

Smart Agriculture: Integrasi Sensor Dan Data Analytics Dalam Sistem Pertanian Modern

Ahmad Fauzan^{1)*} , Khoirul Mufid²⁾ 

¹⁾ ²⁾ Universitas Madura, Pamekasan, Indonesia

¹⁾ fauzansantri96@gmail.com, ²⁾ iroelphotography03@gmail.com

Abstrak

Perkembangan teknologi digital mendorong transformasi sektor pertanian menuju sistem yang lebih modern melalui penerapan smart agriculture berbasis sensor dan analisis data. Namun, implementasi teknologi ini masih menghadapi tantangan dalam integrasi sistem dan pemanfaatan data secara optimal. Tujuan: Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengkaji sistem smart agriculture yang mengintegrasikan sensor dan data analytics guna meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengelolaan pertanian. Metode: Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem dengan metode eksperimental, melibatkan perancangan perangkat keras dan lunak, implementasi sensor berbasis IoT, serta analisis data menggunakan teknik statistik dan machine learning. Hasil: Sistem yang dikembangkan mampu melakukan monitoring real-time terhadap kelembapan tanah, suhu, dan pH dengan interval 10 menit, serta menghasilkan rekomendasi irigasi yang adaptif. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi sensor yang baik dengan deviasi rendah serta peningkatan efisiensi penggunaan air berdasarkan kondisi aktual lahan. Kesimpulan: Integrasi sensor dan data analytics terbukti efektif dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis data pada sistem pertanian modern. Penelitian ini berhasil mencapai tujuan yang ditetapkan, meskipun masih diperlukan pengembangan lebih lanjut terkait infrastruktur, biaya, dan literasi pengguna untuk implementasi yang lebih luas.

Kata Kunci: smart agriculture, Internet of Things, data analytics, pertanian presisi, monitoring lingkungan

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

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi dalam dua dekade terakhir telah membawa perubahan signifikan di berbagai sektor, termasuk sektor pertanian. Pertanian yang selama ini identik dengan praktik konvensional kini mulai bertransformasi menuju sistem yang lebih modern, adaptif, dan berbasis data. Transformasi ini dikenal dengan konsep *smart agriculture*, yaitu penerapan teknologi cerdas untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan dalam sistem pertanian.[1], [2] Integrasi antara sensor dan *data analytics* menjadi salah satu pilar utama dalam mewujudkan pertanian modern yang responsif terhadap dinamika lingkungan dan kebutuhan pasar.[3], [4] Tantangan global seperti pertumbuhan populasi, perubahan iklim, keterbatasan lahan, serta kebutuhan pangan yang terus meningkat menuntut adanya inovasi dalam pengelolaan sektor pertanian. Metode tradisional yang mengandalkan pengalaman dan perkiraan tidak lagi cukup untuk menjawab kompleksitas permasalahan tersebut. Dalam konteks ini, teknologi sensor memungkinkan pengumpulan data secara real-time terkait kondisi tanah, kelembapan, suhu, intensitas cahaya, serta parameter lingkungan lainnya. Data yang dihasilkan kemudian dianalisis menggunakan teknik *data analytics* untuk menghasilkan informasi yang akurat dan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan.[5]

Integrasi sensor dalam sistem pertanian memberikan kemampuan monitoring yang lebih presisi dibandingkan metode konvensional.[6], [7] Misalnya, penggunaan sensor kelembapan tanah dapat membantu petani menentukan waktu dan jumlah irigasi yang optimal, sehingga mengurangi pemborosan air sekaligus meningkatkan kesehatan tanaman. Selain itu, sensor suhu dan kelembapan udara dapat digunakan untuk memprediksi potensi serangan hama dan penyakit, sehingga tindakan pencegahan dapat dilakukan lebih dini.[8], [9] Dengan demikian, teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga mengurangi risiko kerugian yang diakibatkan oleh faktor lingkungan yang tidak terkontrol. Di sisi lain, *data analytics* berperan penting dalam mengolah data yang dikumpulkan oleh sensor menjadi informasi yang bernilai. Melalui teknik analisis data, seperti *machine learning* dan *predictive analytics*, sistem dapat mengidentifikasi pola, tren, serta anomali yang mungkin tidak terlihat secara kasat mata. Sebagai contoh, analisis historis data pertanian dapat digunakan untuk memprediksi hasil panen, menentukan pola tanam yang optimal, serta mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi produktivitas. Hal ini memungkinkan petani dan pemangku kepentingan untuk mengambil keputusan yang lebih tepat dan berbasis bukti (*data-driven decision making*).[10], [11], [12]

Namun demikian, implementasi *smart agriculture* tidak terlepas dari berbagai tantangan. Salah satu tantangan utama adalah keterbatasan infrastruktur teknologi, terutama di daerah pedesaan yang menjadi pusat aktivitas pertanian.

