

Implementasi Early Warning System (EWS) Banjir Berbasis IoT Menggunakan Machine Learning dan Wireless Sensor Network

1st Diki Rizki Maulana*School of Electrical Engineering
Telkom University*

Bandung, Indonesia

dikirizkm@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Faris Kautsar*School of Electrical Engineering
Telkom University*

Bandung, Indonesia

farisfrz@student.telkomuniversity.ac.i
d3rd Rischa Zefaniya Br Sinulingga*School of Electrical Engineering
Telkom University*

Bandung, Indonesia

rischazefaniya@student.telkomuniversity.ac.i
d4th Chantika Rahma Galih Abu A'syifa*School of Electrical Engineering**Telkom University*

Bandung, Indonesia

chantikaragaa@student.telkomuniversity.ac.i
d5th Brahmanta Aji Pramudita*The University Center of Excellence**for Intelligent Sensing-IoT**Telkom University*

Bandung, Indonesia

brahmantyaajip@telkomuniversity.ac.i
d6th Dhoni Putra Setiawan*School of Electrical Engineering**Telkom University*

Bandung, Indonesia

setiawandhoni@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Cuaca ekstrem yang sulit diprediksi menjadi ancaman serius, terutama banjir di wilayah rawan seperti Dayeuhkolot, Kabupaten Bandung, yang berada di pertemuan Sungai Citarum dan Cikapundung. Sistem peringatan dini yang masih manual dari BBWS menghadapi kendala dalam kecepatan dan integrasi data. Untuk mengatasi hal ini, dirancang sistem prediksi cuaca dan peringatan banjir berbasis Wireless Sensor Network (WSN) dan Internet of Things (IoT), yang dilengkapi algoritma pembelajaran mesin untuk meningkatkan akurasi prediksi lokal. Sistem ini menggunakan sensor cuaca yang terhubung melalui jaringan IoT untuk mengumpulkan data secara real-time, lalu dianalisis dengan model XGBoost. Dua lokasi penerapan adalah Teras Cikapundung dan Polder Cipalasari. Untuk meningkatkan akurasi pembacaan sensor, dilakukan kalibrasi menggunakan regresi linear. Sistem ini juga terintegrasi dengan aplikasi seluler dan website We-Weather sebagai media pemantauan. Hasil pengujian menunjukkan model memiliki akurasi 96,37%, presisi 97,74%, recall 96,37%, dan F1-score 96,79%, menandakan performa klasifikasi yang tinggi. Pengujian usability melalui *System Usability Scale (SUS)* juga menunjukkan skor sangat baik, membuktikan kemudahan penggunaan aplikasi dan website. Sistem ini diharapkan mampu memperkuat mitigasi bencana hidrometeorologi dan mendukung pengambilan keputusan oleh masyarakat dan pemangku kepentingan seperti petugas BBWS.

Kata kunci— Cuaca ekstrem, Early Warning System, banjir, Machine Learning, Wireless Sensor Network, XGBoost.

I. PENDAHULUAN

a. Latar Belakang

Cuaca ekstrem sering kali sulit diperkirakan dan bisa muncul tanpa diduga, sehingga dapat menimbulkan ancaman besar terhadap kehidupan manusia [1], [2]. Salah satu dampak signifikan dari cuaca ekstrem di Indonesia adalah banjir. Banjir merupakan bencana yang menjadi masalah bagi masyarakat yang tinggal di daerah dataran rendah maupun di bantaran sungai. Penyebab terjadinya banjir umumnya

terdapat peningkatan volume air di bantaran sungai karena curah hujan yang tinggi [3]. Sehingga memungkinkan terjadinya luapan yang tidak terkendali ke wilayah pemukiman sekitar.

Dayeuhkolot, Kabupaten Bandung, merupakan wilayah cekungan yang sangat rentan terhadap banjir. Lokasinya yang berada di pertemuan Sungai Cikapundung dan Sungai Citarum menyebabkan peningkatan risiko banjir saat curah hujan tinggi, karena volume air dari kedua sungai tersebut meningkat dan menyebabkan kenaikan muka air. Selain faktor alam, pertumbuhan penduduk yang pesat juga memperparah kondisi ini. Kepadatan bangunan menyebabkan berkurangnya area resapan air, sementara sedimentasi di sungai turut memicu penurunan muka tanah. Pada Januari 2024, banjir besar melanda Dayeuhkolot dan merendam sekitar 2.000 rumah. Ketinggian air bisa mencapai satu meter, memaksa ribuan warga mengungsi dan menimbulkan kerugian ekonomi yang signifikan, terutama di sektor pertanian, transportasi, dan kesehatan. Banjir di wilayah ini menjadi ancaman serius karena sering terjadi secara tiba-tiba dan sulit diprediksi.

Pencegahan banjir di Dayeuhkolot dilakukan melalui informasi dari petugas Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS), yang bertugas memantau kondisi sungai. Informasi disampaikan melalui aplikasi WhatsApp, di mana petugas BBWS Cikapundung mengirimkan laporan ke petugas di Dayeuhkolot. Setelah menerima informasi, peringatan dini diberikan melalui sirine, dan kolam di Polder Cipalasari dikosongkan untuk menampung air. Namun, sistem ini masih manual dan kurang responsif karena tidak terintegrasi secara otomatis, sehingga menghambat upaya mitigasi. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem prediksi cuaca yang lebih akurat dan spesifik agar masyarakat dapat lebih siap menghadapi potensi banjir.

b. Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi permasalahan tersebut, penelitian ini memiliki beberapa tujuan, diantaranya :

1. Merancang dan membangun alat yang mampu menyajikan informasi serta melakukan prediksi kondisi cuaca di wilayah Cikapundung dan Cipalasari atau tertentu. Dengan demikian, perangkat ini diharapkan dapat membantu masyarakat dalam meningkatkan kesiapsiagaan terhadap perubahan cuaca dan meminimalkan dampak negatif yang mungkin timbul.
2. Membuat teknologi berbasis *Internet of Things* (IoT) dengan model pembelajaran mesin ke dalam sistem sehingga ketepatan dalam prediksi kondisi cuaca tinggi.
3. Menyediakan sistem peringatan dini untuk kejadian banjir dalam bentuk notifikasi, sehingga masyarakat dapat meningkatkan kesiapsiagaan dan melakukan mitigasi secara lebih efektif.

