

Integrasi Sistem IoT untuk Pemantauan Cuaca Real-Time dan Prediksi Curah Hujan berbasis LSTM

Dimas Yudistira^{1,*}, Muhammad Ikhsan¹

¹ Program Studi Ilmu Komputer, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Indonesia

* Correspondence: yudistira@uinsu.ac.id

Copyright: © 2025 by the authors

Received: 27 September 2025 | Revised: 14 Oktober 2025 | Accepted: 20 November 2025 | Published: 6 Desember 2025

Abstrak

Ketidakakuratan prakiraan cuaca makro regional yang tidak real-time menimbulkan kesenjangan informasi bagi pelaku UMKM di sektor pertanian yang memerlukan pembaruan kondisi cuaca aktual di lokasi usaha mereka. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan cuaca real-time berbasis ESP32 dan model prediksi curah hujan LSTM yang hasilnya dapat diakses melalui antarmuka web oleh pelaku UMKM seperti petani. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32, sensor DHT22, dan Hall-effect 3144, dengan model LSTM yang dilatih menggunakan data historis BMKG dan data lapangan. Hasil temuan kami berupa sistem yang mampu memantau kondisi cuaca secara real-time sekaligus menghasilkan prediksi curah hujan mikroskopasial melalui integrasi penuh antara perangkat IoT dan model LSTM. Hasil pengujian menunjukkan kinerja sistem yang stabil dengan waktu tunda transmisi 5 detik, latency initial fetch 48 ms, dan performa prediksi RMSE 17.05 mm, MAE 12.40 mm, F1-score 0.175, yang memadai dalam mendeteksi intensitas hujan ekstrem. Temuan ini menunjukkan potensi pengembangan sistem prakiraan cuaca mikroskopasial yang terjangkau, mudah direplikasi, dan dapat diadaptasikan untuk mendukung sistem peringatan dini atau irigasi cerdas di wilayah agrikultur.

Kata kunci: esp32; iot; lstm; monitoring cuaca; prediksi curah hujan

Abstract

The inaccuracy of non-real-time macro-regional weather forecasts creates an information gap for MSME actors in the agricultural sector who need updates on actual weather conditions at their business locations. This study aims to develop a real-time weather monitoring system based on ESP32 and an LSTM rainfall prediction model, the results of which can be accessed via a web interface by MSME actors such as farmers. The system was developed using an ESP32 microcontroller, DHT22 sensor, and Hall-effect 3144, with an LSTM model trained using historical BMKG data and field data. Our findings show that the system is capable of monitoring weather conditions in real time while generating microspatial rainfall predictions through full integration between IoT devices and the LSTM model. Test results show stable system performance with a transmission delay of 5 seconds, an initial fetch latency of 48 ms, and prediction performance RMSE of 17.05 mm, MAE of 12.40 mm, and F1-score of 0.175, which is adequate for detecting extreme rainfall intensity. These findings demonstrate the potential for developing an affordable, easily replicable, and adaptable microspatial weather forecasting system to support early warning systems or smart irrigation in agricultural areas.

Keywords: esp32; iot; lstm; weather monitoring; rainfall prediction

PENDAHULUAN

Krisis iklim global yang semakin sulit diprediksi telah menempatkan sektor pertanian pada posisi paling rentan secara ekonomi dan ekologis, terutama di negara berkembang yang bergantung pada kestabilan cuaca harian (Abbass et al., 2022; Saleem et al., 2025; Yuan et al.,



2024). Dalam tiga dekade terakhir, *Food and Agriculture Organization* (FAO) mencatat kerugian sektor pertanian dan peternakan mencapai USD 3,8 triliun, dengan lebih dari 65% disebabkan oleh kekeringan, sementara *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC AR6) memperkirakan sekitar 10% lahan pertanian dunia akan kehilangan produktivitas pada pertengahan abad ini akibat peningkatan suhu dan defisit air (Mirzabaev et al., 2023). Di tingkat Asia, *World Meteorological Organization* (WMO) menekankan peningkatan frekuensi banjir dan cuaca ekstrem, menunjukkan perlunya sistem peringatan dini dan prediksi berbasis data lokal yang mampu merespons perubahan cepat pada skala mikrospasial (Appelt et al., 2023; Camps-Valls et al., 2025; Fitriati et al., 2025; Kalaany et al., 2025; Miller et al., 2025; Phuong et al., 2024; Yusuf et al., 2024).

Kebutuhan akan sistem prediksi cuaca mikrospasial semakin mendesak di Indonesia, di mana Usaha Mikro, Kecil, dan Menengah (UMKM) menyumbang 99,87% dari seluruh unit usaha dan hampir separuhnya bergerak di sektor pertanian, perikanan, dan pengolahan hasil panen (Hidayatulloh & Aryanto, 2023; Kalaany et al., 2025; Miller et al., 2025; Nurwarsito & Adaby, 2024). Ketergantungan tinggi terhadap cuaca harian tampak jelas di Sumatera Utara, khususnya Kota Medan, yang mengalami curah hujan ekstrem mencapai 260 mm pada 27 November 2024 dan hujan lokal berkepanjangan pada Maret 2025 yang mengganggu aktivitas pertanian (Azizah et al., 2021; Fitriati et al., 2025; Yusuf et al., 2024). Kondisi tersebut menyebabkan pelaku UMKM seperti produsen keripik dan pengering hasil panen tidak dapat menyelesaikan proses pengeringan secara optimal, sehingga menurunkan kualitas produk dan meningkatkan biaya operasional akibat kebutuhan tambahan energi atau penundaan produksi (Ihsan & Derosya, 2024; Nath et al., 2024; Pongsapan & Allo, 2022).

