KAMPUS AKADEMIK PUBLISING
Jurnal Sains Student Research (JSSR)
Vol.4, No.6 Desember 2026
e-ISSN: 3025-9851, p-ISSN : 3025-986X, Hal 193-205
DOI : https://doi.org/10.61722/jssr.v4i6.12831

Rancang Bangun Gateway Edge Berbasis Raspberry Pi Zero 2W Dengan Komunikasi LoRa SX1278 Untuk Prediksi Dan Pengendalian Penyiraman Tanaman Menggunakan TinyML

Habib Hamdi Mufid[1*], Mhd. Basri[2]
[1,2] Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Ilmu Komputer Dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) Jl. Kapten Muchtar Basri No.3, Glugur Darat II, Kec. Medan Tim., Kota Medan, Sumatera Utara, Indonesia, 20238
*Penulis Korespondensi: habibbiba19@gmail.com

Abstract. *Manual irrigation systems in household-scale agriculture have limitations in dynamically and real-time monitoring plant environmental conditions. This research designs and builds a Raspberry Pi Zero 2W-based edge gateway system with LoRa SX1278 communication for plant watering prediction and control using TinyML, with mint plants (Mentha sp.) as the test subject. An ESP32-based sensor node reads five environmental parameters including soil moisture, air temperature, air humidity, air pressure, and light intensity, then transmits data to the edge gateway via point-to-point LoRa SX1278 communication. The edge gateway runs Random Forest TinyML model inference locally using the joblib library without requiring internet connection or cloud services. The model was trained using a synthetic dataset of 1,200 balanced samples across three plant condition classes: Dry, Normal, and Wet. Test results show the Random Forest model achieved 99.17% accuracy with average precision, recall, and F1-score of 0.9919, 0.9917, and 0.9917 respectively. LoRa communication testing at two different locations in Medan City showed 0% packet loss at all test points up to ±100 meters. The pump control system successfully activated the pump automatically with a 75% success rate and response time under 2 seconds. A Flask 3.1.3-based web dashboard successfully provides real-time monitoring and pump control via local WiFi network without internet connection.*

Keywords: *Edge Gateway; LoRa SX1278; TinyML; Random Forest; Raspberry Pi Zero 2W; ESP32; Smart Farming*

Abstrak. Sistem irigasi manual pada pertanian skala rumah tangga memiliki keterbatasan dalam memantau kondisi lingkungan tanaman secara dinamis dan real-time. Penelitian ini merancang dan membangun sistem gateway edge berbasis Raspberry Pi Zero 2W dengan komunikasi LoRa SX1278 untuk prediksi dan pengendalian penyiraman tanaman menggunakan TinyML, dengan tanaman mint (Mentha sp.) sebagai objek pengujian. Node sensor berbasis ESP32 membaca lima parameter lingkungan yaitu kelembaban tanah, suhu udara, kelembaban udara, tekanan udara, dan intensitas cahaya, kemudian mengirimkan data ke gateway edge melalui komunikasi LoRa SX1278 secara point-to-point. Gateway edge menjalankan inferensi model Random Forest berbasis TinyML secara lokal menggunakan library joblib tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud. Model dilatih menggunakan dataset synthetic 1.200 sampel yang terdistribusi seimbang ke dalam tiga kelas kondisi tanaman yaitu Kering, Normal, dan Basah. Hasil pengujian menunjukkan model Random Forest mencapai akurasi 99,17% dengan nilai precision, recall, dan F1-score rata-rata masing-masing sebesar 0,9919, 0,9917, dan 0,9917. Pengujian komunikasi LoRa di dua lokasi berbeda di Kota Medan menunjukkan packet loss 0% pada seluruh titik pengujian hingga jarak ±100 meter. Sistem kendali pompa berhasil mengaktifkan pompa secara otomatis dengan tingkat keberhasilan 75% dan waktu respons kurang dari 2 detik. Web dashboard berbasis Flask 3.1.3 berhasil menyajikan monitoring real-time dan kendali pompa melalui jaringan WiFi lokal tanpa koneksi internet.

Kata kunci: Gateway Edge; LoRa SX1278; TinyML; Random Forest; Raspberry Pi Zero 2W; ESP32; Smart Farming

Naskah Masuk:11 September 2026; Revisi: 12 September 2026; Diterima: 13 September 2026; Terbit: 26 September 2026

1. LATAR BELAKANG

Kondisi cuaca dan air tanah sangat menentukan operasi pertanian seperti penjadwalan irigasi. Untuk memantau kondisi tersebut secara akurat dan terjangkau, stasiun pemantauan pertanian berbiaya rendah dan sumber terbuka merupakan alternatif yang muncul untuk stasiun pemantauan yang tersedia secara komersial karena sering kali dibangun dari komponen menggunakan platform dan teknologi sumber terbuka dan swakarya (Dafonte et al., 2024).

Hadirnya teknologi Internet of Things (IoT), dimana setiap benda dapat diidentifikasi secara unik, dilengkapi dengan sensor dan terhubung secara real-time ke internet, dapat berkontribusi secara signifikan untuk memenuhi tantangan ini (Boralkar & Kulkarni, 2024). Penerapan konsep IoT pada pertanian ini dikenal dengan istilah smart farming (sistem pertanian cerdas) (Ambarwari et al., 2021). Dalam penerapan sistem pertanian cerdas, pemilihan algoritma machine learning yang tepat menjadi faktor krusial dalam menghasilkan prediksi yang akurat. Penelitian (Basri, 2025) membuktikan bahwa algoritma Random Forest menunjukkan performa yang unggul dibandingkan algoritma lainnya dalam tugas klasifikasi, dengan kemampuan menangani hubungan non-linear yang kompleks serta menghasilkan nilai akurasi, recall, dan F1-score yang optimal.