* Ahmad Fauzan

Ketersediaan jaringan internet yang stabil, biaya perangkat sensor, serta tingkat literasi digital petani menjadi faktor yang mempengaruhi keberhasilan adopsi teknologi ini.[13], [14]Selain itu, integrasi berbagai komponen teknologi, seperti sensor, platform penyimpanan data, dan sistem analitik, memerlukan perancangan sistem yang matang agar dapat berjalan secara optimal dan berkelanjutan. Dalam konteks akademik dan penelitian, kajian mengenai integrasi sensor dan *data analytics* dalam sistem pertanian modern menjadi topik yang sangat relevan dan strategis.[15], [16] Penelitian di bidang ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga memiliki dampak langsung terhadap peningkatan kesejahteraan petani dan ketahanan pangan nasional. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan multidisiplin yang menggabungkan ilmu informatika, teknik pertanian, serta ilmu lingkungan untuk menghasilkan solusi yang komprehensif dan aplikatif.[17], [18]

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan merancang sistem *smart agriculture* yang mengintegrasikan teknologi sensor dan *data analytics* dalam mendukung pengelolaan pertanian modern. Fokus utama penelitian ini adalah pada bagaimana data yang dikumpulkan oleh sensor dapat diolah secara efektif untuk menghasilkan informasi yang akurat dan relevan bagi pengambilan keputusan. Selain itu, penelitian ini juga mempertimbangkan aspek efisiensi, skalabilitas, dan kemudahan implementasi, sehingga solusi yang dihasilkan dapat diadopsi secara luas oleh berbagai kalangan, khususnya petani di Indonesia. Dengan adanya integrasi antara sensor dan *data analytics*, diharapkan sistem pertanian dapat menjadi lebih cerdas, adaptif, dan berkelanjutan. Transformasi menuju *smart agriculture* bukan hanya sekadar tren teknologi, tetapi merupakan kebutuhan mendasak dalam menghadapi tantangan global di sektor pangan. Oleh karena itu, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem pertanian modern yang berbasis teknologi dan data, serta menjadi referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya di bidang informatika pertanian.[19], [20]

II. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep *smart agriculture* merupakan evolusi dari pertanian konvensional menuju sistem yang memanfaatkan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas.[21], [22], [23] Dalam pendekatan ini, teknologi tidak hanya digunakan sebagai alat bantu, tetapi menjadi bagian integral dari proses pengambilan keputusan. Sistem pertanian cerdas mengandalkan integrasi berbagai komponen seperti sensor, jaringan komunikasi, komputasi awan, serta analisis data untuk menciptakan ekosistem yang saling terhubung dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.[24], [25], [26]Salah satu komponen utama dalam *smart agriculture* adalah penggunaan sensor. Sensor berfungsi untuk mengumpulkan data dari lingkungan pertanian secara real-time. Jenis sensor yang umum digunakan meliputi sensor kelembapan tanah, suhu udara, intensitas cahaya, pH tanah, serta kandungan nutrisi. Data yang dihasilkan oleh sensor ini memberikan gambaran kondisi aktual lahan pertanian, sehingga memungkinkan pengelolaan yang lebih presisi. Konsep ini sering dikenal sebagai *precision agriculture*, yaitu pendekatan yang menekankan pada pengelolaan lahan secara spesifik berdasarkan variabilitas kondisi di lapangan.[27], [28], [29],

Selain sensor, teknologi Internet of Things (*IoT*) berperan penting dalam menghubungkan berbagai perangkat dalam sistem pertanian.[30], [31], [32] *IoT* memungkinkan sensor untuk berkomunikasi dengan perangkat lain, seperti server atau platform analitik, melalui jaringan internet. Dengan adanya konektivitas ini, data dapat dikirim dan diproses secara otomatis tanpa intervensi manusia secara langsung.[33], [34], [35] Hal ini membuka peluang untuk menciptakan sistem pertanian yang lebih efisien, di mana proses monitoring dan kontrol dapat dilakukan dari jarak jauh. Pengolahan data yang dihasilkan oleh sensor membutuhkan pendekatan *data analytics* yang tepat. *Data analytics* mencakup berbagai teknik untuk mengolah, menganalisis, dan mengekstrak informasi dari data mentah.[36], [37], [38]Dalam konteks pertanian, teknik seperti *machine learning* digunakan untuk mengidentifikasi pola dan hubungan antar variabel, seperti hubungan antara kondisi tanah dan hasil panen. Selain itu, *predictive analytics* memungkinkan sistem untuk melakukan prediksi berdasarkan data historis, sehingga petani dapat merencanakan tindakan yang lebih strategis.[39], [40], [41]

