

DESAIN IOT UNTUK SIMULASI MONITORING MIKROKLIMAT DAN IRIGASI ADAPTIF PADA BUDIDAYA PADI DISTRIK TANAH MIRING, MERAUKE

Rachmat¹⁾, Suwarjono²⁾, Syaiful Nugraha³⁾ Agus Prayitno⁴⁾

Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik – Universitas Musamus

Email: rachmat@unmus.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan rancangan perangkat smart farming padi berbasis Internet of Things (IoT) untuk pemantauan mikroklimat dan irigasi adaptif. Evaluasi dilakukan melalui simulasi 20 hari yang merepresentasikan skenario Distrik Tanah Miring, Kampung Waningsap Miraf (SP5), Kabupaten Merauke, dengan interval sampling 10 menit (2.880 record teoritis). Dataset sintetis dihasilkan menggunakan Python (NumPy, Pandas) dengan model siklus harian suhu dan kelembaban, hujan yang cukup lebat, dinamika kelembaban tanah berbasis akumulasi hujan dan irigasi serta faktor evapotranspirasi sederhana. Kondisi jaringan berupa kehilangan paket serta lonjakan latensi mempengaruhi performa perangkat ini. Arsitektur sistem mengikuti pendekatan berlapis (perception-network-application) menggunakan MQTT untuk telemetri, layanan backend modular (registri perangkat, ingestion, penyimpanan time-series, rule engine), dan dashboard pemantauan. Kontrol irigasi adaptif ini menerapkan aturan ambang ($\theta_{low}=0,40$; $\theta_{high}=0,52$) dengan durasi penyiraman 30 menit dan mekanisme berhenti saat kelembaban mencapai ambang atas. Hasil simulasi menunjukkan reliabilitas pengiriman 97,22% (2.800/2.880 record), latensi end-to-end rata-rata 2,18 detik dengan P95 3,60 detik, serta 80 eksekusi irigasi dengan durasi total 2.400 menit pada total hujan 138,62 mm (14 episode). Temuan ini menegaskan bahwa kombinasi desain IoT dan perangkat lunak dapat menghasilkan pipeline data yang stabil, terukur, dan mudah direplikasi, sekaligus menyediakan kontrol irigasi yang transparan untuk tahap validasi awal. Selain metrik performa, desain mencakup skema data terstandar, logging terstruktur, dan mekanisme retry sehingga mudah diintegrasikan dengan CI/CD dan pemeliharaan jangka panjang pada skala lahan yang lebih luas. Studi lanjutan diarahkan pada uji lapangan di SP5 untuk kalibrasi sensor, penetapan ambang berbasis fase tumbuh padi, dan evaluasi efisiensi air terhadap praktik irigasi konvensional.

Kata kunci: smart farming, IoT, perangkat lunak, irigasi adaptif

Abstract

This study proposes the design of an Internet of Things (IoT)-based smart rice farming device for microclimate monitoring and adaptive irrigation. The evaluation was conducted through a 20-day simulation representing conditions in Tanah Miring District, Waningsap Miraf Village (SP5), Merauke Regency, with a 10-minute sampling interval (2,880 theoretical records). A synthetic dataset was generated using Python (NumPy, Pandas), incorporating daily temperature and humidity cycle models, relatively heavy rainfall events, soil moisture dynamics based on rainfall and irrigation accumulation, and a simplified evapotranspiration factor. Network conditions, including packet loss and latency spikes, affected device performance. The system architecture follows a layered approach (perception-network-application), utilizing MQTT for telemetry, modular backend services (device registry, data ingestion, time-series storage, rule engine), and a monitoring dashboard. The adaptive irrigation control applies threshold-based rules ($\theta_{low} = 0.40$; $\theta_{high} = 0.52$) with a 30-minute watering duration and an automatic stop mechanism once soil moisture reaches the upper threshold. Simulation results demonstrate a transmission reliability of 97.22% (2,800/2,880 records), an average end-to-end latency of 2.18 seconds with a P95 of 3.60 seconds, and 80 irrigation executions with a total duration of 2,400 minutes under cumulative rainfall of 138.62 mm (14 events). These findings confirm that the integration of IoT hardware and software design can produce a stable, scalable, and easily replicable

data pipeline, while providing transparent irrigation control for early-stage validation. Beyond performance metrics, the design includes standardized data schemas, structured logging, and retry mechanisms, facilitating integration with CI/CD workflows and long-term maintenance at larger land scales. Future work will focus on field trials at SP5 for sensor calibration, growth-stage-based threshold determination for rice crops, and evaluation of water-use efficiency compared with conventional irrigation practices.

