

Stasiun Cuaca Cerdas dengan Fitur Klasifikasi Cuaca Menggunakan Metode Gaussian Naïve Bayes

Irvan Budiawan^{1*}, Yuda Bakti Zainal², Asep Najmurokhan³, Kusnandar⁴, Zul Fakhri⁵, Sidik Herlambang⁶, Rizal Algifari⁷

^{1,2,3,4,5,6,7}Teknik Elektro Universitas Jenderal Achmad Yani; Jl. Terusan Jenderal Sudirman, Cimahi Selatan, Kota Cimahi, Jawa Barat.

¹Pusat Teknologi Instrumentasi dan Otomasi ITB; Gd CRIMSE (Ex. PAU) Lantai 8, Kampus Ganesha ITB, Jl. Ganesha No. 10, Bandung, Jawa Barat

Received: 27-03-2026
Accepted: 05-05-2026

Keywords:
Stasiun cuaca;
Naïve Bayes;
Prediksi cuaca.

Correspondent Email:
budiawan.irvan@gmail.com

Abstrak. Cuaca memengaruhi kondisi lingkungan dan aktivitas manusia sehari-hari, di mana perubahan cuaca yang cepat dapat menimbulkan gangguan aktivitas bahkan berpotensi menyebabkan bencana. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan cuaca yang akurat dan real-time. Namun, harga perangkat stasiun cuaca komersial yang relatif mahal menyebabkan ketersediaan data lingkungan di banyak wilayah masih terbatas. Penelitian ini bertujuan mengembangkan stasiun cuaca berbasis mikrokontroler ESP32 dengan biaya terjangkau (*low-cost*) tanpa mengurangi keandalan pengukuran. Sistem yang dikembangkan dilengkapi dengan modul klasifikasi cuaca berbasis algoritma Gaussian Naïve Bayes (GNB) yang memanfaatkan tiga parameter utama, yaitu suhu udara, kelembaban relatif, dan curah hujan, untuk menentukan empat kelas cuaca: cerah, cerah berawan, hujan ringan, dan hujan lebat. Model GNB menghitung probabilitas setiap kelas berdasarkan distribusi normal data pelatihan sehingga menghasilkan prediksi yang cepat dengan kebutuhan komputasi yang rendah dan sesuai untuk diimplementasikan pada perangkat ESP32. Hasil pengujian sensor menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9599 untuk suhu dan 0,9994 untuk kelembaban pada sensor BME280, 0,9992 untuk sensor intensitas cahaya TSL2561, serta 1 untuk sensor curah hujan tipping bucket. Evaluasi performansi klasifikasi menggunakan 60% data uji menghasilkan nilai *accuracy* sebesar 0,869, *precision* sebesar 0,870, *recall* sebesar 0,870, dan *F1-score* sebesar 0,869 berdasarkan *confusion matrix*, yang menunjukkan bahwa model mampu mengklasifikasikan kondisi cuaca dengan baik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu memberikan solusi pemantauan cuaca yang ekonomis, akurat, dan dapat diandalkan untuk mendukung ketersediaan data cuaca pada wilayah yang belum terjangkau stasiun cuaca komersial.

Abstract. Weather significantly influences environmental conditions and daily human activities, where rapid weather changes can disrupt activities and potentially lead to disasters. Therefore, an accurate and real-time weather monitoring system is essential. However, the relatively high cost of commercial weather stations limits the availability of environmental data in many regions. This study aims to develop a low-cost weather station based on the ESP32 microcontroller without compromising measurement reliability. The proposed system is equipped with a weather classification module using the Gaussian Naïve Bayes (GNB) algorithm, which utilizes three main parameters: air temperature, relative humidity, and rainfall, to classify four

weather conditions: clear, partly cloudy, light rain, and heavy rain. The GNB model computes the probability of each class based on the normal distribution of training data, enabling fast prediction with low computational complexity, making it suitable for implementation on the ESP32 platform. Sensor evaluation results indicate high measurement accuracy, with coefficients of determination (R^2) of 0.9599 for temperature and 0.9994 for humidity using the BME280 sensor, 0.9992 for light intensity using the TSL2561 sensor, and 1 for rainfall measurement using a tipping bucket rain gauge. Classification performance evaluation using 60% testing data produced an accuracy of 0.869, precision of 0.870, recall of 0.870, and F1-score of 0.869 based on the confusion matrix, indicating that the proposed model can effectively classify weather conditions. The results demonstrate that the developed system provides an affordable, reliable, and accurate solution for real-time weather monitoring, particularly in areas where commercial weather stations are not readily available.