Meskipun BMKG telah menyediakan layanan prakiraan cuaca tiga jam sekali untuk jangka waktu tiga hari, informasi tersebut belum merepresentasikan kondisi aktual di titik-titik usaha mikro yang tersebar di berbagai wilayah dengan karakter geografis dan lingkungan mikro yang sangat variatif seperti sawah, ladang, atau lokasi pengeringan terbuka (Kalaany et al., 2025; Nurwarsito & Adaby, 2024; Pongsapan & Allo, 2022). Hal ini menyebabkan ketidaksesuaian antara prediksi dan kondisi nyata di lapangan, sehingga pelaku usaha tidak dapat mengambil keputusan operasional secara tepat (Fudhlatina & Budiman, 2025). Keterbatasan ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian pada aspek sistem prediksi cuaca yang mampu menangkap dinamika mikrospasial secara *real-time* dan menyalurkannya dalam bentuk informasi langsung yang mudah diakses oleh pengguna lapangan (Islam & Azmi, 2022; Kania et al., 2024; Miller et al., 2025).

Sebagai upaya mengatasi keterbatasan tersebut, berbagai penelitian telah berupaya menghadirkan solusi berbasis teknologi melalui integrasi *Internet of Things* (IoT) dan algoritma *deep learning*. Penelitian oleh Islam & Azmi (2022) telah mengembangkan sistem pemantauan cuaca berbasis IoT menggunakan NodeMCU, tetapi tidak melakukan prediksi cuaca. Selanjutnya penelitian Kania et al. (2024) menggunakan sensor DHT11, LDR, dan Raindrop untuk pemantauan, tetapi tanpa kemampuan prediksi. Sedangkan Firdaus & Paputungan (2022) menerapkan *Long Short-Term Memory* (LSTM) untuk prediksi curah hujan di Kota Bandung, tetapi tidak mengembangkan integrasi IoT maupun *user interface*. Beberapa penelitian sebelumnya seperti Sun et al. (2025) dan Vianita & Tantyoko (2025) memang telah mengusulkan integrasi *data assimilation* dengan algoritma *deep learning*, tetapi solusi tersebut belum diimplementasikan dalam sistem *real-time* dan belum diarahkan pada kebutuhan komunitas lokal berskala kecil.

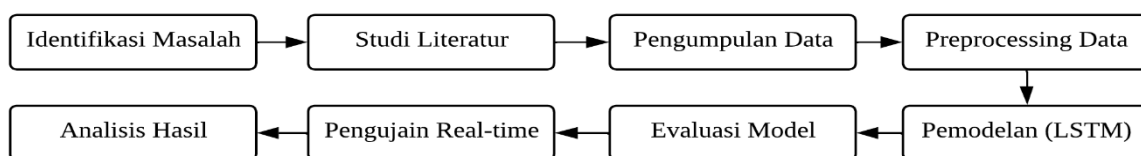
Beberapa penelitian sebelumnya masih bersifat parsial dan belum terhubung dalam satu sistem utuh yang mampu melakukan pengukuran, pengiriman, prediksi, dan visualisasi data secara terpadu. Selain itu, banyak di antaranya masih berada pada tahap percobaan di level komponen, sehingga belum menekankan pengujian generalisasi model, interoperabilitas sistem, maupun validasi kinerja lintas lokasi yang diperlukan untuk memastikan skalabilitas

prediksi cuaca mikrosposial (Fudhlalina & Budiman, 2025; Syahreza et al., 2024). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, kami mengembangkan sistem terintegrasi yang mampu melakukan pemantauan kondisi cuaca secara *real-time*, mengirimkan data ke server secara otomatis, dan menghasilkan prediksi curah hujan mikrosposial menggunakan model LSTM. Sistem ini dirancang dengan memanfaatkan mikrokontroler ESP32, sensor DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembapan, dan sensor hall-effect 3144 untuk membaca pulsa *tipping-bucket* dan *anemometer*. Seluruh komponen dihubungkan ke server web yang memungkinkan pengolahan data, penyimpanan historis, dan penyajian hasil dalam bentuk *dashboard* interaktif. Integrasi penuh antara perangkat IoT, infrastruktur server, dan model prediksi berbasis *deep learning* menjadi dasar rancangan sistem ini.

Tujuan penelitian adalah mengembangkan sistem pemantauan cuaca *real-time* berbasis ESP32 dan model prediksi curah hujan LSTM yang hasilnya dapat diakses melalui antarmuka web oleh pelaku UMKM seperti petani. Penelitian ini menyusun arsitektur terintegrasi yang mampu menampilkan dan menyimpan data cuaca, menguji ketahanan model pada variasi lingkungan mikro, mengoptimalkan rancangan LSTM agar sesuai untuk sistem tertanam, dan menilai kemungkinan penerapannya pada wilayah dengan karakter topografi dan iklim mikro yang berbeda. Sistem yang dihasilkan diharapkan lebih adaptif dan mudah direplikasi untuk kebutuhan operasional UMKM sektor pertanian, sekaligus memperluas pemahaman akademik mengenai integrasi IoT dan *deep learning* dalam prediksi cuaca berbasis lokasi *real-time*.

METODE

Penelitian ini mengimplementasikan sistem prediksi dan pemantauan cuaca berbasis IoT dan LSTM dengan metode *quantitative experimental*. Kerangka penelitian pada Gambar 1 menunjukkan alur pengembangan yang dimulai dari identifikasi masalah, studi literatur, pengumpulan data, *preprocessing* data, pemodelan, evaluasi model, pengujian real-time, dan analisis data.