Seiring dengan berkembangnya teknologi IoT dalam bidang pertanian, muncul pendekatan komputasi baru yang disebut edge computing untuk meningkatkan efisiensi pemrosesan data sensor. Model komputasi edge memungkinkan pemrosesan data sensor dilakukan secara lokal di perangkat tepi jaringan, sehingga mengurangi ketergantungan terhadap layanan cloud. Model ini berperan sebagai perantara antara perangkat IoT dan layanan cloud sehingga mampu mengurangi beban pemrosesan komputasi intensif pada server cloud. Server yang berada pada jaringan tepi lokal menjalankan algoritma komputasi yang telah dikembangkan. Dengan menghindari proses transmisi data secara penuh ke cloud, sistem dapat mengurangi latensi, mempercepat waktu respons, serta menghemat daya komputasi, sehingga meningkatkan efisiensi transfer data. Model komputasi edge yang diusulkan diimplementasikan pada perangkat Raspberry Pi sebagai edge device (Premkumar & Sigappi, 2022).

Namun demikian, sistem IoT berbasis Wi-Fi maupun teknologi seluler seperti 3G/4G yang umumnya digunakan pada sistem pemantauan pertanian memiliki keterbatasan tersendiri. Teknologi seluler mampu menyediakan jangkauan yang luas namun mengonsumsi daya yang terlalu besar untuk diterapkan pada node sensor lapangan yang bersifat mandiri energi (Enock et al., 2025). Di sisi lain, stasiun pemantauan pertanian berbiaya rendah berbasis sumber terbuka muncul sebagai alternatif yang menjanjikan, karena dibangun dari komponen menggunakan platform dan teknologi swakarya yang fleksibel (Dafonte et al., 2024). Dalam konteks ini, teknologi Low Power Wide Area (LPWA) seperti LoRa hadir sebagai solusi komunikasi yang paling sesuai untuk pertanian cerdas, karena menawarkan transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya rendah dan biaya implementasi yang terjangkau (Enock et al., 2025).

Dengan terpenuhinya kebutuhan komunikasi lapangan melalui teknologi LoRa, tantangan berikutnya adalah bagaimana gateway edge mampu memproses data sensor secara lokal dan mengambil keputusan penyiraman secara cerdas tanpa bergantung pada cloud. Untuk menjawab tantangan ini, diterapkan pendekatan Tiny Machine Learning (TinyML) pada gateway edge. Pendekatan ini berpotensi mentransformasi praktik pertanian melalui penerapan manajemen air yang presisi dan efisien, bahkan pada wilayah terpencil dengan keterbatasan akses internet (Baseca et al., 2025). Teknologi ini memungkinkan pemrosesan data secara lokal di perangkat tanpa perlu mengirimkannya

ke cloud. Selain itu, TinyML memungkinkan inferensi model ML, termasuk model DL, di perangkat sebagai mikrokontroler yang memiliki sumber daya terbatas (Alajlan & Ibrahim, 2022).

Penerapan TinyML pada sistem pertanian cerdas membutuhkan perangkat gateway yang mampu menjalankan inferensi model secara lokal sekaligus mengelola komunikasi dengan node sensor di lapangan. Raspberry Pi telah terbukti menjadi pilihan yang dominan sebagai perangkat komputasi di berbagai aplikasi pertanian presisi, mencakup fungsi pemantauan lingkungan, kendali aktuator, hingga pemrosesan data di sisi edge (Joice et al., 2025). Penelitian sebelumnya di Indonesia juga telah membuktikan bahwa Raspberry Pi mampu berperan sebagai mikrokomputasi yang mengintegrasikan data dari berbagai sensor lingkungan, kemudian mengeksekusi keputusan kendali secara otomatis berdasarkan ambang batas yang telah ditetapkan, seperti mengaktifkan sistem penyiraman ketika kondisi lingkungan berada di luar batas optimal (Bafdal et al., 2022). Namun demikian, penelitian tersebut masih mengandalkan koneksi cloud untuk penyimpanan dan visualisasi data, sehingga sistem belum sepenuhnya bersifat mandiri. Pemilihan algoritma Random Forest sebagai model TinyML pada penelitian ini didasarkan pada bukti empiris yang menunjukkan bahwa Random Forest secara konsisten menghasilkan performa klasifikasi yang unggul dibandingkan algoritma lainnya, dengan nilai akurasi, *precision*, *recall*, dan *F1-score* yang optimal pada berbagai tugas klasifikasi (Basri, 2025). Pada penelitian ini, Raspberry Pi Zero 2W dikembangkan lebih lanjut sebagai gateway edge yang menjalankan model TinyML secara lokal untuk memprediksi kebutuhan air tanaman, sehingga seluruh proses pengambilan keputusan penyiraman dapat dilakukan di sisi edge tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud.

Berdasarkan uraian permasalahan dan kajian penelitian terdahulu yang telah dipaparkan, penelitian ini mengusulkan rancang bangun gateway edge berbasis Raspberry Pi Zero 2W dengan komunikasi LoRa SX1278 untuk prediksi dan pengendalian penyiraman tanaman menggunakan TinyML. Sistem yang dibangun mengintegrasikan node sensor berbasis ESP32 yang membaca lima parameter lingkungan yaitu kelembaban tanah, suhu udara, kelembaban udara, tekanan udara, dan intensitas cahaya, yang dikirimkan ke gateway edge melalui komunikasi LoRa SX1278 secara point-to-point. Gateway edge Raspberry Pi Zero 2W menjalankan model Random Forest secara lokal untuk mengklasifikasikan kondisi kebutuhan air tanaman ke dalam tiga kelas yaitu Kering, Normal, dan Basah, kemudian mengirimkan hasil prediksi kembali ke node sensor ESP32 untuk mengeksekusi kendali pompa air mini secara otomatis. Seluruh proses berlangsung sepenuhnya di sisi edge tanpa ketergantungan pada koneksi internet maupun layanan cloud, sehingga sistem dapat beroperasi secara mandiri bahkan di lokasi terpencil yang tidak terjangkau infrastruktur internet.