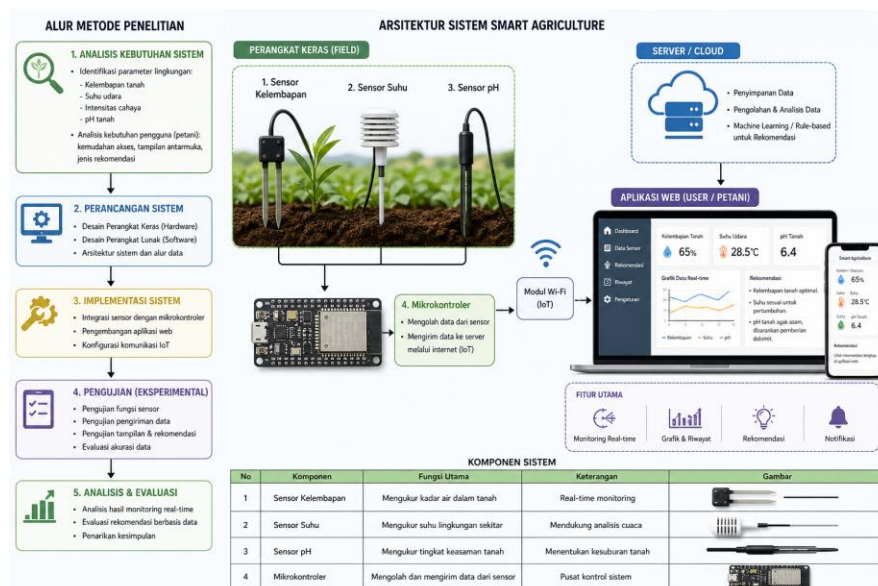
Integrasi antara sensor dan *data analytics* menghasilkan sistem yang mampu memberikan rekomendasi secara otomatis. Misalnya, sistem dapat menentukan waktu irigasi yang optimal berdasarkan data kelembapan tanah dan prakiraan cuaca.[42], [43], [44] Selain itu, sistem juga dapat mendeteksi potensi serangan hama melalui analisis perubahan kondisi lingkungan dan memberikan peringatan dini kepada petani. Dengan demikian, peran manusia dalam proses pengambilan keputusan menjadi lebih terbantu oleh sistem yang berbasis data. Dalam implementasinya, *smart agriculture* sering memanfaatkan komputasi awan (*cloud computing*) sebagai media penyimpanan dan pemrosesan data.[45], [46] Cloud memungkinkan data dalam jumlah besar disimpan secara terpusat dan diakses kapan saja. Selain itu, penggunaan cloud juga mendukung skalabilitas sistem, sehingga dapat menyesuaikan dengan kebutuhan pengguna. Hal ini sangat penting mengingat volume data yang dihasilkan oleh sensor cenderung besar dan terus bertambah seiring waktu. Meskipun menawarkan berbagai keunggulan, penerapan *smart agriculture* juga menghadapi beberapa tantangan.[47], [48]Salah satunya adalah keterbatasan infrastruktur teknologi, seperti jaringan internet yang belum merata. Selain itu, biaya implementasi yang relatif tinggi menjadi hambatan bagi petani skala

kecil. Aspek lain yang perlu diperhatikan adalah keamanan data, mengingat sistem ini melibatkan pertukaran data

secara terus-menerus melalui jaringan. Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa integrasi sensor dan *data analytics* memiliki potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian. Pendekatan ini memungkinkan pengelolaan sumber daya yang lebih optimal, pengurangan biaya operasional, serta peningkatan kualitas hasil panen. Oleh karena itu, pengembangan sistem *smart agriculture* yang terintegrasi menjadi salah satu fokus utama dalam penelitian di bidang informatika dan pertanian modern.[49], [50]

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem (system engineering) yang dipadukan dengan metode eksperimental untuk merancang dan menguji sistem smart agriculture berbasis integrasi sensor dan data analytics.[51] Tujuan utama dari metode ini adalah menghasilkan sebuah sistem yang mampu melakukan monitoring kondisi lahan secara real-time serta memberikan rekomendasi berbasis data untuk mendukung pengambilan keputusan dalam kegiatan pertanian modern. Tahapan penelitian diawali dengan analisis kebutuhan sistem. Pada tahap ini dilakukan identifikasi parameter lingkungan yang relevan dengan pertumbuhan tanaman, seperti kelembapan tanah, suhu udara, intensitas cahaya, dan pH tanah. Selain itu, dianalisis pula kebutuhan pengguna, dalam hal ini petani, terkait kemudahan akses informasi, tampilan antarmuka, serta jenis rekomendasi yang dibutuhkan. Hasil dari tahap ini menjadi dasar dalam perancangan arsitektur sistem. Selanjutnya, dilakukan perancangan sistem yang meliputi desain perangkat keras (hardware) dan perangkat lunak (software). Pada sisi perangkat keras, sistem menggunakan beberapa sensor yang terhubung dengan mikrokontroler sebagai pusat pengolahan data sementara. Sensor-sensor tersebut berfungsi untuk mengumpulkan data lingkungan secara berkala. Mikrokontroler kemudian mengirimkan data tersebut ke server melalui jaringan internet menggunakan modul komunikasi berbasis IoT. Pada sisi perangkat lunak, sistem dirancang menggunakan platform berbasis web untuk menampilkan data dan hasil analisis kepada pengguna.[52] Berikut adalah gambaran arsitektur sistem yang diusulkan:



Gambar 1. Instrumen Penelitian

Gambar di atas menggambarkan alur kerja sistem secara umum. Sensor yang ditempatkan di lahan pertanian mengumpulkan data lingkungan, kemudian data dikirim ke mikrokontroler dan diteruskan ke server berbasis cloud. Data yang tersimpan di cloud selanjutnya diproses menggunakan metode data analytics, dan hasilnya ditampilkan melalui dashboard yang dapat diakses oleh pengguna. Tahap berikutnya adalah implementasi sistem.[53] Pada tahap ini dilakukan pemasangan sensor di lahan uji serta konfigurasi perangkat keras dan perangkat lunak. Data yang dikumpulkan oleh sensor dikirim secara periodik ke server dengan interval waktu tertentu. Sistem backend kemudian melakukan proses pembersihan data (data cleaning) dan penyimpanan ke dalam basis data. Setelah itu, dilakukan analisis data menggunakan metode statistik sederhana dan algoritma machine learning untuk menghasilkan informasi dan prediksi yang relevan.[54]