Gambar 1. Kerangka penelitian

Model pengembangan yang digunakan adalah *waterfall*, dipilih karena tahapan berurutan, saling bergantung, fokus pada dokumentasi terstruktur, dan hasil akhir yang dapat direplikasi. Pada tahap *requirement analysis*, sistem dirancang untuk memenuhi aspek *functional* (pemantauan data sensor, transmisi ke server, prediksi curah hujan, dan visualisasi berbasis web) dan *non-functional* (efisiensi komunikasi, akurasi model, dan sinkronisasi data otomatis). *Dataset* historis bersumber dari BMKG Wilayah I Medan dengan 5.039 sampel (2012/01/07–2025/07/01), sedangkan *real-time dataset* dikumpulkan menggunakan perangkat IoT berbasis ESP32 (mikrokontroler utama), sensor DHT22 (mengukur *temperature*, *relative humidity*), dan Hall-effect 3144 (mereplikasi fungsi *anemometer*, *wind direction*, *rain gauge*). Parameter utama yang dicakup adalah *Temperature Average*, *Relative Humidity Average*, *Fastest Wind*, *Average Wind*, *Direction of Fastest Wind*, *Direction of Average Wind*, *Temperature Minimum*, *Temperature Maximum*, dan *Rainfall* (sebagai *target*), dengan sinkronisasi waktu data otomatis setiap 23:59:59 agar seragam dengan data BMKG.

System design mencakup arsitektur komunikasi data berbasis *HTTP* dengan format *JSON*, penyimpanan berbasis *MySQL/Sequelize*, *backend Node.js/Express*, dan *dashboard* interaktif berbasis *Vue.js* dan *Vuetify*. Struktur sistem dibuat modular agar mendukung integrasi

tambahan *node IoT* di masa depan tanpa mengubah arsitektur inti. Sebelum integrasi dilakukan, seluruh sensor dikalibrasi untuk menjamin keandalan data.

Tahap *implementation* meliputi *data preprocessing* (pembersihan nilai hilang dan imputasi arah angin DDD_X dan DDD_CAR), *feature engineering* (*RR_lag1*, *RR_lag2*, *RR_rolling_mean* 7-hari, *temp_range* TX–TN, *circular encoding* arah angin, indikator *rainy season*), dan normalisasi menggunakan *RobustScaler* karena efektif menangani data dengan *outlier*. *Dataset* dibagi menjadi 80% *training data* dan 20% *testing data* dengan *temporal split* untuk menjaga urutan kronologis. Bentuk *input* LSTM adalah (14, 17) yang mewakili 14 hari pengamatan dengan 17 fitur per *timestep*. Evaluasi model dilakukan menggunakan metrik *RMSE*, *MAE*, *R*, R^2 , *precision*, *recall*, *F1-score*, dan *Spike Detection Accuracy*, dengan kategorisasi intensitas hujan berdasarkan standar BMKG: berawan (0 mm/hari), hujan ringan (0,5–20 mm/hari), hujan sedang (20–50 mm/hari), hujan lebat (50–100 mm/hari), hujan sangat lebat (100–150 mm/hari), dan hujan ekstrem (>150 mm/hari).

Testing dilakukan untuk memverifikasi fungsionalitas dan performa dengan *Black Box* untuk memeriksa fungsionalitas *user interface* (*website*), termasuk *navigation*, *real-time display*, *historical page*, *forecast panel*, dan *error handling*; serta *IoT System Performance* untuk menguji *network latency*, *system response time*, *data transmission reliability*, dan kestabilan koneksi *sensor-server-dashboard*. Lingkungan pengujian juga mempertimbangkan pengaruh suhu tinggi, kelembapan ekstrem, dan posisi sensor terhadap kestabilan pembacaan data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Perangkat IoT yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan stabilitas operasional dan akurasi tinggi dalam mengukur serta mengirimkan data cuaca secara otomatis ke *server* setiap 10 detik tanpa intervensi manual. *Microcontroller* ESP32 terhubung langsung dengan sensor DHT22 dan *Hall-effect* 3144 yang digunakan untuk mengukur *temperature*, *humidity*, *wind speed*, *wind direction*, dan *rainfall*. Data dikirim menggunakan protokol *HTTP* dan disimpan secara terstruktur dalam *database*. Integrasi *hardware*, format data, dan konektivitas jaringan telah berfungsi sesuai rancangan.



Gambar 2. IoT pemantauan cuaca yang dipasang di lapangan

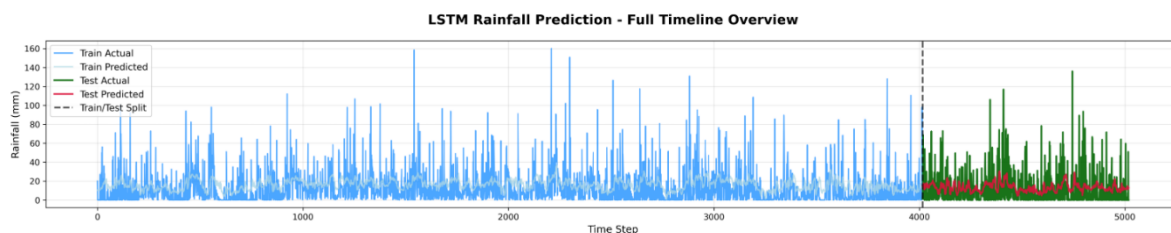
Pemantauan sistem cuaca berbasis *IoT* ditunjukkan pada gambar 2, dimana perangkat ESP32 dengan sensor DHT22 dan *Hall-effect* 3144 dipasang di lapangan untuk mengukur suhu, kelembapan, kecepatan, arah angin, dan curah hujan secara langsung. Data dikirim ke *server* melalui koneksi *Wi-Fi* dan ditampilkan secara *real-time* pada *web dashboard*. Perangkat ini dirancang tahan terhadap kondisi luar ruangan dan beroperasi terus-menerus selama 24 jam.