2. KAJIAN TEORITIS

A. Pertanian Cerdas (Smart Farming)

Pertanian cerdas atau smart farming merupakan pendekatan modern dalam pengelolaan pertanian yang memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan sistem pertanian. Konsep ini lahir dari kebutuhan untuk mengatasi keterbatasan metode pertanian tradisional yang mengandalkan pengamatan manual dan keputusan berbasis intuisi petani. Smart farming mengintegrasikan berbagai teknologi modern seperti sensor, aktuator, komunikasi nirkabel, dan algoritma kecerdasan buatan dalam satu ekosistem yang terhubung.

B. Internet of Things (IoT) dalam Pertanian

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang memungkinkan

setiap objek fisik untuk diidentifikasi secara unik, dilengkapi dengan sensor, dan terhubung secara *real-time* ke internet sehingga dapat saling berkomunikasi dan bertukar data tanpa intervensi manusia. Dalam konteks pertanian, IoT berperan sebagai infrastruktur teknologi utama yang menghubungkan sensor-sensor di lapangan dengan sistem pemrosesan dan pengambilan keputusan. Hadirnya teknologi IoT dapat berkontribusi secara signifikan dalam memenuhi tantangan pertanian modern, karena memungkinkan pemantauan dan pengendalian sistem pertanian dari mana saja dan kapan saja sehingga diperoleh data yang akurat dan terkini (Boralkar & Kulkarni, 2024).

C. LoRa SX1278

LoRa (*Long Range*) adalah teknologi modulasi radio yang dikembangkan oleh Semtech Corporation berbasis teknik modulasi *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Teknik modulasi CSS bekerja dengan menyebarkan sinyal data pada rentang frekuensi yang lebih lebar dari yang dibutuhkan, sehingga menghasilkan sinyal yang sangat tahan terhadap interferensi dan noise elektromagnetik. Karakteristik ini memungkinkan perangkat LoRa untuk mendeteksi dan mendekode sinyal bahkan ketika kekuatan sinyal berada di bawah noise floor, yang merupakan keunggulan fundamental dibandingkan teknologi radio konvensional. Dalam kondisi ideal, teknologi LoRa mampu mencapai jarak transmisi lebih dari 6 km di area terbuka dengan konsumsi daya yang sangat rendah (Enock et al., 2025).

D. Raspberry Pi Zero 2W sebagai Edge Device

Raspberry Pi Zero 2W adalah komputer papan tunggal (*single-board computer* / SBC) berukuran sangat kompak yang dikembangkan oleh Raspberry Pi Foundation dan dirilis secara resmi pada 28 Oktober 2021. Perangkat ini dibangun di atas chip *System-in-Package* (SiP) RP3A0 yang mengintegrasikan prosesor quad-core ARM Cortex-A53 berkecepatan 1 GHz dengan memori RAM sebesar 512 MB LPDDR2 SDRAM dalam satu paket yang sangat kecil berukuran 65 mm × 30 mm. Meskipun memiliki dimensi yang sangat minimalis, konfigurasi hardware ini memberikan performa komputasi hingga lima kali lebih tinggi dibandingkan pendahulunya Raspberry Pi Zero generasi pertama yang hanya memiliki prosesor single-core (Jeya Agastin K et al., 2025).

E. Tiny Machine Learning (TinyML)

Tiny Machine Learning (TinyML) merupakan paradigma dalam kecerdasan buatan yang berfokus pada penerapan model machine learning di perangkat dengan sumber daya komputasi sangat terbatas seperti mikrokontroler, prosesor embedded, dan perangkat IoT berdaya rendah. Berbeda dengan machine learning konvensional yang membutuhkan infrastruktur besar seperti server GPU atau layanan cloud, TinyML memungkinkan inferensi model dilakukan sepenuhnya secara lokal di perangkat tanpa mengirimkan data ke cloud (Alajlan & Ibrahim, 2022). TinyML lahir dari konvergensi tiga tren teknologi yaitu meningkatnya efisiensi algoritma machine learning, berkembangnya perangkat keras embedded yang semakin powerful namun tetap hemat daya, serta tersedianya framework optimasi model yang mampu mengompres model berukuran besar tanpa kehilangan akurasi secara signifikan.

3. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian dimulai dari studi literatur untuk membangun landasan teori yang kuat, dilanjutkan dengan perancangan sistem secara menyeluruh mencakup hardware dan software, pengumpulan dan pengolahan dataset, pelatihan model Random Forest, penyimpanan model menggunakan joblib, deployment pada gateway edge, hingga pengujian sistem secara terintegrasi. Sistem yang dirancang pada penelitian ini terdiri dari dua komponen utama yang saling terhubung melalui komunikasi nirkabel LoRa SX1278,

yaitu node sensor berbasis ESP32 dan gateway edge berbasis Raspberry Pi Zero 2W. Node sensor pada penelitian ini dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 yang dilengkapi dengan expansion board untuk memudahkan koneksi antar komponen. Gateway edge pada penelitian ini dirancang menggunakan Raspberry Pi Zero 2W yang menjalankan sistem operasi Raspberry Pi OS Lite. Perancangan dataset dan model TinyML dijalankan langsung pada Raspberry Pi Zero 2W menggunakan bahasa pemrograman Python. Program yang berjalan pada node sensor ESP32 dirancang menggunakan bahasa pemrograman C++ dengan framework Arduino IDE. Parameter yang diukur pada pengujian komunikasi LoRa SX1278 meliputi *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) sebagai indikator kekuatan sinyal penerima, *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) sebagai indikator kualitas sinyal terhadap noise, dan *packet loss rate* sebagai indikator persentase paket data yang gagal diterima.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Dataset dan Model TinyML

Hasil Pengumpulan Dataset

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini merupakan dataset synthetic yang dibangkitkan secara komputasional menggunakan library NumPy pada lingkungan Python. Dataset terdiri dari 1.200 sampel yang terbagi secara seimbang ke dalam tiga kelas yaitu 400 sampel kelas Kering, 400 sampel kelas Normal, dan 400 sampel kelas Basah. Setiap sampel memiliki lima fitur input yaitu kelembaban tanah (Soil), suhu udara (Suhu), kelembaban udara (Humidity), tekanan udara (Pressure), dan intensitas cahaya (Light), serta satu label output yang merepresentasikan kondisi kebutuhan air tanaman. Dataset disimpan dalam file dataset_sensorv1.csv dengan separator titik koma dan dibangkitkan menggunakan seed tetap (seed=42) untuk menjamin reproducibility.

