawade, and N. J. Ranshur, "Revolutionizing Agriculture Soil Testing with Agriculture 4.0 and IoT Integration," *Current Agriculture Research Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 1333–1344, Jan. 2025, doi: 10.12944/CARJ.12.3.26.
- [2] V. Choudhary, P. Guha, G. Pau, and S. Mishra, "An overview of smart agriculture using internet of things (IoT) and web services," *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 26, p. 100607, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.indic.2025.100607.
- [3] G. Saha, F. Shahrin, F. H. Khan, M. M. Meshkat, and A. A. M. Azad, "Smart IoT-driven precision agriculture: Land mapping, crop prediction, and irrigation system," *PLoS One*, vol. 20, no. 3, p. e0319268, Mar. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0319268.
- [4] A. Manocha, S. K. Sood, and M. Bhatia, "IoT-digital twin-inspired smart irrigation approach for optimal water utilization," *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, vol. 41, p. 100947, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.suscom.2023.100947.
- [5] N. N. Thilakarathne, M. S. A. Bakar, P. E. Abas, and H. Yassin, "Towards making the fields talks: A real-time cloud enabled IoT crop management platform for smart agriculture," *Front. Plant Sci.*, vol. 13, Jan. 2023, doi: 10.3389/fpls.2022.1030168.
- [6] F. P. E. Putra, F. Fauzan, S. Syirofi, M. Mursidi, D. Wahid, and A. Nuraini, "Sistem Pengendali Lingkungan Pertanian Dengan Wireless Sensor Network Untuk Mengoptimalkan Budidaya Hidroponik," *Digital Transformation Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 931–937, Jan. 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [7] M. Ercan, H. Çoklar, M. Akbulut, D. Yavuz, M. Seymen, and N. Yavuz, "Effect of Irrigation Regime on Chemical, Physico-Chemical, and Functional Properties of Melon Fruits and Seeds," *Gesunde Pflanzen*, vol. 75, no. 6, pp. 2835–2845, Dec. 2023, doi: 10.1007/s10343-023-00900-w.
- [8] T. Thongleam, K. Meethaworn, and S. Kuankid, "Enhancing melon yield through a low-cost drip irrigation control system with time and soil sensor," *Research in Agricultural Engineering*, vol. 70, no. 1, pp. 13–22, Mar. 2024, doi: 10.17221/20/2023-RAE.
- [9] A. Tyagi *et al.*, "Uncovering the effect of waterlogging stress on plant microbiome and disease development: current knowledge and future perspectives," *Front. Plant Sci.*, vol. 15, Jun. 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1407789.
- [10] R. M. Panda, A. Matese, D. Maachi, and K. Aberkani, "Water stress impacts on the growth and productivity of melon crops in a Mediterranean climate," *Irrig. Sci.*, vol. 43, no. 5, pp. 1159–1168, Sep. 2025, doi: 10.1007/s00271-024-00972-0.
- [11] M. Ercan, H. Çoklar, M. Akbulut, D. Yavuz, M. Seymen, and N. Yavuz, "Effect of Irrigation Regime on Chemical, Physico-Chemical, and Functional Properties of Melon Fruits and Seeds," *Gesunde Pflanzen*, vol. 75, no. 6, pp. 2835–2845, Dec. 2023, doi: 10.1007/s10343-023-00900-w.
- [12] H. Buczkowska, A. Sałata, and R. Nurzyńska-Wierdak, "Melon (*Cucumis melo* L.) Fruit Yield under Irrigation and Mycorrhiza Conditions," *Agronomy*, vol. 13, no. 6, p. 1559, Jun. 2023, doi: 10.3390/agronomy13061559.
- [13] A. A. Abdelmoneim, H. N. Kimaita, C. M. Al Kalaany, B. Derardja, G. Dragonetti, and R. Khadra, "IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects," *Sensors*, vol. 25, no. 7, p. 2291, Apr. 2025, doi: 10.3390/s25072291.

- [14] Z. E. Mohamed, M. K. Afify, M. M. Badr, and O. A. Omar, "IoT-driven smart irrigation system to improve water use efficiency," *Sci. Rep.*, vol. 16, no. 1, p. 2609, Jan. 2026, doi: 10.1038/s41598-025-33826-6.
- [15] Y. K. Kushwaha, A. Joshi, R. K. Panigrahi, and A. Pandey, "Development of a smart irrigation monitoring system employing the wireless sensor network for agricultural water management," *Journal of Hydroinformatics*, vol. 26, no. 12, pp. 3224–3243, Dec. 2024, doi: 10.2166/hydro.2024.241.
- [16] R. K. Jain, "Experimental performance of smart IoT-enabled drip irrigation system using and controlled through web-based applications," *Smart Agricultural Technology*, vol. 4, p. 100215, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100215.
- [17] N. N. Thilakarathne, M. S. A. Bakar, P. E. Abas, and H. Yassin, "Towards making the fields talks: A real-time cloud enabled IoT crop management platform for smart agriculture," *Front. Plant Sci.*, vol. 13, Jan. 2023, doi: 10.3389/fpls.2022.1030168.