Keywords: smart farming, IoT, software, adaptive irrigation

PENDAHULUAN

Pemantauan kondisi lahan, iklim mikro, dan ketersediaan air secara real-time menjadi kunci untuk menjaga produktivitas dan efisiensi penggunaan air pada budidaya padi, terutama di kawasan lahan pangan baru seperti Kabupaten Merauke [1], [9]. Wilayah Distrik Tanah Miring, khususnya Kampung Waninggap Miraf (SP5), memiliki potensi pengembangan padi sawah, namun masih menghadapi tantangan keterbatasan data lapangan berkelanjutan, ketergantungan pada pengalaman petani, serta fluktuasi ketersediaan air irigasi. Kondisi ini membuat keputusan kapan menyalakan atau mematikan irigasi sering bersifat subjektif dan sulit dievaluasi kembali secara kuantitatif.

Berbagai penelitian smart farming berbasis Internet of Things (IoT) telah dikembangkan untuk memonitor lingkungan dan mengotomasi irigasi, tetapi banyak yang berhenti pada prototipe kecil dan belum menonjolkan aspek rekayasa perangkat lunak seperti modularitas layanan, pengelolaan identitas perangkat, pengujian, dan observabilitas sistem [2], [4]. Selain itu, studi-studi tersebut umumnya belum mengkaji metrik komunikasi seperti packet delivery ratio (PDR) dan latensi end-to-end secara eksplisit dalam konteks sawah padi di Merauke [10], [11].

Penelitian ini bertujuan merancang dan memvalidasi melalui simulasi sebuah arsitektur perangkat lunak dan IoT end-to-end

untuk pemantauan mikroklimat dan irigasi adaptif pada budidaya padi di SP5 Merauke. Tujuan khususnya adalah: (1) memodelkan dataset telemetri 20 hari dengan interval 10 menit yang merepresentasikan kondisi tipikal lapangan, dan (2) mengevaluasi performa pipeline data (PDR, latensi) serta perilaku data kontrol irigasi adaptif sebagai dasar perancangan uji lapangan berikutnya [9] [10], [11].

METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini melibatkan tiga tahapan utama yaitu desain arsitektur sistem, perangkaian kontrol sistem, dan desain simulasi lingkungan.

Arsitektur Sistem

Sistem terdiri dari: (a) perception layer (sensor/aktuator berbasis ESP32), (b) network layer (MQTT) [3], dan (c) application layer (backend modular: registry, ingestion, time-series storage, rule engine, dashboard) [7], [8].

Desain Simulasi & Evaluasi

Spesifikasi Dataset dan Skema Data. Untuk memastikan interoperabilitas dan kemudahan pemeliharaan, setiap record telemetri disusun dengan skema yang konsisten. Setiap record memuat: timestamp (ts), identitas perangkat (device_id), identitas petak (plot_id), variabel mikroklimat (t_air dan RH), variabel hidrologi (soil_moist dan rain_mm), status aktuator (irrigation_on), serta metrik jaringan (delivered dan latency_s). Skema ini memudahkan validasi payload di sisi ingestion, misalnya pengecekan kelengkapan

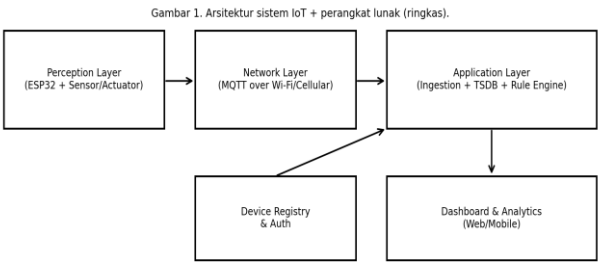
field wajib, rentang nilai wajar (sanity check), dan penolakan nilai kosong/NaN.