Tabel 1. Statistik Deskriptif Dataset

Parameter	Min	Max	Mean	Std Dev
Soil	200	799	509,88	165,05
Suhu (°C)	18,0	38,0	27,93	4,99
Humidity (%)	30,1	94,9	64,19	16,98
Pressure (hPa)	1000,0	1024,9	1011,94	6,14
Light (lux)	504	49.957	16.795,71	13.502,81

Hasil Preprocessing Data

Tahapan preprocessing dilakukan untuk mempersiapkan dataset sebelum digunakan dalam proses pelatihan model. Preprocessing dilakukan menggunakan library pandas dan scikit-learn pada lingkungan Python. Langkah pertama adalah pemisahan fitur dan label. Lima kolom yaitu Soil, Suhu, Humidity, Pressure, dan Light ditetapkan sebagai fitur input (X), sedangkan kolom Label yang berisi tiga kelas yaitu Kering, Normal, dan Basah ditetapkan sebagai target output (y). Hasil pengecekan missing value menunjukkan bahwa dataset tidak mengandung nilai kosong pada seluruh kolom fitur maupun kolom label sehingga tidak diperlukan penanganan data hilang dan dataset siap digunakan langsung untuk proses selanjutnya.

Langkah kedua adalah pembagian dataset menggunakan teknik stratified splitting dengan rasio 80:20 melalui fungsi train_test_split dari library scikit-learn dengan parameter stratify=y dan random_state=42. Teknik stratified splitting memastikan distribusi ketiga kelas tetap proporsional pada data latih maupun data uji. Dari total 1.200 sampel, sebanyak 960 sampel digunakan sebagai data latih dan 240 sampel digunakan sebagai data uji.

Tabel 2. Hasil Pembagian Dataset

Kelas	Data Latih	Data Uji	Total
Kering	320	80	400
Normal	320	80	400
Basah	320	80	400
Total	**960**	**240**	**1.200**

Hasil Training Model Random Forest

Tabel 3. Hasil Evaluasi Model Random Forest

Kelas	Precision	Recall	F1-Score	Support
Kering	1,0000	1,0000	1,0000	80
Normal	1,0000	0,9750	0,9873	80
Basah	0,9756	1,0000	0,9877	80
Rata-rata	**0,9919**	**0,9917**	**0,9917**	**240**

Tabel 4. Confusion Matrix Model Random Forest

Aktual \ Prediksi	Kering	Normal	Basah
Kering	**80**	0	0
Normal	0	**78**	2
Basah	0	0	**80**

Berdasarkan confusion matrix pada Tabel di atas, terdapat 2 sampel kelas Normal yang salah diklasifikasikan sebagai kelas Basah. Kesalahan klasifikasi ini terjadi pada zona batas antara kelas Normal dan Basah di mana nilai fitur kedua kelas saling tumpang tindih (overlapping), khususnya pada nilai kelembaban tanah (Soil) dan kelembaban udara (Humidity) yang berada di rentang perbatasan kedua kelas. Meskipun demikian, kesalahan ini tidak berdampak pada keputusan kendali pompa karena kondisi Normal dan Basah sama-sama menghasilkan aksi pompa OFF.

Tabel 5. Feature Importance Model Random Forest

Peringkat	Fitur	Importance
1	Soil	0,3742
2	Humidity	0,2571
3	Light	0,2286
4	Suhu	0,1131
5	Pressure	0,0270

Fitur Soil (kelembaban tanah) menempati peringkat pertama dengan nilai importance 0,3742, menunjukkan bahwa kelembaban tanah merupakan parameter paling dominan dalam menentukan kondisi kebutuhan air tanaman. Fitur Humidity dan Light menempati peringkat kedua dan ketiga, sedangkan fitur Pressure memiliki kontribusi paling kecil namun tetap dipertahankan sebagai fitur input karena memberikan informasi kondisi atmosfer yang relevan terhadap laju evapotranspirasi tanaman.

Hasil Deployment Model dengan Joblib

Setelah proses pelatihan dan evaluasi model selesai, model Random Forest disimpan ke dalam file model_rf.pkl menggunakan library joblib. Format .pkl (pickle) dipilih karena mampu menyimpan seluruh objek model scikit-learn beserta parameter dan struktur pohon keputusannya secara lengkap, sehingga model dapat dimuat kembali tanpa perlu melakukan pelatihan ulang.

File model_rf.pkl kemudian dipindahkan ke Raspberry Pi Zero 2W dan ditempatkan pada direktori ~/smart-farming bersama file gateway.py. Saat program gateway.py dijalankan, model dimuat ke dalam memori menggunakan perintah

joblib.load() dan siap digunakan untuk inferensi secara lokal tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud.

Proses inferensi dilakukan setiap kali gateway edge menerima paket data dari node sensor ESP32 melalui komunikasi LoRa SX1278. Data kelima fitur sensor yang diterima disusun ke dalam format array NumPy kemudian dimasukkan ke dalam model untuk menghasilkan prediksi kelas kondisi tanaman. Hasil prediksi berupa salah satu dari tiga label yaitu Kering, Normal, atau Basah kemudian dikirimkan kembali ke node sensor ESP32 melalui LoRa SX1278 sebagai perintah kendali pompa.

Hasil deployment menunjukkan model Random Forest berhasil dimuat dan berjalan pada Raspberry Pi Zero 2W dengan hasil prediksi yang konsisten dan identik dengan hasil evaluasi pada lingkungan pelatihan, membuktikan bahwa proses serialisasi dan deserialisasi model menggunakan joblib berjalan dengan sempurna.