Hasil evaluasi model LSTM menunjukkan *RMSE* 17,05 mm dan *MAE* 12,40 mm, menandakan rata-rata *error* sebesar 12–17 mm terhadap data aktual pada *test set*. *Correlation coefficient* (*r*) dan R^2 pada tabel 1 menunjukkan korelasi linear yang sangat lemah, di mana

hanya 1,7% variasi data aktual yang dapat dijelaskan oleh model, sehingga kemampuan model dalam memprediksi variasi curah hujan tergolong rendah. Pada *spike detection* (*rainfall* >19.5 mm), model memperoleh *accuracy*, *precision*, *recall*, dan *F1-score*, yang merepresentasikan sensitivitas rendah terhadap peristiwa hujan ekstrem. Berdasarkan *confusion matrix*, terdapat 25 *True Positive*, 59 *False Positive*, 176 *False Negative*, dan 744 *True Negative*, menunjukkan bahwa sebagian besar *spike* tidak terdeteksi. Dari total 201 kejadian hujan lebat aktual, model hanya memprediksi 84 *spike*, dengan mayoritas hasil berada pada tingkat curah hujan menengah. Gambar 3 menunjukkan bahwa pada *training phase* prediksi model relatif mendekati data aktual, sedangkan pada *testing phase* kurva *predicted* tampak lebih halus dan gagal menangkap *actual spikes*, konsisten dengan nilai korelasi rendah dan performa deteksi rendah pada intensitas ekstrem.

Tabel 1. Hasil evaluasi model

RMSE (mm)	MAE (mm)	r	R ²	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1- score
17,05	12,40	0,129	0,017	76,59	29,8	12,4	0,175



Gambar 3. Prediksi curah hujan model lstm pada keseluruhan rentang waktu

Website yang dikembangkan berfungsi sebagai *user interface* utama untuk pemantauan cuaca secara *real-time*, menampilkan hasil inferensi model *LSTM*, serta menyediakan visualisasi interaktif untuk data historis. *Interface* terdiri dari halaman *navigation*, *real-time dashboard*, *forecast panel* lima hari, halaman *historical data*, dan halaman *fallback* yang seluruhnya beroperasi sesuai rancangan. *Dashboard* memperbarui data secara otomatis melalui *Socket.IO* dalam interval 1-3 detik tanpa perlu *page reload*, dilengkapi ikon kondisional, *tooltip*, dan *interactive popover* yang membantu pengguna memahami arti setiap parameter cuaca. Halaman historis menyediakan *year-month filter*, *CSV export*, dan grafik interaktif (*line*, *bar*, *doughnut*, dan *polar-area*) yang menampilkan perubahan variabel cuaca dengan statistik yang dihitung secara reaktif dari data yang difilter. *Forecast panel* menampilkan estimasi curah hujan (*RR*), tingkat risiko (*risk level*), dan *confidence score* yang diperbarui secara otomatis berdasarkan hasil inferensi terbaru model.

Hasil pengujian performa pada gambar 4 menunjukkan *Network Latency* (waktu tunda sensor ke *server*) rata-rata 742 ms (*Std. Dev.* 25 ms, *Packet Loss* 0.00%, *Throughput* 1.35 req/s) dan *System Response Time* (waktu data hingga prediksi tampil) rata-rata 5 detik (*Std. Dev.* 500 ms, *Packet Loss* 0.00%, *Throughput* 0.20 req/s). *Initial Fetch Delay* tercatat 48 ms. Seluruh hasil ini berada dalam kategori lulus operasional, menunjukkan sistem mampu menjaga keandalan transmisi dan bekerja dalam rentang waktu respons *real-time* sebagaimana dirancang.

Hasil pengujian *black box* pada gambar 5 menunjukkan bahwa seluruh fungsi dinyatakan lulus uji, mencakup *navigation* antarhalaman yang responsif, pembaruan *real-time* untuk parameter cuaca (*temperature*, *humidity*, *wind speed*, *wind direction*, *rainfall*), akurasi *historical filter*, validitas grafik dan *data export*, tampilan adaptif di berbagai perangkat (*desktop*, *tablet*, *mobile*), serta sistem *error handling* dan *fallback* yang stabil tanpa *crash*.

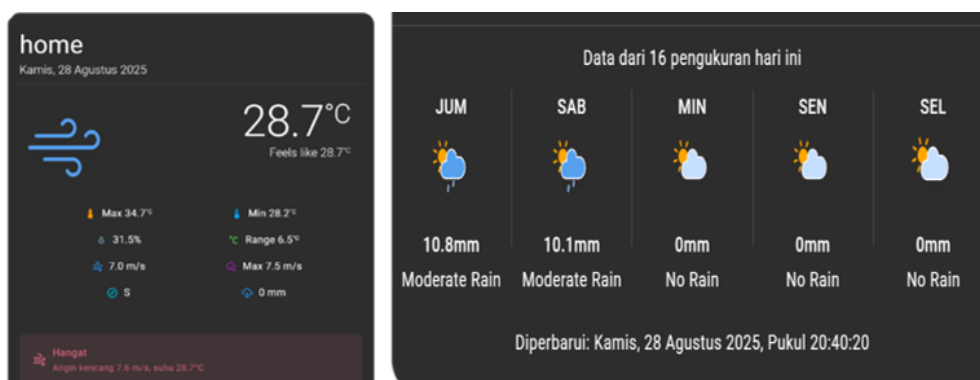
No	Aspek Uji	Elemen Uji	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Std. Dev. (ms)	Packet Loss	Throughput (req/s)	Status
1	Network Latency	Waktu tunda pengiriman data dari sensor ESP32 ke server	<1 detik untuk transmisi tunggal	742 ms (rentang 700-800 ms) berdasarkan timestamp Arduino IDE	25 ms	0.00 %	1.35 req/s	Lulus Operasional
2	System Response Time	Waktu dari pengiriman data hingga hasil prediksi LSTM tampil di dashboard	<6 detik untuk sistem real-time	5 detik rata-rata termasuk inferensi model dan render dashboard	500 ms	0.00 %	0.20 req/s	Lulus Operasional
3	Initial Fetch Delay	Waktu pemuatan awal data dari server ke dashboard	<100 ms untuk initial fetch pertama	48 ms sesuai hasil pengujian fetch latency	5 ms	0.00 %	-	Lulus
4	Data Transmission Reliability	Keberhasilan pengiriman data dalam interval 10 detik	100 % data terkirim tanpa kehilangan paket	Keberhasilan pengiriman 100 % selama koneksi stabil	15 ms	0.00–0.15 %	1.35 req/s	Lulus
5	Kestabilan Koneksi	Konsistensi komunikasi Socket.IO selama pemantauan 60 menit	Tidak terjadi disconnect selama pengujian	Koneksi stabil dan komunikasi real-time terjaga, tanpa disconnect event	40 ms (variasi antar-siklus)	0.00 %	-	Lulus