Selain itu, skema yang stabil mendukung versioning (perubahan terkontrol) ketika menambah sensor baru seperti pH, EC, atau ketinggian muka air. Pada implementasi end-to-end, payload dapat direpresentasikan sebagai JSON dan diturunkan ke tabel time-series dengan indeks berdasarkan ts dan device_id sehingga query historis, agregasi per jam/hari, dan analitik tren dapat dilakukan secara efisien [4], [9].

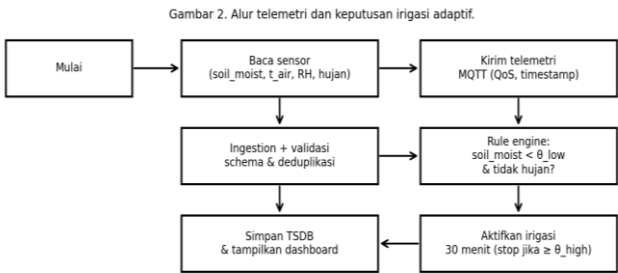
Pemodelan Kehilangan Data dan Ketahanan Pipeline. Kehilangan paket dan outage singkat dimodelkan untuk merepresentasikan kondisi komunikasi IoT di lingkungan pertanian yang sering berubah, misalnya sinyal lemah, interferensi, keterbatasan bandwidth, atau gangguan listrik pada node. Variabel delivered membedakan record yang diterima dan yang hilang sehingga PDR dapat dihitung secara objektif. Dari sudut pandang rekayasa perangkat lunak, pemodelan ini relevan untuk menguji kebutuhan non-fungsional (reliability) serta merancang mitigasi, seperti buffering lokal pada node/gateway, kebijakan retry terukur (misalnya backoff), dan deduplikasi di sisi server ketika terjadi pengiriman ulang. Dengan demikian, sistem tidak hanya berorientasi pada fungsi pemantauan, tetapi juga pada ketahanan operasi jangka panjang saat menghadapi kondisi jaringan yang fluktuatif [4], [6].

Prosedur Evaluasi dan Replikasi. Evaluasi dilakukan pada tiga aspek: (1) kualitas komunikasi (PDR serta statistik latensi end-to-end: mean, P95, dan maksimum), (2) stabilitas time-series (missing data dan konsistensi timestamp), dan (3) perilaku kontrol irigasi (jumlah event, durasi total, serta respons terhadap hujan). Dataset disimpan dalam format CSV agar analisis dapat direplikasi menggunakan perangkat lunak umum dan memungkinkan audit atas perhitungan metrik.

Untuk memperkuat reproduksibilitas, analisis disarankan mencatat versi skema data, parameter ambang θ_{low} dan θ_{high} , interval sampling, serta aturan keputusan. Pada studi lanjutan, prosedur evaluasi yang sama dapat diterapkan pada data lapangan SP5 sehingga hasil simulasi dapat dibandingkan secara langsung dengan kondisi nyata dan parameter dapat dikalibrasi [4], [9].



Gambar 1. Diagram Blok Arsitektur sistem IoT + perangkat lunak.



Gambar 2. Alur telemetri dan kontrol irigasi adaptif [10], [11].

Simulasi menghasilkan telemetri 20 hari dengan interval 10 menit (2.880 record teoritis), termasuk variabel suhu, RH, soil moisture, curah hujan, status irigasi, serta metrik jaringan (delivered dan latency). Evaluasi meliputi latensi end-to-end, packet delivery ratio (PDR), dan statistik soil moisture.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Ringkasan data simulasi 20 hari.

Metrik	Nilai
Durasi (hari)	20
Interval sampling (menit)	10
Record seharusnya	2880

Record diterima (delivered)	2800
Record hilang	80
Total hujan (mm)	138.62
Jumlah episode hujan	14
Jumlah eksekusi irigasi (event)	80
Durasi irigasi total (menit)	2400

Tabel 2. Latensi end-to-end (detik) pada record yang diterima.