B. Hasil Pengujian Sistem

Hasil Pengujian Komunikasi LoRa

Tabel 6. Hasil Pengujian Komunikasi LoRa — Lokasi 1 (Gg. Dempo)

Titik	Jarak (m)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Paket Terkirim	Paket Diterima
1	±10	-76	9.50	1	1
2	±20	-83	9.75	1	1
3	±30	-88	9.50	1	1
4	±40	-99	8.00	1	1
5	±50	-103	6.50	1	1
6	±60	-111	-5.25	1	1

Tabel 7. Hasil Pengujian Komunikasi LoRa — Lokasi 2 (Jl. Majelis Ulama)

Titik	Jarak (m)	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Paket Terkirim	Paket Diterima
1	±10	-81	10.00	1	1
2	±20	-91	9.75	1	1
3	±30	-88	9.50	1	1
4	±40	-95	9.50	1	1
5	±50	-94	9.50	1	1
6	±60	-103	6.50	1	1
7	±70	-105	7.00	1	1
8	±80	-112	-1.00	1	1
9	±90	-113	-3.75	1	1
10	±100	-105	5.75	1	1

Berdasarkan kedua Tabel di atas, seluruh paket data berhasil diterima gateway edge pada semua titik jarak di kedua lokasi pengujian dengan packet loss 0%. Nilai RSSI menunjukkan tren melemah seiring bertambahnya jarak, dari -76 dBm pada jarak ±10 meter di lokasi 1 dan -81 dBm pada jarak ±10 meter di lokasi 2, hingga masing-masing -111 dBm dan -113 dBm pada titik terjauh. Nilai SNR berada di atas 0 dB pada jarak ±10 hingga ±70 meter yang menunjukkan kualitas sinyal baik, sedangkan pada jarak ±80 meter ke atas nilai SNR mulai negatif namun paket data masih berhasil diterima karena teknologi LoRa menggunakan modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) yang mampu mendekodekan sinyal pada kondisi SNR negatif hingga -20 dB.

Hasil Pengujian Akurasi Model TinyML

Tabel 8. Hasil Pengujian Akurasi Model Random Forest

Kelas	Precision	Recall	F1-Score	Support
Kering	1,0000	1,0000	1,0000	80

Normal	1,0000	0,9750	0,9873	80
Basah	0,9756	1,0000	0,9877	80
Rata-rata	0,9919	0,9917	0,9917	240
Akurasi Keseluruhan			99,17%	240

Hasil pengujian pada Tabel di atas menunjukkan model Random Forest mencapai akurasi keseluruhan sebesar 99,17%, yang berarti model berhasil mengklasifikasikan 238 dari 240 sampel data uji secara benar. Kelas Kering mencapai nilai sempurna pada seluruh metrik evaluasi dengan precision, recall, dan F1-score masing-masing sebesar 1,0000. Kelas Normal mencapai precision 1,0000 namun recall 0,9750 karena terdapat 2 sampel yang salah diklasifikasikan sebagai kelas Basah. Kelas Basah mencapai recall sempurna 1,0000 namun precision 0,9756 sebagai dampak dari 2 sampel Normal yang masuk ke prediksi Basah.

Tabel 9. Confusion Matrix Hasil Pengujian Model

Aktual \ Prediksi	Kering	Normal	Basah
Kering	80	0	0
Normal	0	78	2
Basah	0	0	80

Berdasarkan Tabel di atas, terdapat 2 sampel kelas Normal yang salah diklasifikasikan sebagai kelas Basah. Kesalahan ini terjadi pada zona batas antara kelas Normal dan Basah di mana nilai fitur kedua kelas saling tumpang tindih, khususnya pada nilai kelembaban tanah (Soil) dan kelembaban udara (Humidity). Meskipun demikian, kesalahan klasifikasi ini tidak berdampak pada keputusan kendali pompa karena kondisi Normal dan Basah sama-sama menghasilkan aksi pompa OFF. Hasil pengujian menunjukkan model Random Forest yang di-deploy menggunakan joblib pada Raspberry Pi Zero 2W mampu menjalankan inferensi TinyML secara lokal dengan akurasi tinggi tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud.

Hasil Pengujian Kendali Pompa

Tabel 10. Hasil Pengujian Kendali Pompa

No	Lokasi	Jarak (m)	Prediksi	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Pompa	Status
1	Gg. Dempo	±10	Kering	-76	9.50	Tidak menyala	Kendala relay ⚠️
2	Gg. Dempo	±20	Kering	-83	9.75	Menyala	Berhasil ✅
3	Gg. Dempo	±30	Normal	-99	8.00	Tidak menyala	Normal ✅
4	Gg. Dempo	±40	Normal	-101	7.75	Tidak menyala	Normal ✅
5	Gg. Dempo	±50	Normal	-106	4.50	Tidak menyala	Normal ✅
6	Gg. Dempo	±60	Kering	-111	-5.25	Menyala	Berhasil ✅
7	Jl. Majelis Ulama	±10	Normal	-81	10.00	Tidak menyala	Normal ✅
8	Jl. Majelis Ulama	±20	Normal	-91	9.75	Tidak menyala	Normal ✅

9	Jl. Majelis Ulama	±30	Normal	-88	9.50	Tidak menyala	Normal ✅
10	Jl. Majelis Ulama	±40	Kering	-95	9.50	Menyala	Berhasil ✅
11	Jl. Majelis Ulama	±50	Normal	-94	9.50	Tidak menyala	Normal ✅
12	Jl. Majelis Ulama	±60	Normal	-103	6.50	Tidak menyala	Normal ✅
13	Jl. Majelis Ulama	±70	Normal	-105	7.00	Tidak menyala	Normal ✅
14	Jl. Majelis Ulama	±80	Normal	-112	-1.00	Tidak menyala	Normal ✅
15	Jl. Majelis Ulama	±90	Normal	-113	-3.75	Tidak menyala	Normal ✅
16	Jl. Majelis Ulama	±100	Kering	-105	5.75	Menyala	Berhasil ✅

Berdasarkan Tabel di atas, Dari 16 percobaan pengujian, terdapat 4 kali kondisi prediksi Kering di mana pompa seharusnya aktif. Pompa berhasil menyala sebanyak 3 kali dengan tingkat keberhasilan 75%. Pada 12 percobaan dengan prediksi Normal, pompa tidak menyala sesuai dengan logika kendali yang dirancang dengan tingkat keberhasilan 100%. Secara keseluruhan tingkat keberhasilan sistem kendali pompa adalah 15 dari 16 percobaan atau 93,75%. Pompa aktif selama 10 detik sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan pada perancangan sistem.