- [18] P. Yu, F. Teng, W. Zhu, C. Shen, Z. Chen, and J. Song, "Cloud-edge-device collaborative computing in smart agriculture: architectures, applications, and future perspectives," *Front. Plant Sci.*, vol. 16, Oct. 2025, doi: 10.3389/fpls.2025.1668545.
- [19] M. Dong, H. Yu, Z. Sun, L. Zhang, Y. Sui, and R. Zhao, "Research on agricultural environmental monitoring Internet of Things based on edge computing and deep learning," *Journal of Intelligent Systems*, vol. 33, no. 1, May 2024, doi: 10.1515/jisys-2023-0114.
- [20] Y. Zhang *et al.*, "Research and Development of an IoT Smart Irrigation System for Farmland Based on LoRa and Edge Computing," *Agronomy*, vol. 15, no. 2, p. 366, Jan. 2025, doi: 10.3390/agronomy15020366.
- [21] A. E. Abioye *et al.*, "Model based predictive control strategy for water saving drip irrigation," *Smart Agricultural Technology*, vol. 4, p. 100179, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100179.
- [22] M. Benzaouia, B. Hajji, A. Mellit, and A. Rabhi, "Fuzzy-IoT smart irrigation system for precision scheduling and monitoring," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 215, p. 108407, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.compag.2023.108407.
- [23] A. A. Abdelmoneim, H. N. Kimaita, C. M. Al Kalaany, B. Derardja, G. Dragonetti, and R. Khadra, "IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects," *Sensors*, vol. 25, no. 7, p. 2291, Apr. 2025, doi: 10.3390/s25072291.
- [24] C. C. Baseca, R. Dionísio, F. Ribeiro, and J. Metrôlho, "Edge-Computing Smart Irrigation Controller Using LoRaWAN and LSTM for Predictive Controlled Deficit Irrigation," *Sensors*, vol. 25, no. 22, p. 7079, Nov. 2025, doi: 10.3390/s25227079.
- [25] A. E. G. and G. J. Bala, "IoT and ML-based automatic irrigation system for smart agriculture system," *Agron. J.*, vol. 116, no. 3, pp. 1187–1203, May 2024, doi: 10.1002/agj2.21344.
- [26] S. Belkher *et al.*, "Deficit Irrigation and an IoT-Based System for Improving Yield and Water Use Efficiency of Winter Wheat Grown Under Semi-Arid Conditions," *Agronomy*, vol. 15, no. 1, p. 157, Jan. 2025, doi: 10.3390/agronomy15010157.
- [27] S. R. *et al.*, "A novel autonomous irrigation system for smart agriculture using AI and 6G enabled IoT network," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 101, p. 104905, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.micpro.2023.104905.
- [28] B. Jamshidi *et al.*, "Internet of things-based smart system for apple orchards monitoring and management," *Smart Agricultural Technology*, vol. 10, p. 100715, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.atech.2024.100715.
- [29] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Dian Tri Agustina, Triana Selvia Khusnul Khotimah, and Tarisha Ramadhanty, "Analisis Kinerja Jaringan 5G dalam Meningkatkan Konektivitas Internet of Things (IoT)," *Jurnal Informatika Dan Teknologi Komputer (JITEK)*, vol. 5, no. 1, pp. 56–62, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5836.
- [30] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Maktusuf Ghumamah, Moh. Amrullah, and Rafli Hidayatullah, "Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan," *Jurnal Informatika Dan Teknologi Komputer (JITEK)*, vol. 5, no. 1, pp. 63–73, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5895.
- [31] N. Haidar, F. P. Eka Putra, M. Arifin, M. Yasir Zain, and I. Darmawan, "Desain dan Perancangan Smart Campus berbasis ZigBee Wireless Sensor Network," *Jurnal Inovasi Teknologi dan Edukasi Teknik*, vol. 1, no. 11, pp. 842–850, Nov. 2021, doi: 10.17977/um068v1i112021p842-850.
- [32] E. Artetxe, O. Barambones, I. Martín Toral, J. Uralde, I. Calvo, and A. del Rio, "Smart IoT Irrigation System Based on Fuzzy Logic, LoRa, and Cloud Integration," *Electronics (Basel)*, vol. 13, no. 10, p. 1949, May 2024, doi: 10.3390/electronics13101949.
- [33] F. Fuentes-Peñailillo, S. Ortega-Farías, C. Acevedo-Opazo, M. Rivera, and M. Araya-Alman, "A Smart Crop Water Stress Index-Based IoT Solution for Precision Irrigation of Wine Grape," *Sensors*, vol. 24, no. 1, p. 25, Dec. 2023, doi: 10.3390/s24010025.
- [34] M. K. Meriç, "Implementation of a wireless sensor network for irrigation management in drip irrigation systems," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 14157, Apr. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-97303-w.