1. PENDAHULUAN

Harga perangkat stasiun cuaca komersial yang tinggi menyebabkan keterbatasan ketersediaan data lingkungan di banyak wilayah, terutama di daerah terpencil dan kurang terjangkau. Sebagian besar jaringan pengamatan resmi di Indonesia dikelola oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), namun distribusi stasiun pengamatan umumnya masih mencakup wilayah pada tingkat kecamatan [1], sehingga variasi iklim pada skala yang lebih spesifik belum teramati secara optimal. Keterbatasan ini menimbulkan kebutuhan akan sistem pemantauan cuaca lokal yang lebih fleksibel dan terjangkau.

Berbagai penelitian telah mengembangkan stasiun cuaca berbasis perangkat komersial berbiaya rendah dan menunjukkan bahwa sistem tersebut mampu menghasilkan data meteorologi yang cukup akurat untuk keperluan pemantauan [2], [3][4], [5], [6], [7]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada aspek akuisisi data dan validasi sensor, sementara pengembangan sistem prediksi yang terintegrasi langsung pada perangkat masih terbatas. Umumnya, pemrosesan data dilakukan pada server atau komputer eksternal, sehingga ketergantungan terhadap sistem luar tetap tinggi.

Di sisi lain, data stasiun cuaca memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi, seperti koreksi analisis kualitas air sungai akibat pengaruh curah hujan dan suhu udara [8], pendukung analisis keselamatan dalam pembangunan Reaktor Daya Non Komersial (RDNK) [9], serta perencanaan aktivitas

olahraga berbasis kondisi atmosfer seperti paralayang [10]. Kebutuhan tersebut menuntut sistem yang tidak hanya mampu melakukan pemantauan real-time, tetapi juga menyediakan hasil prediksi secara langsung dan mandiri di lapangan.

Beberapa metode prediksi telah digunakan dalam penelitian sebelumnya, seperti fuzzy logic [11] dan exponential smoothing [12]. Metode fuzzy logic memerlukan perancangan aturan berbasis pakar yang subjektif dan kurang adaptif terhadap perubahan data. Sementara itu, exponential smoothing memiliki keterbatasan dalam menangkap hubungan probabilistik antarvariabel dan kurang optimal untuk klasifikasi kondisi cuaca berbasis beberapa parameter sekaligus. Selain itu, metode-metode tersebut umumnya diimplementasikan pada sistem dengan sumber daya komputasi yang lebih besar.

Kontribusi dalam penelitian ini terletak pada belum banyaknya implementasi metode klasifikasi probabilistik yang dijalankan secara langsung pada perangkat embedded berdaya terbatas, seperti ESP32, untuk prediksi kondisi cuaca lokal. Tantangan ilmiahnya adalah bagaimana merancang model prediksi yang tetap memiliki dasar statistik yang kuat, namun dengan kompleksitas komputasi dan kebutuhan memori yang sesuai dengan keterbatasan mikrokontroler.