II. KAJIAN TEORI

A. Banjir

Banjir yaitu suatu fenomena alam yang dapat berubah menjadi bencana ketika wilayah dataran banjir dan daerah tangkapan air dimanfaatkan untuk pemukiman dan pembangunan. Pertumbuhan populasi yang pesat telah mengubah pola pengelolaan sumber daya alam, sehingga meningkatkan risiko banjir. Perubahan tutupan lahan dari hutan menjadi lahan pertanian dan permukiman mengurangi kemampuan daerah tangkapan air dalam menyerap dan menahan air, serta memperbesar aliran permukaan [4].

B. Internet of Things

Internet of Things (IoT) adalah konsep teknologi yang memungkinkan perangkat fisik seperti sensor, aktuator dan mikrokontroler untuk saling terhubung melalui jaringan internet [5]. Melalui koneksi ini, perangkat-perangkat tersebut dapat secara otomatis mengumpulkan, mengirimkan dan memproses data tanpa intervensi manusia secara langsung. IoT menggabungkan kemampuan komputasi, komunikasi data, dan sensorik dalam satu sistem yang terintegrasi, sehingga memungkinkan pemantauan dan pengendalian lingkungan secara efisien dan real-time.

C. Early Warning System

Early Warning System (EWS) adalah suatu sistem yang dibuat untuk mendeteksi potensi bencana secara dini dan memberikan sebuah peringatan kepada masyarakat serta pihak berwenang sebelum dampak yang lebih besar terjadi. Dalam konteks banjir sebagai bagian dari bencana hidrometeorologi, EWS berfungsi sebagai alat mitigasi yang menggabungkan teknologi pemantauan lingkungan berbasis Internet of Things (IoT), analisis data real-time, dan komunikasi risiko. Sistem ini bekerja dengan mengumpulkan data seperti curah hujan, tinggi muka air sungai, dan kecepatan aliran air melalui sensor, yang kemudian dianalisis menggunakan model hidrologi dan algoritma prediktif berbasis machine learning untuk memperkirakan potensi banjir. Jika terdeteksi ancaman, sistem akan menyampaikan peringatan dini melalui berbagai saluran komunikasi seperti sirine, SMS, aplikasi seluler, media sosial, dan pengeras suara lokal, sehingga masyarakat dan instansi terkait memiliki waktu yang cukup untuk melakukan evakuasi atau tindakan pencegahan [6].

D. Machine Learning

Machine Learning merupakan teknologi yang memungkinkan sistem komputer untuk memperoleh pengetahuan dari data dan menghasilkan keputusan atau prediksi tanpa perlu instruksi eksplisit dalam pemrograman. ML bekerja dengan mengenali pola dalam data, lalu menggunakan pola tersebut untuk memecahkan masalah atau memprediksi hasil di masa depan [7]. Dalam sistem cuaca dan peringatan dini banjir, ML digunakan untuk menganalisis data sensor secara otomatis dan mendeteksi potensi bahaya lebih cepat dan akurat.

XGBoost merupakan pengembangan dari metode Gradient Boosting yang dilengkapi dengan berbagai fitur untuk meningkatkan efisiensi komputasi dan mengurangi risiko overfitting [1]. Berbeda dengan versi standar Gradient Boosting yang memiliki kontrol *overfitting* terbatas, XGBoost menawarkan mekanisme regularisasi yang lebih kuat. Dengan optimasi penggunaan memori dan pemanfaatan cache, algoritma ini mampu bekerja secara cepat dan efisien. Dalam pendekatannya, XGBoost menggunakan fungsi objektif yang menggabungkan fungsi loss dan komponen regularisasi untuk menyeimbangkan antara akurasi dan kompleksitas model.

$$Objective = Loss + Regularization \quad (1)$$

Pada pembelajaran mesin, fungsi objektif dirancang untuk meminimalkan nilai total yang terdiri dari fungsi kerugian dan komponen regularisasi, karena fokus penelitian ini adalah pada proses minimisasi, bukan maksimisasi.

$$L(\emptyset) = \sum_i l(\hat{y}_i, y_i) + \sum_k \Omega(f_k) \quad (2)$$

$$\sum_i l(\hat{y}_i, y_i) = loss\ function \quad (3)$$

$$\sum_k \Omega(f_k) = Regularization \quad (4)$$

E. Performa Evaluasi Machine Learning

- Evaluasi Performa Model Klasifikasi

Confusion matrix adalah sebuah tabel evaluasi yang digunakan untuk mengukur kinerja model klasifikasi, terutama dalam *machine learning* [3].

Tabel 1. Confusion Matrix

		Predicted	
		Negative (N)	Positive (P)
Actual	Negative (N)	True Negative (TN)	False Positive (FP)
	Positive (P)	False Negative (FN)	True Positive (TP)

Performa *machine learning* yang baik atau tidak dihasilkan dari *confusion matrix* dengan melakukan perhitungan *accuracy*, *precision*, *recall*, dan *f1-score*. Berikut persamaan perhitungan performa dari tabel *confusion matrix*.

Akurasi adalah metrik dasar yang mengukur jumlah prediksi yang benar yang dibuat oleh sebuah model pada

seluruh dataset uji. Akurasi berfungsi sebagai ukuran yang dapat diandalkan dalam menilai kinerja model [8].

$$\text{Akurasi} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (5)$$

Presisi menunjukkan proporsi prediksi positif yang benar di antara seluruh prediksi positif. Metrik ini penting untuk menilai keakuratan model, terutama dalam situasi di mana false positive lebih menjadi perhatian dibandingkan false negative [8].

$$\text{Presisi} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

Recall mengukur sejauh mana model mampu mengidentifikasi kasus positif yang sebenarnya. Metrik ini sangat penting ketika meminimalkan false negative lebih diutamakan dibandingkan false positive. Recall yang nilainya tinggi menunjukkan bahwa sebagian besar kasus positif (*true positives* dan *false negatives*) berhasil diklasifikasikan sebagai positif (*true positives*) [8]. Namun, hal ini dapat meningkatkan jumlah *false positive* dan berpotensi menurunkan akurasi keseluruhan.