- [35] S. Zapata-García, A. Temnani, P. Berríos, P. J. Espinosa, C. Monllor, and A. Pérez-Pastor, "Using Soil Water Status Sensors to Optimize Water and Nutrient Use in Melon under Semi-Arid Conditions," *Agronomy*, vol. 13, no. 10, p. 2652, Oct. 2023, doi: 10.3390/agronomy13102652.
- [36] A. Miceli, F. Vetrano, L. Torta, A. Esposito, and A. Moncada, "Effect of Mycorrhizal Inoculation on Melon Plants under Deficit Irrigation Regimes," *Agronomy*, vol. 13, no. 2, p. 440, Feb. 2023, doi: 10.3390/agronomy13020440.
- [37] J. J. Correa-Quiroz, M. A. Toribio-Barrueto, and C. Castro-Vargas, "IoT System with ESP32 for Smart Drip Irrigation and Climate Monitoring in Greenhouses," *Emerging Science Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1133–1157, Jun. 2025, doi: 10.28991/ESJ-2025-09-03-01.
- [38] B. Agustirandi, I. Inayah, N. S. Aminah, and M. Budiman, "Analysis comparison, calibration, and application of low-cost soil moisture in smart agriculture based on internet of things," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 22, no. 5, p. 1221, May 2024, doi: 10.12928/telkomnika.v22i5.25703.
- [39] V. K. S. C. D. Singh, K. V. R. Rao, M. Kumar, and Y. A. Rajwade, "Development of a smart IoT-based drip irrigation system for precision farming," *Irrigation and Drainage*, vol. 72, no. 1, pp. 21–37, Feb. 2023, doi: 10.1002/ird.2757.
- [40] H. Nurwarsito and R. W. Adaby, "Pengembangan Internet Of Things (IoT) Dalam Perekaman Data Iklim Mikro Dengan Platform Thingsboard," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 11, no. 6, pp. 1385–1398, Dec. 2024, doi: 10.25126/jtiik.2024118987.
- [41] F. P. E. Putra, M. A. Mahmud, and I. S. Maqom, "Pengembangan Sistem Pemantauan Lingkungan Berbasis Internet of Things (IoT) di Kampus," *Digital Transformation Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 996–1001, Feb. 2024, doi: 10.47709/digitech.v3i2.3457.

- [42] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, M. A. Huda, H. Hasbullah, and A. Rohman, "Computer Network Management Optimization Through Big Data Analysis Using Time Series Analysis Method," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 434–442, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4373.
- [43] Syukur Toha Prasetyo and Syaiful Khoiri, "Implementation of an IoT-Based Drip Irrigation System for Cucumis melo Cultivation in Greenhouse Environments: Initial Evaluation," *Agricultural Revolution Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 13–21, May 2025, doi: 10.64570/agrivolution.v1i1.9.
- [44] M. S. Nur Alif and K. M. Dian Pertiwi, "Design and Implementation of an IoT-Based Smart Drip Irrigation System Using Takagi-Sugeno Fuzzy Logic for Melon Cultivation," *Journal of Applied Informatics and Computing*, vol. 9, no. 6, pp. 3499–3508, Dec. 2025, doi: 10.30871/jaic.v9i6.11424.
- [45] 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," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 356–361, Jul. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.
- [46] S. Adriansyah, S. Sumarno, U. M. Nurfuha, A. Giffari, T. Khoirunisa, and W. G. Subarkah, "Performance Analysis of MQTT and HTTP Protocols on Low-Power ESP32 Devices for IoT Applications," *CoreID Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 38–45, May 2026, doi: 10.60005/coreid.v4i1.160.
- [47] J. J. Correa-Quiroz, M. A. Toribio-Barrueto, and C. Castro-Vargas, "IoT System with ESP32 for Smart Drip Irrigation and Climate Monitoring in Greenhouses," *Emerging Science Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1133–1157, Jun. 2025, doi: 10.28991/ESJ-2025-09-03-01.
- [48] S. Zapata-García, A. Temnani, P. Berríos, P. J. Espinosa, C. Monllor, and A. Pérez-Pastor, "Using Soil Water Status Sensors to Optimize Water and Nutrient Use in Melon under Semi-Arid Conditions," *Agronomy*, vol. 13, no. 10, p. 2652, Oct. 2023, doi: 10.3390/agronomy13102652.
- [49] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, A. Hamzah, W. A. Pramadi, and A. Nuraini, "Systematic Literature Review: Security Gap Detection On Websites Using Owasap Zap," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 348–355, Jul. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4227.
- [50] A. F. Rachman, F. P. E. Putra, S. Syirofi, and D. Wahid, "Case Study of Computer Network Development for the Internet Of Things (IoT) Industry in an Urban Environment," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 4, no. 1, pp. 399–407, Aug. 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4302.
- [51] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Mustafida Mustafida, Royhan Alfadili, and Afifatun Nahriyah, "Perancangan Jaringan Nirkabel Berbasis Mesh untuk Menunjang Aplikasi Smart City," *Jurnal Informatika Dan Teknologi Komputer (JITEK)*, vol. 5, no. 1, pp. 84–92, Mar. 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5934.