Gambar 4. Hasil pengujian performa sistem iot

No.	Aspek Uji	Elemen Uji	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Status
1	Navigasi Website	Tautan "CHECK WEATHER" dan "HISTORICAL DATA" pada halaman utama; fungsi pengalihan antarhalaman.	Mengklik "CHECK WEATHER" membawa pengguna ke halaman pemantauan real-time; mengklik "HISTORICAL DATA" membuka halaman data historis; navigasi harus responsif dan tanpa error.	Semua tautan berfungsi dengan baik; waktu muat halaman cepat; tidak ditemukan error navigasi.	Lulus
2	Tampilan Halaman "Check Weather" (Realtime & Forecast)	Elemen UI mencakup suhu (Feels Like, Max, Min), kelembapan, kecepatan dan arah angin, curah hujan, alert kondisi, forecast 5 hari, lokasi, dan timestamp pembaruan; tooltip (popover) pada ikon cuaca; placeholder "Memanggu data prakiraan cuaca..."; label "Data dari X pengukuran hari ini".	Semua elemen tampil lengkap dan relevan; pembaruan data otomatis setiap 10 detik tanpa refresh; tooltip muncul sesuai ikon dan deskripsinya benar; placeholder muncul hanya saat data belum tersedia; ikon cuaca berubah sesuai kondisi aktual; label jumlah pengukuran akurat.	Seluruh elemen tampil dan berfungsi dengan baik; data diperbarui otomatis; ikon, tooltip, dan placeholder bekerja sesuai rancangan; tidak ditemukan ketidaksesuaian tampilan atau nilai.	Lulus
3	Tampilan Halaman "Historical Data"	Filter tahun dan bulan; grafik temperatur, kelembapan, kecepatan angin, curah hujan, frekuensi arah angin umum dan maksimum; statistik ringkasan (rata-rata suhu, kelembapan, total curah hujan, kecepatan maksimum, arah umum); tombol EXPORT CSV; pesan No Data Available.	Filter mengubah grafik dan statistik dengan benar; semua grafik menampilkan data valid dan proporsional; EXPORT CSV berfungsi untuk mengunduh data sesuai filter; pesan No Data Available muncul bila data kosong.	Semua komponen berjalan sesuai harapan; grafik, statistik, dan ekspor data berfungsi normal; pesan No Data Available tampil tepat ketika data kosong.	Lulus
4	Komunikasi Data Real-time (Socket.IO)	Proses penerimaan data dari ESP32 ke server; pembaruan otomatis nilai cuaca di dashboard.	Dashboard memperbarui nilai suhu, kelembapan, arah dan kecepatan angin, serta curah hujan dalam beberapa detik setelah data diterima; tidak memerlukan refresh manual.	Data baru muncul otomatis 1–3 detik setelah pengiriman; komunikasi stabil tanpa kehilangan paket data.	Lulus
5	Prediksi Curah Hujan (Forecast Panel)	Panel prediksi 5 hari ke depan menampilkan nilai curah hujan (RR), tingkat risiko (risk level), dan confidence score; ikon cuaca sesuai kondisi.	Panel menampilkan lima kartu dengan nilai RR logis dan konsisten; tingkat risiko sesuai klasifikasi curah hujan; ikon cuaca sinkron dengan kondisi; data diperbarui setiap kali model LSTM menghasilkan inferensi baru.	Panel tampil lengkap dan akurat; nilai RR serta klasifikasi risiko sesuai logika model; ikon berubah otomatis mengikuti hasil inferensi terbaru.	Lulus
6	Responsivitas Interface (UI Responsiveness)	Tampilan website dinji pada perangkat desktop, tablet, dan mobile dengan berbagai resolusi.	Tampilan menyesuaikan ukuran layar tanpa distorsi; tidak ada elemen terpotong, tumpang tindih, atau keluar dari area kontainer; navigasi berfungsi di semua perangkat.	Interface tampil proporsional di semua perangkat; elemen UI menyesuaikan secara otomatis; seluruh fungsi interaktif tetap berjalan.	Lulus
7	Penganganan Error dan Fallback System	Kondisi server tidak merespons (POST /api/weather), gangguan koneksi Socket.IO, dan data historis kosong.	Pesan error informatif muncul saat koneksi gagal; dashboard tetap menampilkan data terakhir atau pesan "No Data Available"; sistem tidak mengalami crash.	Semua kondisi dinji dan tertangani dengan benar; pesan kesalahan tampil sesuai; sistem tetap stabil dengan fallback yang berfungsi sempurna.	Lulus

Gambar 5. Hasil pengujian *black box*

Real-time monitoring interface pada gambar 6 menampilkan kondisi cuaca aktual yang diperbarui secara otomatis setiap kali data baru diterima dari *server*. Setiap parameter disajikan dalam bentuk angka, ikon, dan deskripsi singkat, sedangkan *forecast panel* di bagian bawah menampilkan hasil prediksi curah hujan lima hari ke depan berdasarkan model LSTM. Tampilan ini dirancang responsif dan mudah diakses melalui perangkat *desktop* maupun *mobile*.