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

Skor F1 adalah metrik yang menggabungkan presisi dan recall menggunakan rata-rata harmonik. Metrik ini memberikan ukuran tunggal yang menyeimbangkan kedua aspek secara bersamaan. Skor F1 akan mencapai nilai maksimum ketika presisi dan recall memiliki nilai yang sama.

$$\text{F1-Score} = \frac{FP}{TN + FP} \quad (8)$$

- Evaluasi Performa Model Regresi

Evaluasi performa model regresi dalam machine learning dilakukan dengan menilai seberapa akurat prediksi model dibandingkan dengan nilai sebenarnya. Berbeda dengan klasifikasi yang menggunakan confusion matrix, regresi menggunakan metrik evaluasi berdasarkan selisih antara nilai prediksi dan aktual. Struktur data yang digunakan menyimpan nilai prediksi, aktual, dan residual, yang kemudian digunakan untuk menghitung metrik seperti Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), dan koefisien determinasi (R^2). Berikut persamaannya:

Mean Absolute Error (MAE) merupakan ukuran rata-rata dari selisih absolut antara nilai aktual dan nilai prediksi [9]. MAE digunakan sebagai metode untuk menilai tingkat akurasi suatu model statistik dalam melakukan prediksi. Nilai MAE dapat dihitung menggunakan rumus (9):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |f_t - y_t| \quad (9)$$

dengan keterangan:

f_t = nilai hasil perkiraan/prediksi ke- t ($t = 1, \dots, n$)

y_t = nilai sebenarnya (aktual) ke- t ($t = 1, \dots, n$)

Root Mean Square Error (RMSE) merupakan rata-rata dari kuadrat selisih antara nilai prediksi dan nilai aktual. RMSE juga digunakan sebagai indikator untuk mengukur seberapa besar kesalahan yang dihasilkan oleh suatu model prediksi. Rumus RMSE sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Y'_t - Y_t)^2}{n}} \quad (10)$$

dengan keterangan:

Y'_t = nilai data sebenarnya ke- t ($t = 1, \dots, n$)

Y_t = nilai sebenarnya (aktual) ke- t ($t = 1, \dots, n$),

n = banyaknya data yang diuji.

R^2 merupakan indikator yang menunjukkan sejauh mana variabel independen mampu menjelaskan variasi dari variabel dependen. Nilai ini berada dalam rentang antara 0 hingga 1, yang mencerminkan seberapa besar kontribusi kolektif dari variabel independen terhadap perubahan pada variabel dependen.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (y_t - \hat{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (11)$$

Dengan keterangan:

y_t = data yang diuji respon ke- t ($t = 1, \dots, n$),

\hat{y} = ramalan respon ke- t ($t = 1, \dots, n$),

\bar{y} = rata-rata,

n = banyaknya data yang diuji.

F. Wireless Sensor Network

Wireless Sensor Network (WSN) merupakan jaringan yang terdiri dari sejumlah node sensor kecil yang saling terhubung secara nirkabel dan berfungsi untuk memantau serta mengumpulkan data dari lingkungan sekitar [10]. Setiap node sensor dalam WSN memiliki kemampuan untuk mendeteksi parameter fisik seperti suhu, kelembapan, tekanan udara, getaran dan tinggi muka air, tergantung pada jenis sensor yang digunakan. Data yang diperoleh dari sensor-sensor ini akan dikirimkan secara otomatis ke pusat pengolahan atau server melalui jaringan komunikasi tanpa kabel, seperti ZigBee, LoRa, Wi-Fi, atau GSM.

G. Quality of Service

Quality of Service (QoS) adalah istilah yang menggambarkan seberapa baik suatu layanan jaringan atau telekomunikasi yang menentukan kemampuannya dalam memenuhi kebutuhan pengguna, baik yang dinyatakan secara langsung atau tersirat. Penggunaan QoS memungkinkan organisasi untuk mengoptimalkan kinerja aplikasi mereka dengan memantau laju bit, penundaan, jitter, dan laju paket jaringan. Hal ini membantu dalam merancang ulang lalu lintas di jaringan dan mengatur rute paket data untuk mengurangi penundaan transmisi, memastikan kualitas layanan yang diinginkan, dan memberikan pengalaman pengguna yang memuaskan.

III. METODE

A. Batasan dan Spesifikasi

Perencanaan pemasangan perangkat untuk sistem prediksi cuaca dan peringatan dini banjir akan dilakukan di wilayah BBWS Cikapusund dan BBWS Cipalasari. Lokasi ini dipilih karena memiliki posisi strategis sebagai pusat informasi penting dalam upaya mitigasi banjir, serta dikenal sebagai salah satu daerah dengan kontribusi debit air tertinggi, khususnya menuju kawasan Dayeuhkolot. Mengacu pada studi sebelumnya, sistem pemantauan cuaca berbasis teknologi Internet of Things (IoT) dirancang untuk mengukur berbagai parameter seperti suhu, kelembapan udara, intensitas cahaya, arah dan kecepatan angin, deteksi hujan, serta volume curah hujan, dengan tingkat akurasi minimal 80–85% [11], [12]. Sistem ini juga dikembangkan lebih lanjut dengan kemampuan untuk memantau tinggi muka air sungai [13], [14].

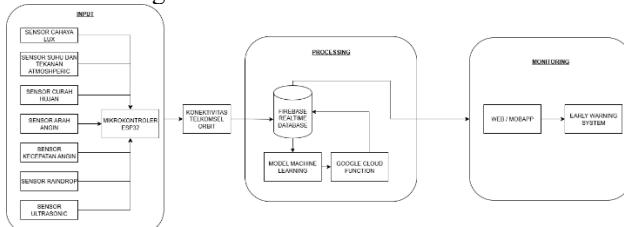
Detail mengenai batasan dan spesifikasi produk telah dijelaskan dalam Tabel 3.1, dimana mencakup parameter-parameter penting untuk menjamin kinerja sistem sesuai dengan kebutuhan alat:

Tabel 2. Batasan dan Spesifikasi

No	Batasan	Spesifikasi
1.	Produk dapat mendeteksi beberapa parameter untuk memprediksi cuaca	<ul style="list-style-type: none"> - Spesifikasi 1 : Mendeteksi suhu dari rentang 15°C - 38°C dan memiliki akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ [15]. - Spesifikasi 2 : Mendeteksi kelembapan dari rentang 20%RH – 98%RH dengan akurasi $\pm 2\%$RH [15]. - Spesifikasi 3 : Mendeteksi tekanan udara di rentang 940hPa – 1040hPa (kelipatan 100x pascal, yang merupakan satuan SI untuk tekanan) dan memiliki akurasi $\pm 0,12$ hPa [15]. - Spesifikasi 4 : Mendeteksi intensitas cahaya matahari luar ruangan dengan rentang maksimal 0 - 65535 Lux. - Spesifikasi 5 : Mendeteksi apabila mulai terjadi hujan. - Spesifikasi 6 : Mendeteksi curah hujan dengan rentang minimal 0.5mm/hari dan maksimal >150mm/hari [15], [16]

No	Batasan	Spesifikasi
		<ul style="list-style-type: none"> - Spesifikasi 7 : Mendeteksi pergerakan angin dari berbagai arah - Spesifikasi 8 : Menghitung kecepatan angin dengan rentang 0 ms – 4,5 ms [15]. - Spesifikasi 9 : Mampu memantau tinggi muka air sungai. Dengan jarak penempatan alat maksimal 4 meter dari permukaan air [17].
2.	Produk dapat mengirim data parameter cuaca ke Database	<ul style="list-style-type: none"> Produk dapat mengirim data parameter cuaca ke Database
3.	Produk memiliki sistem pemantauan untuk prediksi cuaca dan peringatan dini	<ul style="list-style-type: none"> - Spesifikasi 1 : Menggunakan Model <i>Machine Learning</i> yang dapat memprediksi cuaca berdasarkan pola data historis dan menghasilkan akurasi minimal 80-85%. - Spesifikasi 2 : Sistem pemantauan yang mudah digunakan oleh pengguna dengan menampilkan informasi cuaca, prediksi cuaca dan peringatan dini banjir secara tepat dan akurat.

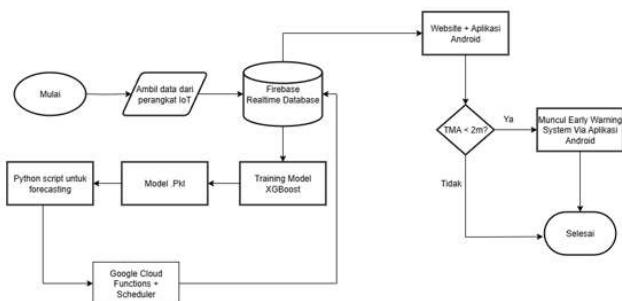
B. Blok Diagram



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Blok diagram sistem yang ditujukan pada Gambar 1 merupakan Gambaran secara keseluruhan yang terdiri dari tiga tahapan utama: Input, Processing, dan Monitoring. Pada tahap Input, mikrokontroler mengumpulkan data dari sensor dan mengirimkannya ke tahap berikutnya melalui koneksi seluler. Selanjutnya, pada tahap Processing, data tersebut disimpan dalam Realtime Database dan digunakan untuk melatih model Machine Learning. Setelah model berhasil dilatih, ia akan di-deploy ke platform Google Cloud dan berjalan secara otomatis, dengan hasil prediksi disimpan kembali ke Firebase Realtime Database. Pada tahap Monitoring, data cuaca real-time dan hasil prediksi ditampilkan melalui website dan aplikasi Android, yang juga dilengkapi dengan fitur *Early Warning System* (EWS) yang aktif ketika tinggi muka air melebihi ambang batas yang telah ditentukan.

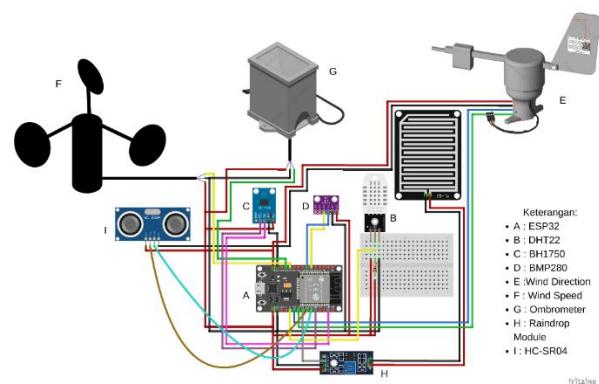
C. Flowchart Alur Kerja Sistem



Gambar 2. Flowchart Alur Kerja Sistem

Flowchart pada Gambar 2 menggambarkan alur sistem pengumpulan, pemrosesan, penyimpanan, dan penerapan klasifikasi machine learning untuk data cuaca dalam sistem peringatan dini banjir (EWS). Proses dimulai saat perangkat IoT aktif dan mulai mengirimkan data cuaca secara berkala ke Firebase Realtime Database. Data tersebut kemudian diekspor untuk melatih model Machine Learning menggunakan algoritma XGBoost, dan hasil model disimpan dalam format .pkl. Sebuah script Python mengambil data terbaru dari Firebase untuk melakukan prediksi, lalu hasilnya dikirim kembali ke Firebase. Script ini dijalankan otomatis melalui Google Cloud Functions dan dijadwalkan dengan Cloud Scheduler. Pemantauan dilakukan melalui website dan aplikasi Android, yang akan menampilkan notifikasi peringatan dini jika tinggi muka air melebihi 2 meter.

D. Design Sistem Perangkat Keras

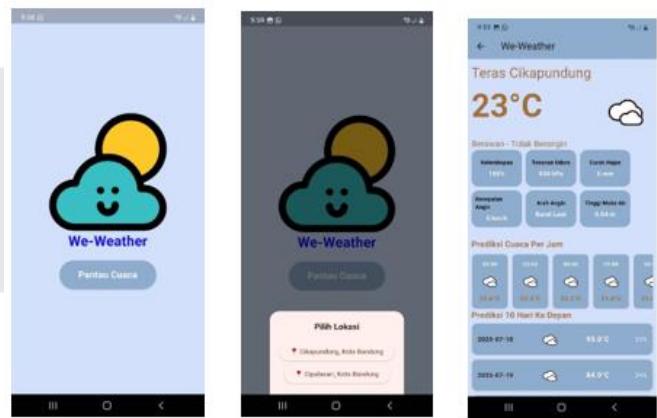


Gambar 3. Design Sistem Perangkat Keras

Gambar 3 menunjukkan desain sistem perangkat IoT yang terdiri dari berbagai komponen yang direpresentasikan dengan simbol-simbol tertentu. Simbol ‘A’ menunjukkan mikrokontroler ESP32, ‘B’ adalah sensor suhu dan kelembaban DHT22, ‘C’ merupakan sensor cahaya BH1750, ‘D’ adalah sensor tekanan dan suhu BMP280, ‘E’ menunjukkan arah angin, ‘F’ adalah sensor kecepatan angin, ‘G’ merepresentasikan sensor curah hujan, ‘H’ adalah modul raindrop untuk mendeteksi tetesan air, dan ‘I’ menunjukkan sensor ultrasonik HC-SR04 untuk mengukur tinggi muka air.