Metrik	Nilai
Rata-rata (mean)	2.18
P95	3.60
Maksimum	12.30

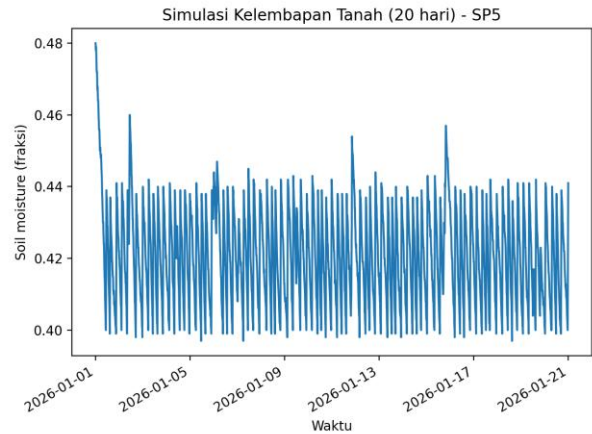
Tabel 3. Reliabilitas pengiriman (PDR).

Metrik	Nilai
PDR (%)	97.22

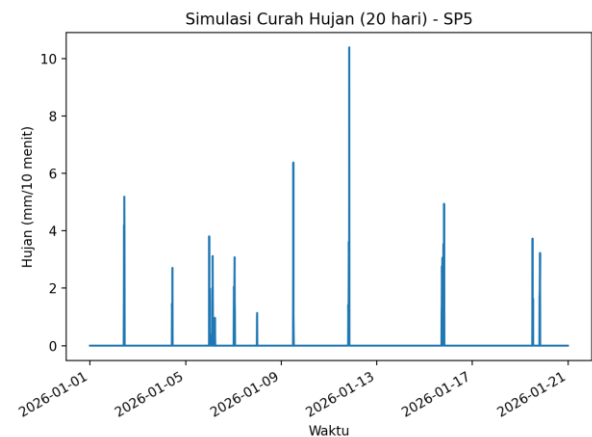
Tabel 4. Statistik soil moisture (fraksi).

Metrik	Nilai
Minimum	0.40
Rata-rata (mean)	0.42
Maksimum	0.48
Deviasi standar	0.01

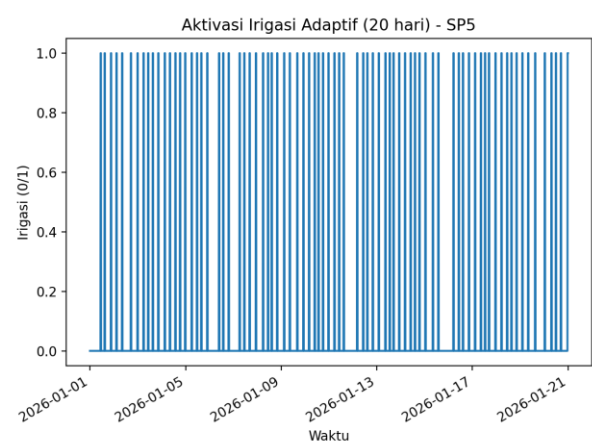
Latensi rata-rata 2,18 detik dan P95 3,60 detik menunjukkan pipeline ingestion dan dashboard dapat mendukung pemantauan near real-time. Nilai PDR 97,22% merepresentasikan kondisi jaringan dengan kehilangan paket sporadis. Pada skenario ini, mekanisme retry dan buffering direkomendasikan untuk menjaga integritas data. Mekanisme irigasi adaptif berbasis aturan menghasilkan 80 eksekusi irigasi, dengan pola aktivasi yang mengikuti kondisi soil moisture dan kejadian hujan simulatif. Temuan ini konsisten dengan karakteristik sistem sensor nirkabel yang memerlukan trade-off antara reliabilitas, latensi, dan konsumsi sumber daya [6], [7], [8], [10], [11].



Gambar 3. Tren kelembapan tanah (soil moisture) selama 20 hari (simulasi).



Gambar 4. Curah hujan per interval 10 menit selama 20 hari (simulasi).



Gambar 5. Aktivasi irigasi adaptif (0/1) selama 20 hari (simulasi) [10], [11].