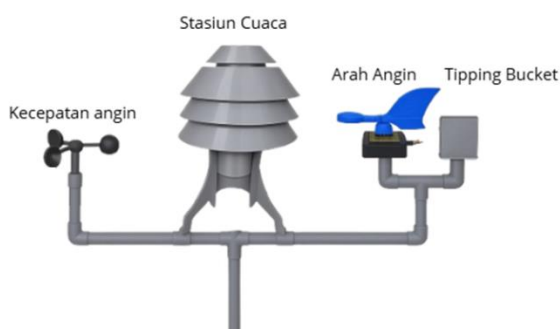
Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini mengusulkan penggunaan Gaussian Naïve Bayes yang diimplementasikan langsung pada mikrokontroler ESP32. Pemilihan metode ini didasarkan pada beberapa

pertimbangan ilmiah: (1) kemampuannya memodelkan data kontinu melalui asumsi distribusi Gaussian yang relevan dengan parameter meteorologi seperti suhu dan tekanan udara, (2) kompleksitas komputasi yang rendah karena hanya memerlukan perhitungan mean, varians, dan probabilitas posterior, serta (3) efisiensi memori yang sesuai untuk sistem embedded. Dengan pendekatan ini, sistem mampu melakukan proses klasifikasi kondisi cuaca secara mandiri (*edge computing*) tanpa ketergantungan pada server eksternal, sehingga meningkatkan kemandirian dan keandalan sistem pemantauan cuaca lokal [13].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Stasiun Cuaca

Stasiun cuaca merupakan sistem instrumentasi yang digunakan untuk mengukur parameter atmosfer seperti suhu, tekanan udara, kelembaban, kecepatan dan arah angin, serta curah hujan. Dalam perkembangannya, sistem ini berevolusi dari pencatatan manual menuju sistem otomatis berbasis mikrokontroler yang mampu melakukan akuisisi dan penyimpanan data secara mandiri. Gambar 1 memperlihatkan gambaran stasiun cuaca.



Gambar 1. Stasiun cuaca

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pengembangan stasiun cuaca berbiaya rendah mampu menghasilkan akurasi yang mendekati perangkat komersial, terutama untuk parameter suhu dan kelembaban. Namun, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada validasi sensor dan akurasi pengukuran, bukan pada integrasi sistem prediksi di dalam perangkat itu sendiri. Selain itu, pada banyak studi, proses analisis dan klasifikasi data masih dilakukan menggunakan komputer eksternal atau server

terpisah, sehingga sistem belum sepenuhnya mandiri.

Dengan demikian, terdapat kecenderungan bahwa pengembangan stasiun cuaca lebih menitikberatkan pada aspek akuisisi data dibandingkan pada pemrosesan cerdas di tingkat perangkat (*edge processing*). Penelitian ini memposisikan diri pada celah tersebut, yaitu dengan mengintegrasikan metode klasifikasi langsung pada sistem *embedded* sehingga perangkat tidak hanya berfungsi sebagai pencatat data, tetapi juga sebagai unit analisis.

2.2. Gaussian Naïve Bayes Classifier

Naïve Bayes merupakan metode klasifikasi berbasis probabilistik yang mengacu pada Teorema Bayes dengan asumsi independensi antar fitur [14]. Dalam kasus data kontinu, digunakan pendekatan *Gaussian Naïve Bayes* (GNB), yang mengasumsikan bahwa setiap fitur mengikuti distribusi normal.

Berbagai penelitian sebelumnya menggunakan metode klasifikasi seperti *decision tree*, *k-nearest neighbor* (KNN), dan *fuzzy logic* untuk prediksi cuaca lokal. Namun, sebagian besar metode tersebut belum mempertimbangkan keterbatasan sumber daya komputasi pada sistem embedded. Pada perangkat seperti ESP32 yang memiliki keterbatasan memori SRAM dan frekuensi prosesor terbatas, kompleksitas algoritma menjadi faktor krusial dalam pemilihan metode. Secara matematis, probabilitas bersyarat pada Gaussian Naïve Bayes dihitung menggunakan fungsi distribusi normal:

$$P = (X_i = x_i | Y = y_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_k^2}} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (1)$$

Di mana:

μ_k adalah rata-rata fitur pada kelas y_k

σ_k^2 adalah varians fitur pada kelas y_k

2.2.1 Analisis Kompleksitas Komputasi

Misalkan:

n = jumlah sampel data latih

d = jumlah fitur

k = jumlah kelas

1. Fase Training

Pada Gaussian Naive Bayes, proses training hanya menghitung:

- Mean setiap fitur untuk tiap kelas
- Varians setiap fitur untuk tiap kelas
- Probabilitas prior setiap kelas

Kompleksitas waktunya adalah:

$$O(n \cdot d)$$

Karena setiap data latih diproses sekali untuk menghitung parameter statistik. Tidak ada proses iteratif seperti pada neural network atau optimasi numerik [15].