E. Tampilan Aplikasi

We-weather merupakan aplikasi Android yang dirancang untuk memvisualisasikan dan memantau data prediksi cuaca. Sistem ini menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk membaca data dari berbagai sensor, yang kemudian dikirim ke Firebase sebagai cloud database untuk diolah lebih lanjut. Aplikasi ini dirancang menggunakan Figma agar tampil menarik dan mudah digunakan, serta dikembangkan di Visual Studio Code dengan framework Flutter, sehingga menghasilkan aplikasi yang cepat, responsif, dan optimal untuk pengguna.



Gambar 4. Tampilan Aplikasi (1)



Gambar 5. Tampilan Aplikasi (2)

Gambar 4 dan 5 menampilkan antarmuka halaman utama aplikasi, di mana pengguna dapat memantau cuaca dengan menekan tombol "Pantau Cuaca". Setelah itu, panel navigasi "Pilih Lokasi" akan muncul dan meminta pengguna memilih lokasi seperti Cikapundung atau Cipalasari, sebelum diarahkan ke dashboard We-Weather. Gambar tersebut menunjukkan tampilan dashboard yang menyajikan informasi cuaca terkini dan prediksi untuk wilayah Cikapundung, termasuk parameter seperti suhu, kelembapan, curah hujan, kecepatan angin, tekanan udara, dan tinggi muka air, serta status cuaca visual seperti "Berawan - Tidak Berangin". Pengguna juga dapat melihat prakiraan cuaca per jam dan harian hingga 10 hari ke depan. Pada gambar juga menampilkan notifikasi peringatan dini banjir dalam bentuk pop-up mencolok dengan latar merah, ikon peringatan, dan pesan teks yang menunjukkan status serta level ketinggian air, agar pengguna dapat segera memahami kondisi dan melakukan tindakan mitigasi.

F. Tampilan Website



Gambar 6. Tampilan Website

Gambar 6 menampilkan antarmuka website "We Weather" yang dirancang sederhana dan interaktif untuk memudahkan pengguna. Pada halaman utama, pengguna dapat mengakses prakiraan cuaca melalui tombol "cek cuaca" (fitur A) dan melihat informasi cuaca hari ini pada bagian "Today's Weather". Navigasi (fitur B) memungkinkan akses ke prakiraan cuaca harian, per jam, dan 10 hari ke depan. Fitur C menampilkan kondisi cuaca terkini di dua lokasi, yaitu Cikapundung dan Cipalasari, sementara fitur D menyajikan parameter cuaca seperti tekanan udara, tinggi muka air, kecepatan dan arah angin, kelembapan, serta

intensitas cahaya. Prakiraan cuaca 24 jam ke depan ditampilkan pada fitur E, dan prakiraan 10 hari ke depan dalam bentuk tabel interaktif tersedia di fitur G. Pengguna juga dapat melihat catatan cuaca 10 hari terakhir melalui tautan di fitur F, yang ditampilkan secara visual pada fitur H.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Skenario Umum Pengujian

Berdasarkan permasalahan yang timbul akibat perubahan cuaca yang tidak menentu dan potensi banjir yang dapat merugikan masyarakat, telah dirancang sebuah sistem pemantauan dan peringatan dini berbasis stasiun cuaca. Sistem ini bertujuan untuk menyediakan informasi meteorologi yang akurat guna mendukung pengambilan keputusan dalam menghadapi risiko bencana hidrometeorologi. Dengan mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) dan algoritma pembelajaran mesin XGBoost, sistem ini mampu memprediksi kondisi cuaca dalam jangka waktu 24 jam hingga sepuluh hari ke depan. Untuk mengevaluasi efektivitas dan akurasi sistem, akan dilakukan serangkaian uji coba yang mencakup aspek teknis dan fungsional secara menyeluruh:

1. Pengujian Akurasi Sensor IoT: Melakukan perbandingan hasil pengukuran sensor dengan alat standar industri serta menerapkan metode regresi linear, guna memastikan bahwa data yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi dan keandalan yang tinggi.
2. Evaluasi akurasi model machine learning XGBoost: Mengevaluasi sejauh mana kemampuan model dalam memprediksi kondisi cuaca secara tepat, berdasarkan data yang diperoleh dari sensor IoT.
3. Evaluasi Performa Wireless Sensor Network Berdasarkan Parameter QoS: Menilai kualitas layanan komunikasi data melalui jaringan Orbit Telkomsel.
4. Pengujian Aplikasi seluler dan Website We-Weather: Melakukan pengujian dengan metode *System Usability Scale*. Kuesioner ini berfungsi untuk mendapatkan umpan balik dari pengguna agar mengetahui kepuasan dan kebergunaan dari aplikasi seluler dan website We-Weather.

Proses implementasi stasiun cuaca ini berlangsung pada bulan Juni, dimana ditempatkan di dua lokasi yakni polder Cipalasari, yang difokuskan untuk prediksi cuaca, serta Cikapundung, yang selain memantau cuaca juga dilengkapi sensor ketinggian air untuk mendeteksi potensi banjir.