Tahap selanjutnya adalah pengujian sistem. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh komponen sistem dapat bekerja dengan baik dan terintegrasi secara optimal.[55] Pengujian meliputi akurasi pembacaan sensor, kestabilan pengiriman data, serta kecepatan respon sistem dalam menampilkan informasi. Selain itu, dilakukan pula pengujian terhadap hasil analisis data untuk memastikan bahwa rekomendasi yang dihasilkan sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Metode evaluasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah perbandingan antara hasil sistem dengan kondisi nyata di lapangan. Data yang diperoleh dari sensor dibandingkan dengan pengukuran manual sebagai acuan. Selain itu, dilakukan analisis terhadap efektivitas sistem dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air dan produktivitas tanaman. Hasil evaluasi ini menjadi dasar untuk melakukan perbaikan dan pengembangan sistem lebih lanjut. Dengan pendekatan metode yang sistematis ini, diharapkan sistem smart agriculture yang dikembangkan mampu memberikan solusi yang efektif dan aplikatif dalam mendukung pertanian modern berbasis teknologi.[56], [57]

IV. HASIL

Hasil penelitian ini diperoleh dari implementasi sistem smart agriculture yang telah dirancang dan diuji pada lahan percobaan dengan parameter utama berupa kelembapan tanah, suhu lingkungan, dan pH tanah. Sistem berhasil melakukan pengambilan data secara real-time dengan interval pengiriman setiap 10 menit, serta menampilkan data tersebut pada dashboard berbasis web yang dapat diakses oleh pengguna. Secara umum, seluruh komponen sistem—mulai dari sensor, mikrokontroler, hingga server cloud—berfungsi dengan baik dan terintegrasi secara optimal. Berdasarkan hasil pengujian, sensor mampu memberikan data yang relatif stabil dengan tingkat deviasi yang kecil dibandingkan dengan pengukuran manual. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang cukup baik untuk digunakan dalam monitoring kondisi lahan pertanian. Selain itu, proses pengiriman data melalui jaringan IoT menunjukkan tingkat keberhasilan yang tinggi dengan latensi yang rendah, sehingga data dapat diterima dan diproses hampir secara real-time. Berikut adalah contoh hasil pengukuran yang diperoleh selama periode pengamatan:

Tabel 2. Monitoring Kondisi Tanah

Waktu	Kelembapan Tanah (%)	Suhu (°C)	pH Tanah	Rekomendasi Sistem
08:00	45	27	6.5	Irigasi ringan
10:00	40	30	6.4	Tambah irigasi
12:00	35	32	6.3	Irigasi optimal diperlukan
14:00	50	31	6.5	Kondisi cukup

Dari tabel di atas, terlihat bahwa sistem mampu memberikan rekomendasi secara dinamis berdasarkan kondisi lingkungan yang terukur. Ketika kelembapan tanah berada di bawah ambang batas tertentu, sistem secara otomatis merekomendasikan penambahan irigasi. Sebaliknya, ketika kondisi tanah sudah cukup lembap, sistem menyarankan untuk tidak melakukan penyiraman guna menghindari pemborosan air. Selain monitoring, sistem juga melakukan analisis data historis untuk menghasilkan prediksi sederhana terkait kebutuhan air tanaman. Berdasarkan data yang dikumpulkan selama beberapa hari, sistem mampu mengidentifikasi pola penurunan kelembapan tanah yang dipengaruhi oleh suhu lingkungan. Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu, maka tingkat penguapan air dari tanah semakin besar, sehingga kebutuhan irigasi meningkat. Informasi ini sangat berguna bagi petani dalam merencanakan jadwal penyiraman yang lebih efisien. Pengujian terhadap efektivitas sistem juga menunjukkan adanya peningkatan efisiensi penggunaan air. Dengan adanya rekomendasi berbasis data, penggunaan air dapat dikurangi tanpa mengurangi kualitas pertumbuhan tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *smart agriculture* tidak hanya membantu dalam monitoring, tetapi juga berkontribusi pada pengelolaan sumber daya yang lebih berkelanjutan.

Dari sisi antarmuka, dashboard yang dikembangkan mampu menampilkan data dalam bentuk grafik dan tabel yang mudah dipahami oleh pengguna. Informasi ditampilkan secara terstruktur sehingga memudahkan petani dalam memantau kondisi lahan dan mengambil keputusan secara cepat. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan fitur notifikasi yang memberikan peringatan ketika kondisi lingkungan berada di luar batas normal. Namun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan beberapa keterbatasan. Salah satunya adalah ketergantungan pada koneksi internet yang stabil. Pada kondisi jaringan yang kurang baik, terjadi keterlambatan dalam pengiriman data. Selain itu, akurasi sensor dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan ekstrem, sehingga diperlukan kalibrasi secara berkala untuk menjaga keakuratan data. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi sensor dan *data analytics* dalam sistem *smart agriculture* mampu meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengelolaan pertanian. Sistem yang dikembangkan dapat memberikan informasi yang akurat dan rekomendasi yang relevan, sehingga mendukung

pengambilan keputusan berbasis data. Dengan pengembangan lebih lanjut, sistem ini berpotensi untuk diterapkan secara lebih luas dalam mendukung pertanian modern yang berkelanjutan.

V. PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan sistem *smart agriculture* berbasis integrasi sensor dan *data analytics* memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan efisiensi pengelolaan lahan pertanian. Sistem yang dikembangkan mampu menyediakan data lingkungan secara real-time dan mengolahnya menjadi informasi yang bernilai bagi pengguna. Hal ini sejalan dengan konsep pertanian modern yang menekankan pada pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*). Dengan adanya sistem ini, petani tidak lagi bergantung sepenuhnya pada intuisi atau pengalaman, melainkan dapat memanfaatkan data aktual untuk menentukan tindakan yang lebih tepat. Dari sisi teknis, integrasi antara sensor, mikrokontroler, dan platform cloud menunjukkan kinerja yang stabil dan dapat diandalkan. Data yang dikumpulkan mampu merepresentasikan kondisi lingkungan secara akurat, sehingga analisis yang dihasilkan memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi. Selain itu, penggunaan metode *data analytics* memungkinkan sistem untuk tidak hanya menyajikan data, tetapi juga memberikan rekomendasi yang bersifat prediktif. Ini menjadi nilai tambah yang penting dalam mendukung pengelolaan pertanian yang lebih proaktif dibandingkan reaktif.

Namun demikian, implementasi sistem ini juga mengungkap beberapa aspek penting yang perlu diperhatikan untuk pengembangan lebih lanjut, yaitu:

1. Aspek Infrastruktur Teknologi
Keberhasilan sistem sangat dipengaruhi oleh ketersediaan jaringan internet yang stabil. Dalam kondisi jaringan yang terbatas, proses pengiriman data menjadi terhambat, sehingga mengurangi efektivitas sistem. Oleh karena itu, diperlukan solusi alternatif seperti penggunaan jaringan lokal atau penyimpanan sementara (*local storage*) untuk mengatasi keterbatasan tersebut.
2. Aspek Biaya dan Aksesibilitas
Meskipun teknologi yang digunakan relatif terjangkau dalam skala penelitian, implementasi pada skala luas masih menghadapi kendala biaya, terutama bagi petani kecil. Diperlukan strategi untuk menekan biaya produksi perangkat serta model distribusi teknologi yang lebih inklusif agar dapat diadopsi secara luas.
3. Aspek Pengguna dan Literasi Digital
Tingkat pemahaman pengguna terhadap teknologi menjadi faktor penting dalam keberhasilan sistem. Meskipun dashboard dirancang sederhana, tetap diperlukan pelatihan dan pendampingan agar petani dapat memanfaatkan sistem secara optimal. Tanpa dukungan literasi digital yang memadai, potensi teknologi ini tidak dapat dimaksimalkan.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa *smart agriculture* bukan hanya persoalan teknologi, tetapi juga melibatkan aspek sosial, ekonomi, dan infrastruktur. Integrasi sensor dan *data analytics* terbukti mampu memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas pertanian. Namun, untuk mencapai implementasi yang berkelanjutan, diperlukan pendekatan yang holistik dengan mempertimbangkan berbagai faktor pendukung di lapangan. Dengan demikian, pengembangan sistem di masa depan diharapkan tidak hanya berfokus pada peningkatan teknologi, tetapi juga pada strategi adopsi yang lebih luas dan berkelanjutan.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem *smart agriculture* berbasis integrasi sensor dan *data analytics* yang mampu mendukung pengelolaan pertanian modern secara lebih efisien dan berbasis data. Sistem yang dikembangkan dapat melakukan monitoring kondisi lingkungan secara real-time, meliputi kelembapan tanah, suhu, dan pH tanah, serta mengolah data tersebut menjadi informasi yang relevan dalam bentuk rekomendasi tindakan, khususnya dalam pengelolaan irigasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang baik dibandingkan dengan pengukuran manual serta mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air melalui rekomendasi yang adaptif terhadap kondisi lingkungan. Selain itu, integrasi dengan platform berbasis cloud memungkinkan data dapat diakses secara fleksibel dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan tepat. Meskipun demikian, terdapat beberapa tantangan yang perlu diperhatikan, seperti keterbatasan infrastruktur jaringan, biaya implementasi, dan tingkat literasi digital pengguna. Oleh karena itu, pengembangan lebih lanjut perlu difokuskan pada peningkatan aksesibilitas teknologi, optimasi sistem agar lebih hemat biaya, serta penyediaan pelatihan bagi pengguna. Secara keseluruhan, sistem ini menunjukkan potensi besar dalam mendukung transformasi pertanian menuju sistem yang lebih cerdas, adaptif, dan berkelanjutan.

Kontribusi Penulis: [Ahmad Fauzan]: Konseptualisasi, Metodologi, Perancangan Sistem, Penulisan – Draf Awal, Penulisan – Tinjauan & Penyuntingan, Supervisi. Ahmad Fauzan merancang konsep dan metodologi penelitian, menyusun arsitektur sistem *smart agriculture* berbasis integrasi sensor dan *data analytics*, memimpin proses

penulisan, serta melakukan penyuntingan dan validasi akhir naskah.

[Khoirull Muufid]: Investigasi, Perangkat Keras, Kurasi Data, Pengujian Sistem, Penulisan – Draf Awal. Khoirul Muufid bertanggung jawab pada perancangan dan integrasi perangkat keras sensor, pelaksanaan pengujian sistem di lingkungan terkontrol, pengumpulan dan pengolahan data hasil pengujian, serta penyusunan draf awal hasil penelitian.

Semua penulis telah membaca dan menyetujui versi naskah yang telah diterbitkan.