Gambar 6. Pemantauan *real-time* dan forecast

Pembahasan

Integrasi sistem *end-to-end* antara IoT, *server*, dan model LSTM menunjukkan stabilitas karena rantai akuisisi, transmisi, dan inferensi beroperasi sesuai rancangan penelitian. Kinerja

stabil ini disebabkan oleh sinkronisasi komunikasi *sensor-server* melalui *HTTP* dan *Socket.IO* yang menjaga waktu respons di bawah satu detik. Namun, resolusi *tipping bucket* sebesar 0.70 mm per *tip* dan ambang *anemometer* 1,5 m/s membatasi sensitivitas terhadap hujan ringan dan angin lambat, sehingga data berintensitas rendah sering tidak terekam. Ketergantungan koneksi *Wi-Fi* tanpa cadangan daya juga memengaruhi kontinuitas data karena setiap gangguan jaringan memutus alur prediksi otomatis. *Web interface* berbasis *Vue.js* dan *Vuetify* efektif sebagai penghubung antara data sensor dan pengguna karena mendukung pembaruan otomatis dan visualisasi interaktif. Pengujian *black box* menunjukkan semua fungsi berjalan sesuai spesifikasi, menandakan bahwa desain responsif dan penambahan *tooltip* meningkatkan aksesibilitas bagi pengguna non-teknis. Kinerja *interface* ini efisien karena menggabungkan *real-time monitoring*, *forecasting*, dan *historical data visualization* dalam satu platform, menjadikannya sarana praktis untuk pengambilan keputusan cepat di lapangan.

Correlation coefficient (r) yang rendah menunjukkan bahwa *temporal dependency* jangka panjang belum sepenuhnya ditangkap oleh LSTM karena gradien pembaruan bobot melemah pada urutan data yang panjang, sejalan dengan konsep *vanishing gradient*. Kondisi ini terjadi karena komponen *trend* dan *seasonality* dalam deret curah hujan tidak dipisahkan secara eksplisit, sehingga pola periodik dan fluktuasi jangka pendek saling tumpang tindih dan meningkatkan *non-stationarity* data. Menurut Wu et al. (2024), pemisahan *trend* dan *seasonal component* sebelum pemodelan disertai *global optimization* diperlukan untuk menstabilkan proses pembelajaran, sedangkan Ponnoprat (2021) menekankan pentingnya *seasonal integration* agar model *deep learning* mampu menangkap korelasi jangka pendek dan pola musiman jangka panjang secara simultan. Kegagalan model dalam mempertahankan memori temporal ini juga berkontribusi terhadap rendahnya *precision*, *recall*, dan *F1-score* dalam mendeteksi *rainfall spikes*. Hal ini dapat diperbaiki dengan pendekatan *metaheuristic hyperparameter tuning* Hasan (2023) untuk memperkuat adaptasi LSTM terhadap variabilitas sensor, serta penerapan *Deep Reinforcement Learning* berbasis kebijakan-imbalan Nithyashri et al. (2023) yang memungkinkan model menyesuaikan bobot secara dinamis terhadap dinamika cuaca lokal.

F1-score yang rendah disebabkan oleh distribusi data yang tidak seimbang dan karakteristik arsitektur *LSTM* yang cenderung melakukan *smoothing*. Distribusi curah hujan ekstrem yang jarang menyebabkan gradien pembaruan bobot tidak cukup kuat untuk mempelajari pola hujan intens. Berdasarkan klasifikasi kategori curah hujan oleh BMKG, terdapat 285 hari berawan (28.39%), 524 hari hujan ringan (52.19%), 150 hari hujan sedang (14.94%), 42 hari hujan lebat (4.18%), 3 hari hujan sangat lebat (0.30%), dan tidak ada kejadian hujan ekstrem (0.00%), menunjukkan prevalensi kelas berawan dan hujan ringan yang sangat tinggi. Ketimpangan ini membuat model lebih banyak belajar dari pola mayoritas (*non-spike*) dan kurang mampu mengenali peristiwa hujan intens. Pendekatan seperti *reweighting loss function* atau SMOTE dapat memperkuat pembelajaran kelas langka. Penggunaan *Huber Loss* dan *RobustScaler*, meski efektif terhadap *outlier*, menjadikan keluaran model lebih konservatif karena cenderung menekan lonjakan ekstrem. Keterbatasan variasi data pelatihan dan resolusi sensor juga memperkuat bias *smoothing*, sehingga puncak curah hujan sering tereduksi dan peristiwa ekstrem gagal terproyeksi secara akurat.

Model LSTM dalam penelitian kami menghasilkan RMSE 17,05 mm, menunjukkan peningkatan akurasi sekitar 25% dibandingkan Firdaus & Paputungan (2022), yang memperoleh RMSE 22.8 mm, serta kinerja yang lebih stabil dibandingkan Islam & Azmi (2022) dan Kania et al. (2024) yang belum mengintegrasikan data *real-time* dari sensor IoT. Namun, performanya masih berada di bawah pendekatan *Transformer* berbasis *data assimilation* oleh Sun et al. (2025) yang mencapai RMSE 10.3 mm. Hasil ini diakibatkan oleh kecenderungan *smoothing* dan sensitivitas LSTM yang terbatas dalam mendeteksi *rainfall spikes* pada data yang tidak seimbang, diperparah oleh *vanishing gradient* akibat tidak

dipisahkannya komponen *trend* dan *seasonality* dalam deret waktu, yang berbeda dengan arsitektur *Transformer* yang lebih mutakhir dan didukung *data assimilation*. Sistem ini juga mengimplementasikan kalibrasi *anemometer* dengan *polynomial trendline* orde 2 ($R^2 \approx 1$) dan *tipping bucket* berpresisi 0.70 mm per *tip* untuk menjamin akurasi data masukan model. Selain itu, arsitektur ini memiliki keunggulan *end-to-end* karena mencakup akuisisi, transmisi, prediksi, dan visualisasi data cuaca mikrosposial dalam satu alur terintegrasi yang berbiaya rendah, mudah direplikasi, dan dapat dioperasikan secara mandiri oleh petani atau pelaku UMKM.