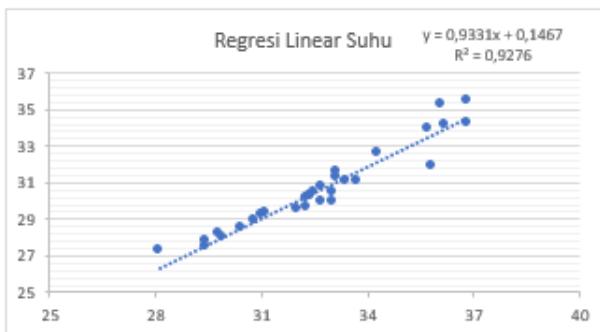
Gambar 7. Penempatan Alat di Cikapundung



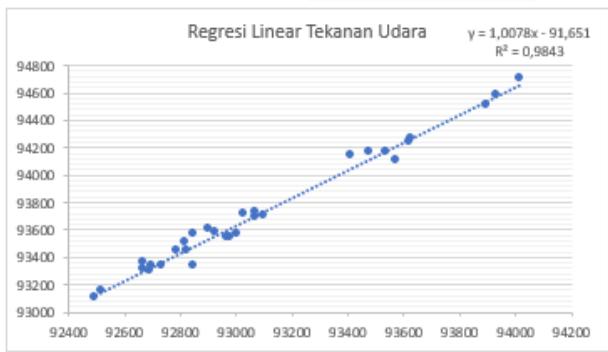
Gambar 8. Penempatan Alat di Cipalasari

Dengan menerapkan strategi pengujian yang komprehensif sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7 dan Gambar 8, efektivitas sistem pendeksi cuaca dapat ditingkatkan, sehingga mampu memberikan prediksi cuaca yang lebih akurat dan dapat diandalkan.

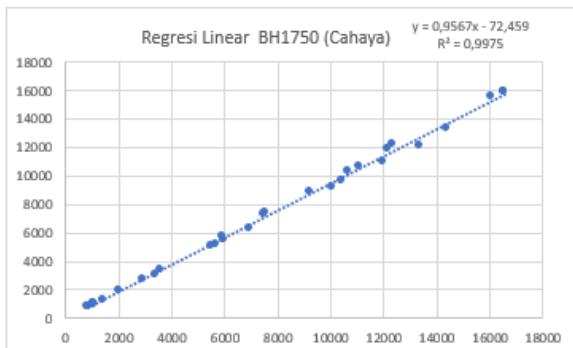
B. Pengukuran Sensor IoT



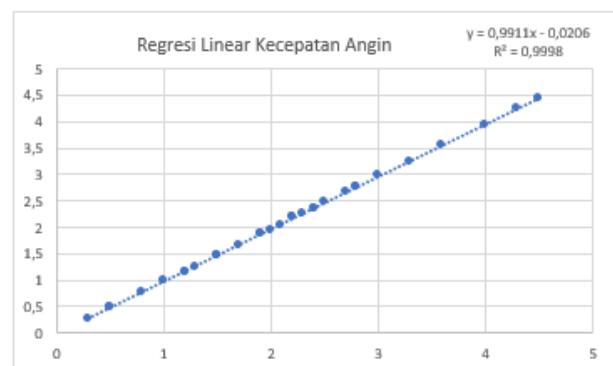
Gambar 9. Regresi Linear Suhu



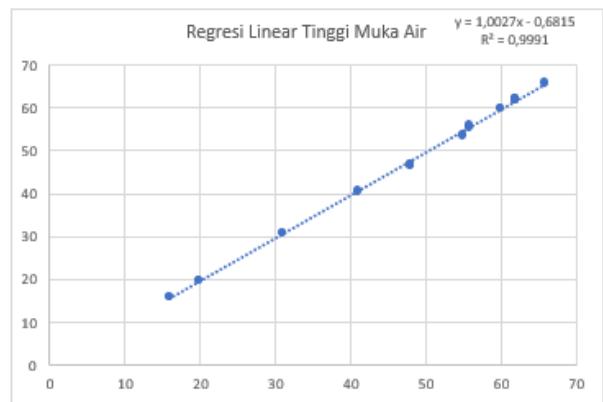
Gambar 10. Regresi Linear Tekanan Udara



Gambar 11. Regresi Linear Cahaya



Gambar 9. Regresi Linear Kecepatan Angin



Gambar 9. Regresi Linear Tinggi Muka Air

Pengujian akurasi sensor diuji menggunakan pendekatan regresi linear, dengan pengumpulan data secara bersamaan dari sensor IoT dan alat ukur industri yang multifungsi dalam berbagai kondisi cuaca dan lingkungan. Hasil data yang didapat dilakukan analisis untuk menentukan koefisien regresi linear, yang digunakan untuk mengkalibrasi hasil pembacaan sensor agar lebih presisi. Proses analisis ini mencakup perhitungan standar error, nilai koefisien determinasi (R^2), serta evaluasi terhadap residu guna memastikan bahwa model regresi linear secara akurat menggambarkan hubungan antara data sensor dan data referensi.

Pengujian menunjukkan adanya peningkatan yang signifikan dalam akurasi sensor. Keberhasilan ini dipengaruhi oleh presisi alat ukur anemometer sebagai standar acuan, kemampuan sistem dalam mengumpulkan data di berbagai kondisi cuaca, serta penerapan metode regresi linear yang efektif untuk mengkalibrasi hasil pembacaan sensor. Namun, pada penelitian ini terdapat beberapa tantangan, seperti perubahan kondisi lingkungan yang menyebabkan ketidakstabilan data pada sensor, serta keterbatasan dalam proses kalibrasi saat menghadapi cuaca ekstrem. Untuk mengatasi hal tersebut, disarankan pengembangan prosedur kalibrasi yang lebih komprehensif dengan memperluas cakupan kondisi pengujian dan mempertimbangkan penggunaan metode kalibrasi yang lebih canggih, seperti algoritma regresi non-linear atau pendekatan kalibrasi adaptif, agar hasil pembacaan sensor lebih sesuai dengan kondisi cuaca yang sebenarnya.

C. Performa Machine Learning

Hasil evaluasi performa model yang ditampilkan pada Tabel 3 mengindikasikan bahwa algoritma XGBoost memiliki tingkat akurasi dan efektivitas yang tinggi dalam melakukan klasifikasi. Model XGBoost menunjukkan performa yang tinggi dengan nilai akurasi sebesar 96,37%, precision 97,74%, recall 96,37%, dan f1-score 96,79%. Evaluasi yang dilakukan menggunakan data sekunder yang berasal dari database lokal dan tidak termasuk dalam data pelatihan, sehingga proses validasi metrik seperti akurasi, precision, recall, dan f1-score dilakukan secara independen dari data yang digunakan saat pelatihan model *machine learning*.