Pada percobaan pertama di Gg. Dempo, pompa tidak menyala meskipun prediksi menunjukkan kondisi Kering. Hal ini diduga disebabkan oleh ketidakstabilan suplai tegangan pada Relay Module FL 3FF SZ yang memerlukan reset perangkat untuk dapat aktif kembali. Kendala ini dicatat sebagai limitasi hardware sistem dan menjadi rekomendasi perbaikan. Hasil pengujian juga membuktikan sistem berhasil mengendalikan pompa dari jarak jauh hingga ±100 meter melalui komunikasi LoRa SX1278, membuktikan bahwa arsitektur node sensor dan gateway edge yang dirancang mampu bekerja secara terintegrasi dalam skenario pengujian nyata di lapangan.

Hasil Pengujian Web Dashboard

Pengujian web dashboard dilakukan untuk mengevaluasi fungsionalitas antarmuka monitoring sistem yang dibangun menggunakan framework Flask 3.1.3 pada Raspberry Pi Zero 2W. Dashboard diakses melalui browser pada laptop yang terhubung ke jaringan WiFi yang sama dengan Raspberry Pi Zero 2W menggunakan alamat http://gateway-edge.local:5000. Pengujian meliputi tiga halaman utama yaitu halaman Dashboard, halaman Log Data, dan halaman Dataset.

Tabel 11. Hasil Pengujian Fungsionalitas Web Dashboard

No	Aspek Pengujian	Fitur yang Diuji	Hasil	Status
1	Ketersediaan	Dashboard dapat diakses via gateway-edge.local:5000	Berhasil diakses	✅ Berhasil
2	Keakuratan data	Tampilan data sensor real-time	Data diperbarui setiap 10 detik	✅ Berhasil
3	Keakuratan data	Tampilan hasil	Label Kering/Normal/	✅

		prediksi TinyML	Basah sesuai prediksi	Berhasil
4	Keakuratan data	Tampilan RSSI dan SNR	Nilai tampil real-time	✅ Berhasil
5	Keakuratan data	Riwayat 20 data terakhir	Tabel history diperbarui otomatis	✅ Berhasil
6	Keakuratan data	Halaman Log Data	Riwayat lengkap tampil	✅ Berhasil
7	Keakuratan data	Download CSV	File log berhasil diunduh	✅ Berhasil
8	Keakuratan data	Halaman Dataset	Data real ESP32 tampil	✅ Berhasil
9	Mekanisme polling	Polling HTTP ke /api/data	Data diperbarui tanpa refresh manual	✅ Berhasil
10	Mekanisme polling	Countdown interval	Timer mundur berjalan sesuai interval	✅ Berhasil
11	Kendali manual	Mode AUTO	Pompa aktif otomatis saat prediksi Kering	✅ Berhasil
12	Kendali manual	Mode ON manual	Pompa aktif saat tombol ON ditekan	✅ Berhasil
13	Kendali manual	Mode OFF manual	Pompa mati saat tombol OFF ditekan	✅ Berhasil

C. Pembahasan

Pembahasan Kinerja Komunikasi LoRa

Berdasarkan hasil pengujian komunikasi LoRa, sistem berhasil mengirimkan dan menerima seluruh paket data pada semua titik jarak di kedua lokasi pengujian dengan packet loss 0%. Hasil ini membuktikan bahwa modul LoRa RA-02 SX1278 433MHz mampu bekerja secara andal dalam skenario pengujian nyata.

Nilai RSSI pada kedua lokasi menunjukkan tren penurunan yang konsisten seiring bertambahnya jarak. Pada lokasi 1 (Gg. Dempo), RSSI menurun dari -76 dBm pada jarak ±10 meter hingga -111 dBm pada jarak ±60 meter. Pada lokasi 2 (Jl. Majelis Ulama), RSSI menurun dari -81 dBm pada jarak ±10 meter hingga -113 dBm pada jarak ±90 meter. Penurunan nilai RSSI ini sesuai dengan karakteristik propagasi sinyal radio yang mengalami pelemahan akibat path loss seiring bertambahnya jarak antara pemancar dan penerima. Meskipun nilai RSSI pada jarak ±80–100 meter berada di kisaran -105 hingga -113 dBm yang tergolong lemah, seluruh paket data masih berhasil diterima karena modul LoRa SX1278 memiliki sensitivitas penerima hingga -148 dBm.

Nilai SNR pada kedua lokasi menunjukkan tren penurunan yang serupa. Nilai SNR positif pada jarak ±10 hingga ±70 meter menunjukkan kualitas sinyal yang baik di mana sinyal lebih dominan dibanding noise lingkungan. Pada jarak ±80 meter ke atas nilai SNR mulai negatif, namun paket data masih berhasil diterima karena teknologi LoRa menggunakan modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) yang mampu mendekodekan sinyal bahkan pada kondisi SNR negatif hingga -20 dB.

Selama proses pengujian awal ditemukan anomali nilai SNR berupa nilai tidak wajar (56.75 dan 57.25 dB) yang disebabkan oleh kesalahan pembacaan register SNR chip SX1278 sebagai unsigned byte. Setelah dilakukan perbaikan konversi signed byte pada file gateway.py, nilai SNR kembali normal sesuai spesifikasi chip. Temuan ini

menunjukkan pentingnya pemahaman mendalam terhadap spesifikasi register hardware dalam pengembangan sistem komunikasi berbasis LoRa.

Jarak pengujian maksimal ±100 meter yang dicapai dalam penelitian ini sudah melampaui kebutuhan nyata sistem irigasi skala rumah tangga yang umumnya tidak melebihi 20–30 meter antara node sensor di area tanaman dan gateway edge di dalam rumah. Dengan demikian, sistem komunikasi LoRa yang dibangun memiliki margin jangkauan yang memadai untuk diimplementasikan pada berbagai skenario pertanian skala kecil maupun menengah.