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi sistem pemantauan berbasis *IoT* dengan model LSTM mampu menampilkan kondisi cuaca dan hasil prediksi secara langsung di lokasi alat dipasang, sehingga menghasilkan informasi mikrosposial yang lebih relevan dibandingkan prediksi BMKG yang bersifat regional, tidak *real-time*, dan tidak mencakup area kecil seperti lahan pertanian atau lokasi mikro. Kontribusi ilmiah utama penelitian ini terletak pada demonstrasi integrasi *real-time IoT* dan LSTM dalam domain mikrosposial yang selama ini didominasi model makro BMKG, sehingga memperluas penerapan *deep learning* pada konteks data terbatas dan lingkungan *non-stationary*. Hasil empiris ini juga menunjukkan arah riset lanjutan pada pengembangan *hybrid model* dengan *sensor fusion (multi-source IoT data)* dan arsitektur *attention-based temporal learning* untuk meningkatkan sensitivitas terhadap curah hujan ekstrem, terutama pada sistem dengan skala prediksi mikro dan keterbatasan sumber daya komputasi.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan platform terintegrasi berbasis *IoT* dan LSTM yang berfungsi secara *real-time* untuk pemantauan dan prediksi cuaca mikrosposial. Sistem ini menyajikan informasi melalui *web dashboard* yang responsif dan mudah diakses oleh pengguna. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi penuh antara akuisisi data sensor dari perangkat *IoT*, pemrosesan prediktif berbasis *deep learning* (LSTM), dan visualisasi hasil dalam satu sistem modular *open-source*. Dengan demikian, sistem ini mampu memberikan informasi cuaca lokal yang lebih spesifik pada titik-titik usaha mikro, berbeda dengan layanan BMKG yang bersifat regional dan tidak selalu *real-time*. Informasi mikrosposial ini memberikan manfaat signifikan bagi petani atau pelaku UMKM dalam pengambilan keputusan operasional, seperti penjadwalan pengeringan, perlindungan hasil panen, dan perencanaan aktivitas pertanian. Pendekatan ini juga memiliki potensi adaptasi luas untuk sistem peringatan dini bencana, irigasi cerdas, dan mitigasi risiko iklim di berbagai wilayah agrikultur. Meskipun demikian, sistem masih memiliki keterbatasan pada resolusi sensor *tipping bucket* yang kurang sensitif terhadap curah hujan ringan, ketergantungan koneksi *internet* tanpa sumber daya cadangan, serta sensitivitas LSTM yang terbatas dalam mendeteksi *rainfall spikes*. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan memperluas variasi data pelatihan, mengoptimalkan arsitektur seperti CNN-LSTM atau GRU, serta menambahkan *fallback system* dan sumber daya cadangan untuk meningkatkan keandalan dan kontinuitas operasional sistem.

REFERENSI

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539–42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>
- Appelt, J. L., Saphangthong, T., Malek, Ž., Verburg, P. H., & van Vliet, J. (2023). Climate change impacts on tree crop suitability in Southeast Asia. *Regional Environmental Change*, 23(3), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02111-5>