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: -

REFERENSI

- [1] D. Loukatos, A. Fragkos, G. Kargas, and K. G. Arvanitis, "Implementation and Evaluation of a Low-Cost Measurement Platform over LoRa and Applicability for Soil Monitoring," *Futur. Internet*, vol. 16, no. 12, 2024, doi: 10.3390/fi16120443.
- [2] I. D. I. Saeedi and A. K. M. Al-Qurabat, "A Hybrid approach to cluster head selection in space-air-ground integrated networks: leveraging SMC and OOA for optimal performance," *J. Supercomput.*, vol. 81, no. 4, 2025, doi: 10.1007/s11227-025-06978-5.
- [3] F. P. Eka Putra, M. N. Arifin, K. Zulfana Imam, E. Saputra, and Sofiyullah, "Pengembangan Sistem Informasi Laboratorium Terintegrasi Sistem Akademik Menggunakan Agile Scrum," *J. Inf. dan Teknol.*, pp. 109–119, 2023, doi: 10.37034/jidt.v5i2.367.
- [4] 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," 2024. doi: 10.47709/digitech.v3i2.3461.
- [5] N. D. Khan, J. A. Khan, J. Li, T. Ullah, and Q. Zhao, "Mining software insights: uncovering the frequently occurring issues in low-rating software applications," *PeerJ Comput. Sci.*, vol. 10, 2024, doi: 10.7717/peerj-cs.2115.
- [6] C. Si, R. Fan, Y. Yang, and Y. Sun, "Improved TOA Localization Using Modified Polar Representation," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 28, no. 9, pp. 2051–2055, 2024, doi: 10.1109/LCOMM.2024.3430319.
- [7] R. Gillgallon, R. Almutairi, G. Bergami, and G. Morgan, "SimulatorOrchestrator: A 6G-Ready Simulator for the Cell-Free/Osmotic Infrastructure†," *Sensors*, vol. 25, no. 5, 2025, doi: 10.3390/s25051591.
- [8] W. Zhang, H. Zhang, Y. Zhou, C. Wang, and J. Sha, "A Bilayer Hydrogel with Heterogeneous Structures for Highly Efficient Moisture Energy Harvesting," *ACS Appl. Energy Mater.*, vol. 8, no. 9, pp. 5925–5935, 2025, doi: 10.1021/acsaem.5c00335.
- [9] S. Tang, C. Zhang, J. Li, and S. Obana, "Miso: Misalignment Allowed Optimization for Multiantenna Over-the-Air Computation," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 2, pp. 2561–2572, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3292882.
- [10] S. C. Benghelima, M. Ould Khaoua, A. Benzerbadj, and O. Baala, "Simultaneous sensor and relay nodes deployment for Smart Car Park surveillance," *Evol. Intell.*, vol. 17, no. 3, pp. 1587–1610, 2024, doi: 10.1007/s12065-023-00853-z.
- [11] J. Wang, S. Lu, and C. Li, "Uneven Clustering Routing Protocols for Multi-Hop Cognitive Radio Sensor Networks: General Design Principles and an Illustrative Example," *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 21, no. 1, pp. 153–172, 2025, doi: 10.24507/ijicic.21.01.153.
- [12] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Noviyani Dwi Saputri, Fathur Rosi, and Rohilia Loati, "Optimalisasi Infrastruktur Cloud Networking melalui Integrasi SDN, NFV, dan Multi-Cloud," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.6099.
- [13] G. Asaamoning, P. Mendes, and N. Magaia, "A Dynamic Clustering Mechanism with Load-Balancing for Flying Ad Hoc Networks," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 158574–158586, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3130417.
- [14] M. Cardamis, C. T. Chou, and W. Hu, "MotionLeaf: Fine-grained Multi-leaf Damped Vibration Monitoring for Plant Water Stress Using Cost-effective mmWave Sensors," *Proc. ACM Interactive, Mobile, Wearable Ubiquitous Technol.*, vol. 9, no. 3, 2025, doi: 10.1145/3749547.