Interpretasi Gambar 3–5. Visualisasi membantu menegaskan hubungan sebab-akibat antara hujan, penurunan kelembapan tanah akibat

evapotranspirasi, dan aktivasi irigasi berbasis aturan. Pada periode tanpa hujan, soil_moist cenderung turun secara bertahap hingga melewati θ_{low} ; ketika kondisi ini terjadi, rule engine memicu irigasi dan menaikkan kembali soil_moist. Sebaliknya, pada periode hujan, kenaikan soil_moist terjadi lebih cepat sehingga frekuensi aktivasi irigasi menurun. Pola ini menunjukkan bahwa rule engine mampu beradaptasi terhadap input lingkungan dan menjaga kelembapan tanah dalam rentang operasional, meskipun evaluasi masih bersifat simulatif dan belum menangkap seluruh kompleksitas lapangan seperti variasi tekstur tanah, drainase, dan perbedaan fase tumbuh tanaman [2], [9].

Analisis Kapasitas dan Skalabilitas. Dengan interval 10 menit, satu node menghasilkan 144 record per hari atau 2.880 record per 20 hari. Pada skenario multi-petak, misalnya 10 node, volume data meningkat menjadi 28.800 record untuk periode yang sama; pada 50 node menjadi 144.000 record. Implikasi rekayasa perangkat lunak dari skala ini adalah kebutuhan ingestion yang efisien, indeks pada penyimpanan time-series, serta strategi retensi data (misalnya agregasi per jam/hari dan kompresi) untuk menjaga performa dashboard. Pengukuran SLA sederhana seperti PDR harian dan P95 latensi per hari dapat digunakan untuk memantau degradasi kualitas layanan, sementara logging terstruktur membantu penelusuran akar masalah ketika terjadi lonjakan latensi atau kehilangan data yang meningkat [9].

Rekomendasi Implementasi Lapangan. Pada uji lapangan SP5, pengukuran kelembapan tanah sebaiknya melalui kalibrasi terhadap sampel tanah setempat (misalnya gravimetri atau sensor referensi) untuk mengurangi bias sensor. Selain itu, pencatatan tindakan irigasi manual, kondisi pintu air, dan jadwal pengairan lokal penting agar keputusan rule engine dapat dibandingkan dengan praktik petani. Untuk mengurangi

kehilangan data, perangkat dapat menyimpan buffer telemetri lokal ketika jaringan putus, lalu mengirim ulang saat koneksi pulih dengan deduplikasi di sisi server. Dari sisi keselamatan operasional, aktuator irigasi sebaiknya memiliki mode manual/fail-safe sehingga pengairan tetap dapat dilakukan ketika sistem IoT mengalami gangguan, serta menyediakan notifikasi ketika sensor tidak aktif melebihi ambang waktu tertentu [2], [7], [8].

Kualitas Data dan Reliabilitas Pipeline

Pada simulasi 20 hari dengan interval 10 menit, sistem menghasilkan 2.880 record teoritis. Dari jumlah tersebut, 2.800 record diterima oleh aplikasi (PDR 97,22%), sedangkan 80 record hilang akibat gangguan jaringan yang dimodelkan sebagai kombinasi outage singkat dan packet loss sporadis. Nilai ini mencerminkan kebutuhan desain ingestion yang tahan terhadap gangguan, misalnya dengan buffering lokal pada perangkat, kebijakan retry yang terukur, serta mekanisme deduplikasi di sisi server [4], [6].

Selain persentase paket yang diterima, konsistensi timestamp penting untuk analitik pertanian. Pada implementasi nyata, sinkronisasi waktu perangkat (NTP) dan penandaan waktu di sisi gateway/server perlu dibahas sebagai strategi mitigasi drift jam, terutama ketika keputusan irigasi bergantung pada jendela waktu operasional.

Analisis Latensi dan Implikasi Operasional

Latensi end-to-end rata-rata 2,18 detik (P95 3,60 detik; maksimum 12,30 detik) menunjukkan bahwa rantai publish-broker-ingestion-dashboard mampu menyediakan pemantauan near real-time. Latensi pada ekor distribusi (spike) umumnya berasal dari antrian pemrosesan, retransmisi, atau fluktuasi konektivitas. Oleh karena itu, observabilitas (logging terstruktur dan metrik) diperlukan untuk mengidentifikasi titik sempit pada broker,

ingestion, maupun penyimpanan time-series [6], [7], [8].