- Azizah, F., Suwarsito, S., & Sarjanti, E. (2021). Pengaruh Pola Curah Hujan Terhadap Produktivitas Padi di Kecamatan Bukateja Kabupaten Purbalingga. *Sainteks*, 18(1), 1–7. <https://doi.org/10.30595/sainteks.v18i1.10567>
- Camps-Valls, G., Fernández-Torres, M. Á., Cohrs, K. H., Höhl, A., Castelletti, A., Pacal, A., Robin, C., Martinuzzi, F., Papoutsis, I., Prapas, I., Pérez-Aracil, J., Weigel, K., Gonzalez-Calabuig, M., Reichstein, M., Rabel, M., Giuliani, M., Mahecha, M. D., Popescu, O. I., Pellicer-Valero, O. J., ... Williams, T. (2025). Artificial intelligence for modeling and understanding extreme weather and climate events. *Nature Communications*, 16(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-56573-8>
- Firdaus, R. F., & Paputungan, I. V. (2022). Prediksi Curah Hujan di Kota Bandung Menggunakan Metode Long Short Term Memory. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 2(3), 453–460. <https://doi.org/10.54082/jupin.99>
- Fitriati, U., Rusmayadi, G., Hatta, G. M., & Anggraini, D. (2025). Extreme Climate Change, Rainfall and Temperature in South Kalimantan Province, Indonesia. *Journal of Lifestyle and SDGs Review*, 5(4), 1–21. <https://doi.org/10.47172/2965-730x.sdgsreview.v5.n04.pe06136>
- Fudhlatina, D., & Budiman, F. (2025). Peningkatan Akurasi Prediksi Curah Hujan menggunakan Gradient Boosting dan CatBoost dengan Pendekatan Voting Classifier. *Edumatic: Jurnal Pendidikan Informatika*, 9(1), 51–59. <https://doi.org/10.29408/edumatic.v9i1.28988>
- Hasan, M. W. (2023). Building an IoT temperature and humidity forecasting model based on long short-term memory (LSTM) with improved whale optimization algorithm. *Memories-Materials, Devices, Circuits and Systems*, 6(3), 1–5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memori.2023.100086>
- Hidayatulloh, S., & Aryanto, J. (2023). Sistem Pengendalian Jemuran Otomatis berbasis IoT dengan Logika Fuzzy untuk Pengkondisian Cuaca. *Edumatic: Jurnal Pendidikan Informatika*, 7(2), 287–296. <https://doi.org/10.29408/edumatic.v7i2.21515>
- Ihsan, T., & Derosya, V. (2024). Tinjauan Strategi Pengemasan Buah dan Sayur dalam Memerangi Food Loss dalam Rantai Pasokan Pascapanen di Indonesia. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(4), 1078–1087. <https://doi.org/10.14710/jil.22.4.1078-1087>
- Islam, A. P., & Azmi, M. (2022). Internet Of Things Untuk Informasi Cuaca Menggunakan Node Mcu. *TEKNIMEDIA: Teknologi Informasi Dan Multimedia*, 3(1), 17–22. <https://doi.org/10.46764/teknimedia.v3i1.60>
- Kalaany, C. M. Al, Kimaita, H. N., Abdelmoneim, A. A., Khadra, R., Derardja, B., & Dragonetti, G. (2025). The Potential of Low-Cost IoT-Enabled Agrometeorological Stations: A Systematic Review. *Sensors*, 25(19), 1–21. <https://doi.org/10.3390/s25196020>
- Kania, R., Gunawan, W., Solihati, T. I., Hidayanti, N., & Miftach, A. (2024). Sistem Monitoring Deteksi Cuaca Berbasis Internet Of Things (IoT). *Jurnal Sistem Informasi Dan Informatika (Simika)*, 7(2), 153–163. <https://doi.org/10.47080/simika.v7i2.3323>
- Miller, T., Mikiciuk, G., Durluk, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now-A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(12), 1–32. <https://doi.org/10.3390/s25123583>
- Miller, T., Mikiciuk, G., Durluk, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now-A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 25(12), 1–32. <https://doi.org/10.3390/s25123583>
- Mirzabaev, A., Bezner Kerr, R., Hasegawa, T., Pradhan, P., Wreford, A., Cristina Tirado von der Pahlen, M., & Gurney-Smith, H. (2023). Severe climate change risks to food security

- and nutrition. *Climate Risk Management*, 39(1), 1–10. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.crm.2022.100473>
- Nath, B., Chen, G., O'Sullivan, C. M., & Zare, D. (2024). Research and Technologies to Reduce Grain Postharvest Losses: A Review. *Foods*, 13(12), 1–26. <https://doi.org/10.3390/foods13121875>
- Nithyashri, J., Poluru, R. K., Balakrishnan, S., Ashok Kumar, M., Prabu, P., & Nandhini, S. (2023). IOT based prediction of rainfall forecast in coastal regions using deep reinforcement model. *Measurement: Sensors*, 29(5), 1–5. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100877>
- Nurwarsito, H., & Adaby, R. W. (2024). Pengembangan Internet Of Things (IOT) Dalam Perekaman Data Iklim Mikro Dengan Platform Thingsboard. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 11(6), 1385–1398. <https://doi.org/10.25126/jtiik.2024118987>
- Phuong, T. T., Vien, T. D., Son, C. T., Thuy, D. T., & Greiving, S. (2024). Impact of Climate Change on Agricultural Production and Food Security: A Case Study in the Mekong River Delta of Vietnam. *Sustainability (Switzerland)*, 16(17), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su16177776>
- Pongsapan, A. S., & Allo, R. (2022). Karakteristik Pengering Surya (Solar Dryer) Dengan Turbin Ventilator. *Jurnal Teknik AMATA*, 3(2), 1–9. <https://doi.org/10.55334/jtam.v3i2.297>
- Ponnoprat, D. (2021). Short-term daily precipitation forecasting with seasonally-integrated autoencoder. *Applied Soft Computing*, 102(4), 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107083>
- Saleem, A., Anwar, S., Nawaz, T., Fahad, S., Saud, S., Ur Rahman, T., Khan, M. N. R., & Nawaz, T. (2025). Securing a sustainable future: the climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 11(3), 595–611. <https://doi.org/10.1007/s43994-024-00177-3>
- Sun, X., Zhong, X., Xu, X., Huang, Y., Li, H., Neelin, J. D., Chen, D., Feng, J., Han, W., Wu, L., & Qi, Y. (2025). A data-to-forecast machine learning system for global weather. *Nature Communications*, 16(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62024-1>
- Syahreza, A., Ningrum, N. K., & Syahrazy, M. A. (2024). Perbandingan Kinerja Model Prediksi Cuaca: Random Forest, Support Vector Regression, dan XGBoost. *Edumatic: Jurnal Pendidikan Informatika*, 8(2), 526–534. <https://doi.org/10.29408/edumatic.v8i2.27640>
- Vianita, E., & Tantyoko, H. (2025). A Comparative Study of Machine Learning Models for Short-Term Load Forecasting. *Jurnal Masyarakat Informatika*, 16(1), 93–103. <https://doi.org/10.14710/jmasif.16.1.73130>
- Wu, Y., Meng, X., Zhang, J., He, Y., Romo, J. A., Dong, Y., & Lu, D. (2024). Effective LSTMs with seasonal-trend decomposition and adaptive learning and niching-based backtracking search algorithm for time series forecasting. *Expert Systems with Applications*, 236(12), 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121202>
- Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., Huang, S., Chen, H., & Ao, X. (2024). Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review. *Agronomy*, 14(7), 1–19. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071360>
- Yusuf, M. M., Martanto, M., & Hayati, U. (2024). Analisis Pola Cuaca Extrem Menggunakan Long Short Term Memory Pada Wilayah Jawa Barat. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 7(6), 3781–3788. <https://doi.org/10.36040/jati.v7i6.8288>