- [15] D. Liu, G. Yu, Z. Zhong, and Y. Song, "Secure multi-party computation with secret sharing for real-time data aggregation in IIoT," *Comput. Commun.*, vol. 224, pp. 159–168, 2024, doi: 10.1016/j.comcom.2024.06.002.
- [16] M. Izad, N. Jiang, I. M. Filanovsky, and K. Moez, "A Non-Iterative Method for Design of Radio Frequency Energy Harvesters," *IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap.*, vol. 71, no. 1, pp. 133–146, 2024, doi: 10.1109/TCSI.2023.3328226.
- [17] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. O. F. Kusuma, A. M. Syam, and S. A. Efendy, "Effect Of Distance On Wi-Fi Signal Quality In The Home Environment," *Brill. Res. Artif. Intell.*, vol. 4, no. 1, pp. 391–398, 2024, doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4319.
- [18] H. Y. Bao, Z. Xu, H. B. Hong, Q. L. Kong, and H. F. Qian, "NLSP: A novel lattice-based secure primitive for privacy-preserving smart grid communications," *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 35, no. 19, 2023, doi: 10.1002/cpe.7406.
- [19] F. P. E. Putra, I. N. S. Degeng, S. Ulfa, and W. Kamdi, "The Evolution of Quality Education: Impacts and Challenges of Using Open Educational Resources (OER) and Open Educational Practices (OEP) in the Conceive - Design - Implement - Operate (CDIO) Framework," *TEM J.*, vol. 13, no. 1, pp. 386–395, 2024, doi: 10.18421/TEM131-40.
- [20] G. A. Kakamoukas *et al.*, "A Novel Air-to-Ground Communication Scheme for Advanced Big Data Collection in Smart Farming Using UAVs," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 16564–16583, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3532393.
- [21] F. Gallorini and L. Barelli, "Design and prototyping of miniature wind turbine and power generation section for the exploitation of wind generated by vehicle movement in road tunnels," *Energy*, vol. 305, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.132308.
- [22] Z. Gao, S. Liu, and Y. Zhang, "Cognitive Data Fusing for Internet of Things Based on Ensemble Learning and Federated Learning," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 13, pp. 22992–23001, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3377221.
- [23] F. Albertini, M. G. Tarantino, and L. Daniel, "Mechanical behavior of embedded bistable dome shell with tunable energy barrier asymmetry," *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 263, 2024, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2023.108762.
- [24] Fauzan Prasetyo Eka Putra, Debri Eko Arissandi, Achmad Rofiqi, and Moh Firman Hidayat, "Pemanfaatan Mikrotik Dalam Manajemen Bandwidth Pada Jaringan Sekolah," 2025, *researchgate.net*. doi: 10.55606/jitek.v5i1.5938.
- [25] K. Zhao *et al.*, "Moisture-driven energy generation by vertically structured polymer aerogel on water-collecting gel," *Nano Energy*, vol. 126, 2024, doi: 10.1016/j.nanoen.2024.109645.
- [26] F. P. Eka Putra, L. Fitriyah, Z. Naimah, and S. A. Rofika, "Evaluasi Kinerja Aplikasi Wireshark Dalam Monitoring Jaringan Kecil Dengan Topologi Star dan Bus," *J. Ilm. Ilk. - Ilmu Komput. Inform.*, vol. 8, no. 2, pp. 164–176, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.343.
- [27] F. Meder, S. Armiento, G. A. Naselli, A. Mondini, T. Speck, and B. Mazzolai, "Charge generation by passive plant leaf motion at low wind speeds: design and collective behavior of plant-hybrid energy harvesters," *Bioinspiration and Biomimetics*, vol. 19, no. 5, 2024, doi: 10.1088/1748-3190/ad5ba1.
- [28] J. Contreras-Castillo, J. A. Guerrero-Ibañez, P. C. Santana-Mancilla, and L. Anido-Rifón, "SAgric-IoT: An IoT-Based Platform and Deep Learning for Greenhouse Monitoring," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 3, 2023, doi: 10.3390/app13031961.
- [29] Q. Gulzar and K. Mustafa, "Enhancing network security in industrial IoT environments: a DeepCLG hybrid learning model for cyberattack detection," *Int. J. Mach. Learn. Cybern.*, vol. 16, no. 7–8, pp. 4797–4815, 2025, doi: 10.1007/s13042-025-02544-w.
- [30] L. Basyoni, A. Tabassum, K. Shaban, E. Elmahjub, O. Halabi, and J. Qadir, "Navigating Privacy Challenges in the Metaverse: A Comprehensive Examination of Current Technologies and Platforms," *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 7, no. 4, pp. 144–152, 2024, doi: 10.1109/IOTM.001.2300197.
- [31] X. Kong, L. Lu, and K. Xiong, "Privacy-preserving estimation of electric vehicle charging behavior: A federated learning approach based on differential privacy," *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 28, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101344.
- [32] J. B. Montes, S. Z. Fernandez, and V. D. Casas, "Internet of Things in Energy-Sensitive Processes: Application in a Refrigerated Warehouse," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 76257–76276, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3406992.
- [33] S. P. Gonzalez, G. A. Montoya, and C. Lozano-Garzón, "Comprehensive Monitoring System for High-Risk Pregnancies," *SN Comput. Sci.*, vol. 5, no. 8, 2024, doi: 10.1007/s42979-024-03342-x.
- [34] F. P. Eka Putra, . S., A. Ramadhani, and . M., "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, 2025, doi: 10.47324/ilkominfo.v8i2.342.
- [35] 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),” *J. Inform. Dan Teknologi Komput.*, vol. 5, no. 1, pp. 56–62, 2025, doi: 10.55606/jitek.v5i1.5836.
- [36] L. Fang *et al.*, “Polynary energy harvesting and multi-parameter sensing in the heatwave environment of industrial factory buildings by an integrated triboelectric-thermoelectric hybrid generator,” *Mater. Horizons*, vol. 11, no. 6, pp. 1414–1425, 2024, doi: 10.1039/d3mh02228e.