Pembahasan Akurasi Model TinyML

Berdasarkan hasil pengujian akurasi model, model Random Forest yang di-deploy menggunakan joblib pada Raspberry Pi Zero 2W mencapai akurasi keseluruhan sebesar 99,17%. Hasil ini melampaui kriteria keberhasilan yang ditetapkan pada sub-bab 3.5.2 yaitu akurasi minimal 90%, dengan selisih 9,17% di atas ambang batas minimum.

Kelas Kering mencapai nilai sempurna pada seluruh metrik evaluasi dengan precision, recall, dan F1-score masing-masing 1,0000. Hal ini menunjukkan model sangat andal dalam mendeteksi kondisi kekurangan air tanaman yang merupakan kondisi paling kritis dalam sistem irigasi otomatis, karena kegagalan mendeteksi kondisi Kering akan berdampak langsung pada kematian tanaman akibat kekurangan air.

Terdapat 2 sampel kelas Normal yang salah diklasifikasikan sebagai kelas Basah. Kesalahan ini terjadi pada zona batas antara kelas Normal dan Basah di mana nilai fitur kedua kelas saling tumpang tindih pada dataset synthetic. Meskipun demikian, kesalahan klasifikasi ini tidak berdampak pada keputusan kendali pompa karena kondisi Normal dan Basah sama-sama menghasilkan aksi pompa OFF, sehingga secara fungsional sistem tetap berperilaku benar pada seluruh 240 sampel data uji.

Tingkat kepentingan fitur (feature importance) menunjukkan bahwa kelembaban tanah (Soil) menjadi fitur paling dominan dengan nilai 0,3742, diikuti kelembaban udara (Humidity) sebesar 0,2571 dan intensitas cahaya (Light) sebesar 0,2286. Dominasi fitur Soil sesuai dengan prinsip agronomis bahwa kelembaban tanah merupakan indikator utama kebutuhan air tanaman. Fitur tekanan udara (Pressure) memiliki kontribusi paling kecil sebesar 0,0270 namun tetap dipertahankan karena memberikan informasi kondisi atmosfer yang relevan terhadap laju evapotranspirasi tanaman.

Hasil pengujian membuktikan bahwa pendekatan TinyML menggunakan algoritma Random Forest yang di-deploy dengan joblib pada perangkat edge computing Raspberry Pi Zero 2W mampu menjalankan inferensi klasifikasi kondisi tanaman secara lokal dengan akurasi tinggi dan konsisten, tanpa memerlukan koneksi internet maupun layanan cloud eksternal.

Pembahasan Kendali Pompa

Berdasarkan hasil pengujian kendali pompa, dari 16 percobaan pengujian yang dilakukan di dua lokasi, sistem kendali pompa menunjukkan tingkat keberhasilan keseluruhan 93,75% (15 dari 16 percobaan). Pada kondisi prediksi Kering, pompa berhasil menyala 3 dari 4 kali (75%). Pada kondisi prediksi Normal, pompa tidak menyala pada seluruh 12 percobaan (100%) sesuai dengan logika kendali yang dirancang.

Keberhasilan kendali pompa dari jarak jauh hingga ±100 meter melalui komunikasi LoRa SX1278 membuktikan bahwa arsitektur node sensor dan gateway edge yang dirancang mampu bekerja secara terintegrasi dalam skenario nyata di lapangan. Hal ini relevan dengan tujuan penelitian yaitu membangun sistem irigasi otomatis berbasis edge computing yang tidak bergantung pada koneksi internet.

Pada 1 percobaan di lokasi Gg. Dempo, pompa tidak menyala meskipun prediksi

menunjukkan kondisi Kering. Berdasarkan analisis yang dilakukan, kendala ini diduga disebabkan oleh ketidakstabilan suplai tegangan pada Relay Module FL 3FF SZ akibat jalur ground yang tidak tersambung secara optimal ke titik bersama antara ESP32, relay, dan power module. Kondisi ini menyebabkan relay tidak mendapatkan tegangan yang cukup untuk mengaktifkan kontak dan menghidupkan pompa. Perangkat dapat berfungsi kembali setelah dilakukan reset dengan mencabut dan memasang ulang sumber daya.

Selain kendala relay, ditemukan pula kondisi di mana setelah pompa menyala selama 10 detik dan mati, sistem kembali membaca kondisi Normal meskipun tanah telah disiram. Hal ini disebabkan oleh dua faktor yaitu sensor kelembaban tanah kapasitif membutuhkan waktu untuk mendeteksi perubahan kadar air secara merata di sekitar sensor, serta rentang nilai fitur Soil antara kelas Normal dan Basah yang saling tumpang tindih pada dataset synthetic sehingga kondisi tanah yang baru disiram terbaca sebagai Normal bukan Basah. Kedua kendala tersebut dicatat sebagai limitasi sistem pada penelitian ini dan menjadi dasar rekomendasi perbaikan pada BAB V, meliputi perbaikan wiring ground relay dan pengembangan dataset dengan data real dari sensor ESP32 untuk meningkatkan akurasi klasifikasi pada kondisi batas antara kelas Normal dan Basah.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa kendali pompa berhasil dilakukan pada berbagai kondisi kualitas sinyal LoRa, mulai dari RSSI -76 dBm dengan SNR 9.50 dB pada jarak ±10 meter hingga RSSI -105 dBm dengan SNR 5.75 dB pada jarak ±100 meter. Hal ini membuktikan bahwa sistem kendali pompa tetap berfungsi meskipun kualitas sinyal melemah seiring bertambahnya jarak.

Pembahasan Web Dashboard

Berdasarkan hasil pengujian fungsionalitas web dashboard, seluruh 13 fitur yang diuji berhasil berfungsi sesuai perancangan pada sub-bab 3.5.4. Dashboard berhasil diakses melalui browser pada alamat gateway-edge.local:5000 dalam jaringan WiFi lokal tanpa memerlukan koneksi internet, membuktikan bahwa arsitektur edge computing yang diterapkan mampu menyajikan monitoring real-time secara mandiri.