Tabel 3. Perbandingsn Kinerja Model *Machine Learning*

Method	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Random Forest	83,69%	95,46%	83,69%	87,88%
Support Vector Machine	88,37%	95,87%	88,37%	90,98%
XGBoost	96,37%	97,74%	96,37%	96,79%

Tabel 4 menyajikan hasil evaluasi performa model regresi XGBoost terhadap empat variabel target, yaitu Suhu DHT, Kelembapan, Tekanan Udara, dan Curah Hujan. Berdasarkan nilai R^2 Score, model menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi dalam memprediksi Suhu DHT (99,61%), diikuti oleh Tekanan Udara (96,58%) dan Kelembapan (94,56%). Sementara itu, prediksi terhadap Curah Hujan memiliki performa yang lebih rendah dengan R^2 sebesar 75,61%, namun masih dalam kategori cukup baik.

Tabel 4. Evaluasi Model Regresi XGBoost

Target	R^2 Score	MAE	RMSE
Suhu_DHT	99,61%	0,0979	0,1923
Kelembapan	94,56%	1,5481	2,6132
Tekanan Udara	96,58%	1,8704	27,8673
Curah Hujan	75,61%	1,9239	3,4709

D. Pengujian *Quality of Service*

Tabel 5. Hasil Pengujian Wireshark

Parameter	Nilai
Durasi pengamatan	30 Menit
Rata-rata <i>delay</i>	183,32 ms
Rata-rata <i>jitter</i>	111,29 ms
<i>Throughput</i>	502 bit/s
<i>Packet Loss</i>	0%

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan perangkat lunak Wireshark, diperoleh data rekaman paket jaringan dari proses pengiriman data sensor menggunakan perangkat ESP32 ke Firebase Realtime Database. Paket-paket jaringan yang terekam terdiri dari beberapa tahapan penting dalam komunikasi TCP dan TLS, yaitu proses pembukaan koneksi (*TCP handshake*), proses pengamanan koneksi (*TLS handshake*), dan pengiriman data aplikasi (*TLS Application Data*). *Delay* dihitung berdasarkan waktu yang dibutuhkan sejak dimulainya proses komunikasi sampai data sensor berhasil dikirimkan (*Application Data*). Data timestamp diperoleh dari hasil rekaman Wireshark, kemudian diolah menggunakan rumus.

E. Pengujian SUS pada Aplikasi dan Website

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui kuesioner yang diisi oleh 30 responden. 25 diantaranya adalah mahasiswa dan masyarakat umum sedangkan 5 responden terakhir adalah pegawai BBWS. Skor rata-rata kegunaan dari aplikasi seluler dan website diperoleh dalam analisis tersebut. Nilai rata-rata dihitung dari total skor seluruh responden lalu dibagi dengan jumlah responden. Setelah menghitung skor kegunaan untuk mesing-masing responden, diperoleh skor rata-rata untuk website menurut masyarakat umum dan mahasiswa sebesar 86,6 dan menurut pegawai BBWS sebesar 77,5. Skor rata-rata untuk aplikasi seluler menurut masyarakat dan mahasiswa adalah 88,7 dan menurut pegawai BBWS adalah 77.

Skor SUS kemudian dianalisis dan diinterpretasikan menggunakan kategori penerimaan, skala nilai, dan penilaian adjektif dengan skala 10 poin. SUS juga menyediakan metode lain dalam menentukan hasil penilaian melalui rentang persentil skor SUS yang dapat dilihat pada Tabel 5.20.

Berdasarkan Tabel 5.19, website We-Weather menurut masyarakat umum dan mahasiswa dengan nilai 86,6, masuk dalam kategori "Acceptable" dan menurut pegawai BBWS sebesar 77,5, masuk dalam kategori "Acceptable". Skor rata-rata untuk aplikasi seluler menurut masyarakat dan mahasiswa adalah 88,7, masuk dalam kategori "Acceptable" dan menurut pegawai BBWS adalah 77, masuk dalam kategori "Acceptable".

Tabel 6. Skor SUS

Grade	Score
A	$x > 80,3$
B	$74 \leq x < 80,3$
C	$68 \leq x < 74$
D	$51 \leq x < 68$
E	$x < 51$

Hal ini menandakan bahwa penggunaan website dan aplikasi seluler We-Weather mendapatkan penilaian yang positif dari pengguna. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem dapat memenuhi harapan dan kebutuhan pengguna, serta memberikan pengalaman yang memuaskan bagi pengguna.

Tabel 7. Skor Grade Presentil SUS

Skor SUS	Kesimpulan
0-50,9	<i>Not Acceptable</i>
51-70,9	<i>Marginal</i>
71-100	<i>Acceptable</i>

Dari hasil pengujian ini, dapat disimpulkan bahwa website dan aplikasi seluler We-Weather memiliki tingkat kegunaan yang baik, informatif, dan relatif mudah digunakan. Namun, pengembangan lebih lanjut masih diperlukan, terutama dalam peningkatan fitur dan desain tampilan, agar skor kegunaan website dan aplikasi seluler dapat meningkat.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis yang telah dilakukan, penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem IoT berbasis mikrokontroler ESP32 untuk pemantauan dan prediksi cuaca di wilayah Cikapundung dan Cipalasari. Sistem ini mengintegrasikan sensor lingkungan untuk pengumpulan data real-time, seperti suhu, tekanan udara, dan curah hujan, yang kemudian dianalisis menggunakan algoritma XGBoost dengan pendekatan regresi dan klasifikasi. Hasil pengujian menunjukkan tingkat akurasi prediksi yang tinggi, serta kemampuan sistem dalam memberikan peringatan dini banjir melalui sensor tinggi muka air. Implementasi sistem pada aplikasi dan website *We-Weather* telah memenuhi tujuan utama dalam menyediakan informasi cuaca 24 jam dan 10 hari ke depan secara akurat dan mudah diakses. Pengujian usability menggunakan metode *System Usability Scale* (SUS) menunjukkan skor sangat baik dari berbagai kalangan pengguna, menandakan bahwa desain antarmuka dan navigasi aplikasi telah dirancang secara optimal untuk mendukung kenyamanan dan adopsi pengguna secara luas.