Dari sisi operasional, latensi beberapa detik masih dapat diterima untuk keputusan irigasi berbasis ambang, karena variabel kelembapan tanah berubah relatif lambat dibanding perubahan detik-ke-detik. Namun, latensi perlu dikendalikan agar notifikasi kondisi kritis (misalnya kegagalan pompa atau sensor tidak aktif) dapat ditangani cepat oleh operator lapangan.

Perilaku Rule Engine dan Sensitivitas Parameter

Rule engine menghasilkan 80 eksekusi irigasi dengan durasi total 2.400 menit. Pola aktivasi mengikuti penurunan soil_moist akibat evapotranspirasi dan kenaikan akibat hujan serta irigasi. Mekanisme henti-dini saat kelembapan mencapai ambang atas mencegah penyiraman berlebih pada interval berikutnya, sehingga kontrol tetap transparan dan mudah dijelaskan kepada pengguna.

Sensitivitas terhadap parameter ambang perlu diperhatikan. Ambang θ_{low} yang terlalu tinggi dapat meningkatkan frekuensi irigasi, sedangkan θ_{low} yang terlalu rendah berisiko membuat tanaman mengalami cekaman air. Pada uji lapangan, θ_{low} dan θ_{high} sebaiknya dikalibrasi berdasarkan karakteristik tanah setempat, fase pertumbuhan padi (misalnya vegetatif, generatif), dan strategi pengairan yang digunakan. Simulasi ini dapat dijadikan alat awal untuk memilih rentang parameter sebelum eksperimen lapangan yang lebih mahal [5], [2].

Implikasi Rekayasa Perangkat Lunak

Kontribusi utama dari perspektif rekayasa perangkat lunak adalah pemisahan tanggung jawab antar modul: registri perangkat mengelola identitas dan lokasi petak, ingestion memvalidasi serta menormalkan payload, penyimpanan time-series mengoptimalkan query historis, dan rule engine memusatkan logika kontrol. Pemisahan

ini meningkatkan maintainability karena perubahan pada satu modul (misalnya penambahan sensor pH atau EC) tidak memaksa perubahan menyeluruh pada sistem [4].

Untuk keberlanjutan, sistem perlu menerapkan praktik operasional seperti versioning skema data, pengujian otomatis untuk aturan irigasi, serta kontrol akses dasar (token perangkat dan otorisasi pengguna dashboard). Pada tahap implementasi, pipeline CI/CD dan pengukuran SLA (misalnya PDR harian dan P95 latensi) membantu menjaga kualitas layanan ketika jumlah node meningkat pada skala kelompok tani atau beberapa petak sawah [4].

Keterbatasan Studi Simulasi

Studi ini menggunakan data sintetis sehingga tidak menangkap seluruh kompleksitas lapangan, seperti variasi tekstur tanah, pengaruh salinitas, kondisi drainase, ketidakpastian pembacaan sensor murah, serta intervensi manusia (pembukaan pintu air manual). Model evapotranspirasi yang digunakan juga bersifat sederhana dan belum memanfaatkan faktor radiasi matahari, angin, atau referensi evapotranspirasi (ET0). Tantangan keberlanjutan implementasi smart farming dan kualitas sensor lapangan juga sering dilaporkan pada studi pustaka IoT pertanian [2] [5], [9].

Meski demikian, simulasi tetap bermanfaat untuk memvalidasi arsitektur perangkat lunak, menghitung kapasitas data, dan menguji stabilitas pipeline end-to-end sebelum pengambilan data lapangan. Dengan menyatakan batasan ini secara eksplisit, hasil penelitian tetap dapat diposisikan sebagai validasi desain awal yang replikatif.