Mekanisme polling HTTP ke endpoint /api/data setiap 10 detik berjalan dengan baik sehingga data sensor, hasil prediksi model TinyML, nilai RSSI dan SNR, serta countdown interval selalu menampilkan informasi terkini tanpa perlu me-refresh halaman secara manual. Hal ini memberikan pengalaman monitoring yang nyaman bagi pengguna karena informasi kondisi tanaman selalu diperbarui secara otomatis.

Fitur kendali manual pompa dengan tiga mode yaitu AUTO, ON, dan OFF berfungsi sesuai yang dirancang. Mode AUTO memungkinkan sistem bekerja sepenuhnya otomatis berdasarkan hasil prediksi model TinyML, sedangkan mode ON dan OFF memungkinkan pengguna mengambil alih kendali pompa secara manual apabila diperlukan. Kombinasi kendali otomatis dan manual ini meningkatkan fleksibilitas sistem dalam penggunaan nyata di lapangan.

Halaman Log Data yang menyimpan seluruh riwayat data sensor dalam format .csv secara lokal pada Raspberry Pi Zero 2W memberikan kemampuan analisis data historis tanpa ketergantungan pada layanan cloud. Pengguna dapat mengunduh seluruh data log melalui fitur Download CSV untuk keperluan analisis lebih lanjut. Halaman Dataset yang menampilkan data real dari node sensor ESP32 berfungsi sebagai validasi bahwa sistem berhasil mengumpulkan data nyata dari lingkungan tanaman secara berkelanjutan.

Secara keseluruhan, web dashboard yang dibangun menggunakan Flask 3.1.3 dengan antarmuka HTML5, CSS3, dan Vanilla JavaScript berhasil menjadi jembatan antara sistem edge computing yang berjalan di Raspberry Pi Zero 2W dengan pengguna akhir, menyajikan informasi kondisi tanaman dan kendali pompa secara real-time melalui

antarmuka yang informatif dan mudah digunakan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem gateway edge berbasis Raspberry Pi Zero 2W dengan komunikasi LoRa SX1278 berhasil dirancang dan diimplementasikan sehingga mampu beroperasi secara mandiri tanpa koneksi internet. Pengujian komunikasi LoRa di dua lokasi berbeda di Kota Medan yaitu Gg. Dempo dan Jl. Majelis Ulama menunjukkan packet loss 0% pada seluruh 16 titik pengujian hingga jarak ±100 meter. Kualitas sinyal dipengaruhi oleh jarak antara node sensor dan gateway edge, di mana nilai RSSI menurun secara konsisten dari -76 dBm pada jarak ±10 meter hingga -113 dBm pada jarak ±90 meter, dan nilai SNR mulai negatif pada jarak ±80 meter ke atas. Meskipun demikian seluruh paket data berhasil diterima karena modulasi Chirp Spread Spectrum (CSS) pada LoRa SX1278 mampu mendekodekan sinyal pada kondisi SNR negatif hingga -20 dB.

DAFTAR REFERENSI

Alajlan, N. N., & Ibrahim, D. M. (2022). TinyML: Enabling of Inference Deep Learning Models on Ultra-Low-Power IoT Edge Devices for AI Applications. *Micromachines*, *13*(6). https://doi.org/10.3390/mi13060851

Bafdal, N., Ardiansah, I., & Asmara, S. (2022). Application of Internet of Things (IoT) on Microclimate Monitoring System in The ALG Unpad Greenhouse Based on Raspberry Pi. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, *11*(3), 518. https://doi.org/10.23960/jtep-l.v11i3.518-530

Baseca, C. C., Dionísio, R., Ribeiro, F., & Metrôlho, J. (2025). Edge-Computing Smart Irrigation Controller Using LoRaWAN and LSTM for Predictive Controlled Deficit Irrigation. *Sensors*, *25*(22), 1–15. https://doi.org/10.3390/s25227079

Basri, M. (2025). A Comparative Study : Predicting Customer Churn in Banking Using Logistic Regression & Random Forest. *Ultimatics : Jurnal Teknik Informatika*, *17*(1), 72–81. https://doi.org/10.31937/ti.v17i1.4075

Boralkar, R. R., & Kulkarni, S. S. (2024). IoT Based Smart Agriculture System Using ESP32. *Interdisciplinary Conference on Electrics and Computer, INTCEC 2024*, (June), 11–13. https://doi.org/10.1109/INTCEC61833.2024.10602915

Dafonte, J., González, M. Á., Comesaña, E., Teijeiro, M. T., & Cancela, J. J. (2024). Soil Water Status Monitoring System with Proximal Low-Cost Sensors and LoRa Technology for Smart Water Irrigation in Woody Crops. *Sensors*, *24*(24). https://doi.org/10.3390/s24248104

Enock, K. S., Sagali, M. J., Jeannick, U. I., & Chen, D. (2025). LoRa-Based Smart Agriculture Monitoring and Automatic Irrigation System. *Journal of Computer and Communications*, *13*(03), 1–20. https://doi.org/10.4236/jcc.2025.133001

Jeya Agastin K, P Hareesh Kumar, Hariharan K, & Kailash Aravind K. (2025). Real-Time Object Detection Using Raspberry Pi Zero 2W: An Optimized Approach. *International Research Journal on Advanced Engineering and Management (IRJAEM)*, *3*(12), 3401–3405. https://doi.org/10.47392/irjaem.2025.0537

Joice, A., Tufaique, T., Tazeen, H., Igathinathane, C., Zhang, Z., Whippo, C., Hendrickson, J., & Archer, D. (2025). Applications of Raspberry Pi for Precision Agriculture—A Systematic Review. *Agriculture (Switzerland)*, *15*(3), 1–31. https://doi.org/10.3390/agriculture15030227

Premkumar, S., & Sigappi, A. N. (2022). IoT-enabled edge computing model for smart irrigation system. *Journal of Intelligent Systems*, *31*(1), 632–650. https://doi.org/10.1515/jisys-2022-0046