REFERENSI

- [1] D. D. Wiwaha, D. A. Gafyunedi, Z. M. Mahdi, I. W. Putro, B. A. Pramudita, and D. P. Setiawan, "Enhancing Rainfall Prediction Accuracy through XGBoost Model with Data Balancing Techniques," *2024 20th IEEE International Colloquium on Signal Processing and Its Applications, CSPA 2024 - Conference Proceedings*, pp. 120–125, 2024, doi: 10.1109/CSPA60979.2024.10525558.
- [2] I. A. Wandi and A. Ashari, "Monitoring Ketinggian Air dan Curah Hujan Dalam Early Warning System Bencana Banjir Berbasis IoT," *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, vol. 13, no. 1, Apr. 2023, doi: 10.22146/ijeis.83569.
- [3] D. B. M. Arya, F. Dewanta, and S. Astuti, "Analisis Perbandingan Algoritma Decision Tree, Random Forest, dan Naïve Bayes untuk Prediksi Banjir di Desa Dayeuhkolot," *TELKA*, vol. 9, no. 1, pp. 52–61, 2023.
- [4] M. Ridwan and J. Sarjito, "Studi Kajian Dampak Perubahan Tutupan Lahan terhadap Kejadian Banjir di Daerah Aliran Sungai," *ENVIRO: Journal of Tropical Environmental Research*, vol. 26, no. 1, p. 38, 2024, doi: 10.20961/enviro.v26i1.93145.
- [5] S. Nur, A. Sugiharto, S. Sumaryo, and E. Kurniawan, "IMPLEMENTASI Pendeteksi DINI BAHAYA BANJIR IMPLEMENTATION OF EARLY DETECTION OF FLOOD."
- [6] N. Dina Adharina and D. Lukmanur Hakim, "Faktor-Faktor Masyarakat Tetap Tinggal di Kawasan Rawan Bencana Banjir, Desa Dayeuhkolot, Kabupaten Bandung Factors for Community Remaining Living in Areas Prone to Flood Disasters, Dayeuhkolot Village, Bandung Regency," *Journal of Urban and Regional Spatial*, vol. 4, no. 3, pp. 199–205, 2024, [Online]. Available: <https://ejournalfakultasteknikunibos.id/index.php/jus>
- [7] D. Wahyuni, S. Syamsunasir, A. Subiyanto, and M. Azizah, "Pemanfaatan Sistem Informasi Bencana Banjir di Kabupaten Bandung Untuk Mewujudkan Masyarakat Tangguh Bencana," *PENDIPA Journal of Science Education*, vol. 6, no. 2, pp. 516–521, 2022, doi: 10.33369/pendipa.6.2.516-521.
- [8] Z. M. Mahdi, G. M. Aditya, I. W. Putro, B. A. Pramudita, and D. P. Setiawan, "Internet-of-Things-Based Rain Detection Device Using Machine Learning Classification for Rain Prediction at Telkom University," *2023 International Conference on Data Science and Its Applications, ICODSA 2023*, pp. 449–453, 2023, doi: 10.1109/ICODSA58501.2023.10277315.
- [9] A. T. Nurani, A. Setiawan, and B. Susanto, "Perbandingan Kinerja Regresi Decision Tree dan Regresi Linear Berganda untuk Prediksi BMI pada Dataset Asthma," *Jurnal Sains dan Edukasi Sains*, vol. 6, no. 1, pp. 34–43, 2023, doi: 10.24246/juses.v6i1p34-43.
- [10] R. D. Prasetya and I. R. Widiasari, "Perancangan IoT Monitoring Lingkungan Berbasis Wireless Sensor Network (WSN) Dengan Menerapkan Multi Sensor Network (MSN)," *JIPI (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika)*, vol. 10, no. 1, pp. 652–666, 2025, doi: 10.29100/jipi.v10i1.6040.
- [11] D. Wiwaha, D. Gafyunedi, Z. Mahdi, I. Putro, D. Setiawan, and B. Pramudita, "Sistem Prediksi Cuaca Berbasis Wireless Sensor Network dan Teknologi IoT dengan Machine Learning," *Telkom University*, vol. 1, no. 4, pp. 1–10, 2024.
- [12] A. Sumardiono, E. Alimudin, Z. Zaenurrohman, and H. Susanti, "Rancang Bangun Monitoring Early Warning System Bencana Banjir Berdasarkan Ketinggian Aliran Sungai Menggunakan Modem SIM900 dan Internet of Things," *Infotekmesin*, vol.

- [13] 13, no. 1, pp. 112–117, 2022, doi: 10.35970/infotekmesin.v13i1.1019.
- [14] Y. Abdan Syakur, E. Padang, B. Afkril, J. Gunung Salju, M. Barat, and P. Barat, “Rancang Bangun Alat Ukur Ketinggian Permukaan Air Sungai Menggunakan Sensor Ultrasonik Aj-Sr04M,” *Jurnal Natural*, vol. 19, no. 1, pp. 1412–1328, 2023.
- [15] M. Hardjianto, D. Ariyanto, and A. Aryasanti, “Penerapan Sensor Ultrasonik HC-SR04 dan Hujan untuk Memantau Ketinggian Air dan Pendekripsi Hujan,” *Jurnal Media Informatika Budidarma*, vol. 6, no. 1, p. 251, 2022, doi: 10.30865/mib.v6i1.3486.
- Badan Pusat Statistik Kota Bandung, “Parameter Cuaca rata-rata di Kota Bandung.” Accessed: Nov. 16, 2024. [Online]. Available: <https://bandungkota.bps.go.id/id>
- [16] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, “Prosedur Standar Operasi Pelaksanaan Peringatan Dini Pelaporan dan Diseminasi Informasi Cuaca Ekstrim,” pp. 1–16, 2010.
- [17] U. Niswatul Khasanah, “Aplikasi Sensor Ultrasonik Sebagai Alat Ukur Jarak Digital Berbasis Arduino Application of Ultrasonic Sensors As Arduino-Based Digital Distance Measuring Instruments,” *JSNu : Journal of Science Nusantara*, vol. 3, no. 4, pp. 135–140, 2023.
- [18] N. Jumisa and P. Jaya, “Sistem Monitoring dan Kontrol Tegangan PLTA Berbasis Internet Of Things (IoT),” *Voteteknika (Vocational Teknik Elektronika dan Informatika)*, vol. 11, no. 3, p. 335, 2023, doi: 10.24036/voteteknika.v11i3.124739.