Rencana Uji Lapangan di SP5

Tahap berikutnya adalah uji lapangan di petak padi SP5 (Waningsap Miraf) dengan minimal satu node sensor dan satu aktuator irigasi. Protokol pengambilan data mencakup kalibrasi sensor kelembapan tanah terhadap sampel tanah

setempat, pencatatan fase tumbuh padi, serta pencatatan tindakan irigasi manual sebagai pembanding. Evaluasi lanjutan dapat memasukkan metrik efisiensi air (durasi irigasi dan volume), kestabilan jaringan di lokasi, serta studi kegunaan dashboard pada petani/penyuluh [2].

Dengan data lapangan, penelitian dapat diperluas menuju rekomendasi irigasi berbasis penjadwalan adaptif dan notifikasi prediktif, serta menguji generalisasi parameter pada beberapa petak dengan kondisi tanah berbeda di wilayah Tanah Miring.

4. Kesimpulan

Studi simulasi ini menunjukkan bahwa arsitektur perangkat lunak IoT yang modular (MQTT + backend layanan + time-series storage + dashboard) dapat memberikan latensi rendah dan reliabilitas pengiriman yang cukup tinggi, serta memungkinkan kontrol irigasi adaptif yang transparan. Pekerjaan lanjutan adalah melakukan uji lapangan pada petak padi di SP5 dengan durasi waktu yang lebih lama untuk memvalidasi parameter ambang dan dampak efisiensi air.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Ambarwari, D. K. Widyawati, and A. Wahyudi, "Sistem Pemantau Kondisi Lingkungan Pertanian Tanaman Pangan dengan NodeMCU ESP8266 dan Raspberry Pi Berbasis IoT," *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)*, vol. 5, no. 3, pp. 496–503, Jun. 2021, doi: 10.29207/resti.v5i3.3037.
- [2] S. U. Haj, R. T. Adek, and R. Suwanda, "Implementasi Sistem Irigasi Berbasis Internet of Things (IoT) Untuk Optimasi Penggunaan Air Pada Pertanian," *METIK Jurnal*, vol. 9, no. 2, pp. 338–347, 2025, doi: 10.47002/metik.v9i2.1123.
- [3] OASIS, "MQTT Version 3.1.1," OASIS Standard, Oct. 2014. [Online]. Available: [https://docs.oasis-](https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html)
- [open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html](https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html)
- [4] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trincherro, and M. Fossa, "Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2647, 2024, doi: 10.3390/s24082647.
- [5] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [6] P. S. R. D. Prasad and P. Agrawal, "Applications of Wireless Sensor Networks: An Up-to-Date Survey," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 11, 2015, Art. no. 686361, doi: 10.1155/2015/686361.
- [7] I. Islamy and L. M. Wisudawati, "Sistem Monitoring Smart Garden Tanaman Cabai Berbasis IoT Menggunakan Protokol MQTT, Node Red, dan Telegram Bot," *TEKNOTAN: Jurnal Industri Teknologi Pertanian*, vol. 17, no. 3, pp. 197–206, Dec. 2023, doi: 10.24198/jt.vol17n3.6.
- [8] Fauzi and Amarudin, "Internet of Things and Web Integration for Real-Time Monitoring and Control of Tates Irrigation / Integrasi Internet of Things dan Web untuk Monitoring Kendali Irigasi Tates Secara Real Time," *MALCOM: Indonesian Journal of Machine Learning and Computer Science*, vol. 5, no. 4, pp. 1481–1489, Oct. 2025, doi: 10.57152/malcom.v5i4.2298.
- [9] A. Abi Hassan, R. M. Rashid, N. A. M. Azmi, and M. H. Anisi, "Internet of Things in Agriculture: A Systematic Review of Current Challenges and Future Directions," *Journal of Social and Management Sciences*, vol. 14, no. 9, pp. 59–76, 2024.
- [10] N. A. Purnama, R. Abyakto, M. G. N. Rosyid, D. R. Irfawan, M. Soli, and D. Aribowo, "IoT-Based Irrigation Control System with ESP32 for Sustainable

Agriculture," Mars: Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro dan Ilmu Komputer, vol. 2, no. 6, pp. 211–224, 2024, doi: 10.61132/mars.v2i6.556.

- [11] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, "IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture," Sensors, vol. 20, no. 4, p. 1042, 2020, doi: 10.3390/s20041042.