- [37] M. Zayyadi *et al.*, “Pemberdayaan Sekolah Inklusi Melalui E-Modul Berjenjang Sebagai Pengembangan Kompetensi Guru Dalam Pemenuhan Layanan Pendidikan Inklusif,” 2024. doi: 10.37303/peduli.v8i2.681.
- [38] S. Arifin, N. P. Dewi, . U., M. N. Arifin, and F. P. E. Putra, “Aplikasi Pengolahan Data Mahasiswa Kkn Pada Universitas Madura,” *Insa. Comtech Inf. Sci. Comput. Technol. J.*, vol. 8, no. 2, p. 24, 2023, doi: 10.53712/jic.v8i2.2085.
- [39] P. R. Kumar, M. P. Prabakaran, D. Arumugam, and J. Selvakumar, “A Novel Hybridization of ML Algorithms for Cluster Head Selection in WSN,” *Infocommunications J.*, vol. 16, no. 2, pp. 33–42, 2024, doi: 10.36244/ICJ.2024.2.5.
- [40] F. P. E. Putra, R. W. Efendi, A. B. Tamam, and W. A. Pramadi, “Tren dan Praktik Terbaik dalam Pengembangan Web Berbasis API : Kajian Literatur terhadap Framework Laravel dan React,” *Infomatek*, vol. 27, no. 1, pp. 165–178, 2025, doi: 10.23969/infomatek.v27i1.25122.
- [41] M. Madhukumar, A. Sebastian, X. Liang, M. Jamil, and M. N. S. K. Shabbir, “Regression Model-Based Short-Term Load Forecasting for University Campus Load,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 8891–8905, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3144206.
- [42] N. Paulino and L. M. Pessoa, “Self-Localization via Circular Bluetooth 5.1 Antenna Array Receiver,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 365–395, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3233130.
- [43] A. Chaudhary and S. K. Peddoju, “ADA2–IoT: An adaptive data aggregation algorithm for IoT infrastructure,” *Internet of Things (Netherlands)*, vol. 27, 2024, doi: 10.1016/j.iot.2024.101299.
- [44] M. Venkatesan *et al.*, “Ambient stable ZnBr₂-assisted lead-free perovskite for enhanced piezoelectricity of polyvinylidene fluoride in versatile piezo-phototronic applications,” *Chem. Eng. J.*, vol. 505, 2025, doi: 10.1016/j.cej.2025.159541.
- [45] C. M. Chen, Q. Miao, S. Kumari, M. K. Khan, and J. J. P. C. Rodrigues, “A Privacy-Preserving Authentication Protocol for Electric Vehicle Battery Swapping Based on Intelligent Blockchain,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 10, pp. 17538–17551, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3360280.
- [46] M. Y. B. Murthy and A. Koteswararao, “Applications, merits and demerits of WSN with IoT: a detailed review,” *Int. J. Auton. Adapt. Commun. Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 68–88, 2024, doi: 10.1504/IJAACS.2024.135941.
- [47] S. Masoumi, A. Noori, and A. Pakdel, “Exploring electrical transport in thin film and bulk thermoelectric materials with an automated Seebeck coefficient and resistivity measurement platform,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 236, 2024, doi: 10.1016/j.measurement.2024.115162.
- [48] D. Bhumichai, C. Smiliotopoulos, R. Benton, G. Kambourakis, and D. Damopoulos, “The Convergence of Artificial Intelligence and Blockchain: The State of Play and the Road Ahead,” *Inf.*, vol. 15, no. 5, 2024, doi: 10.3390/info15050268.
- [49] K. Dinesh and S. V. N. Santhosh Kumar, “HBO-SROA: Honey Badger optimization based clustering with secured remora optimization based routing algorithm in wireless sensor networks,” *Peer-to-Peer Netw. Appl.*, vol. 17, no. 5, pp. 2609–2636, 2024, doi: 10.1007/s12083-024-01708-9.
- [50] K. Aggarwal, G. Sreenivasula Reddy, R. Makala, T. Srihari, N. Sharma, and C. Singh, “Studies on energy efficient techniques for agricultural monitoring by wireless sensor networks,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 113, 2024, doi: 10.1016/j.compeleceng.2023.109052.
- [51] H. Yuan, J. Liu, C. Wang, S. Wang, and H. Cao, “Optimization of piezoelectric device with both mechanical and electrical properties for power supply of road sensors,” *Appl. Energy*, vol. 364, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123113.
- [52] A. Brighente, M. Conti, G. Di Renzone, G. Peruzzi, and A. Pozzebon, “Security and Privacy of Smart Waste Management Systems: A Cyber-Physical System Perspective,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 5, pp. 7309–7324, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3322532.
- [53] H. M. Almasacid, “Reliable and cost-efficient session provisioning in CRNs using spectrum sensing as a service,” *Ad Hoc Networks*, vol. 168, 2025, doi: 10.1016/j.adhoc.2024.103716.
- [54] D. Lu, X. Jiang, S. Zhang, and Z. Leng, “Aggregate Coated with Carbon Nanotube–Polymer Composites for Smart Asphalt Mixtures with Different Aggregate Gradations,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 37, no. 4, 2025, doi:

- 10.1061/jmcee7.mteng-19195.
- [55] F. P. Eka Putra, A. Muzayyin, and M. U. Mansyur, “ANALISIS KUALITAS LAYANAN ABSENSI BERBASIS FINGER BERDASARKAN Quality of Service,” *J. Inform.*, vol. 24, no. 1, pp. 17–25, 2024, doi: 10.30873/ji.v24i1.3949.
 - [56] C. Li, Y. Yuan, Z. Y. Zheng, D. Yang, and F. Y. Wang, “Blockchain-enabled Federated Learning: Models, Methods and Applications,” *Zidonghua Xuebao/Acta Autom. Sin.*, vol. 50, no. 6, pp. 1059–1085, 2024, doi: 10.16383/j.aas.c230336.
 - [57] A. H. Eyeleko, T. Feng, Y. Yan, and S. F. A. Ghilan, “Microaggregation-Based Defense Against Synonymous Linkages in IIoT Asset Tracking,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 24, pp. 39236–39275, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3417950.

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