Kompleksitas memori:

$$O(k \cdot d)$$

Karena hanya menyimpan (μ_k, d) , (σ_k^2, d) dan prior kelas. Artinya, model tidak menyimpan seluruh dataset, berbeda dengan KNN yang memiliki kompleksitas memori $O(n \cdot d)$ yang kurang efisien untuk perangkat dengan memori terbatas.

2. Fase Klasifikasi

Untuk setiap data uji, dilakukan perhitungan probabilitas untuk seluruh kelas dan fitur $O(k \cdot d)$ Kompleksitas ini bersifat linear terhadap jumlah fitur dan kelas, sehingga sangat ringan untuk implementasi pada mikrokontroler seperti ESP32 [16]. Sebagai perbandingan:

Tabel 1. Perbandingan Kompleksitas Komputasi Algoritma Machine Learning

Metode	Kompleksitas Training	Kompleksitas Inference	Kompleksitas Memori
KNN	$O(1)$	$O(n \cdot d)$	$O(n \cdot d)$
Decision Tree	$O(n \cdot d \cdot \log n)$	$O(depth)$	Bergantung struktur
Fuzzy Rule-Based	Bergantung jumlah rule	$O(jumlah\ rule)$	$O(rule)$
Gaussian Naive Bayes	$O(n \cdot d)$	$O(k \cdot d)$	$O(k \cdot d)$

Dari Tabel 1 terlihat bahwa *Gaussian Naive Bayes* memiliki kompleksitas paling stabil dan skalabel untuk perangkat dengan sumber daya terbatas.

2.3. Confusion Matrix

Confusion matrix adalah pengukuran performa untuk masalah klasifikasi machine learning dimana keluaran dapat berupa dua kelas atau lebih. Confusion Matrix adalah tabel dengan 4 kombinasi berbeda dari nilai prediksi dan nilai aktual. Ada empat istilah yang merupakan representasi hasil proses klasifikasi pada confusion matrix yaitu True Positif (TP) (Anda memprediksi positif dan itu benar), True Negatif (TN) (Anda memprediksi negatif dan itu benar), False Positif (FP) (Anda memprediksi positif dan itu salah), dan False Negatif (FN) (Anda memprediksi negatif dan itu salah).

Matrik performansi yang dapat dihitung dari matriks konfusi adalah:

$$Akurasi = \frac{TP + TN}{Jumlah\ Sampel}$$

$$Presisi = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

$$F1 - Score = \frac{Presisi \times Recall}{Presisi + Recall}$$

$$Spesifik = \frac{TN}{TN + FP}$$

$$False\ Positive\ Rate\ (FPR) = \frac{FP}{FP + TN}$$

$$False\ Negative\ Rate\ (FNR) = \frac{FN}{FN + TP}$$

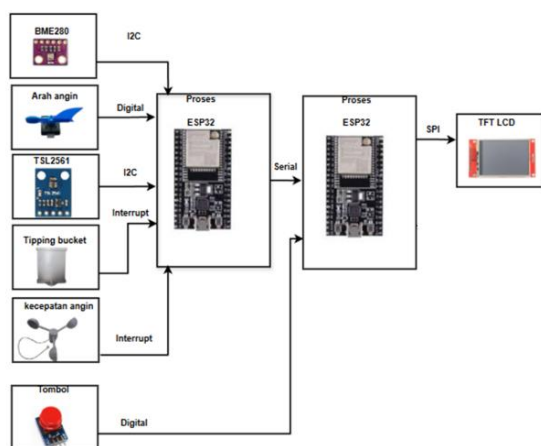
Penggunaan berbagai metrik memberikan evaluasi yang lebih objektif terhadap performa Gaussian Naive Bayes yang diimplementasikan pada sistem embedded, serta membandingkannya secara proporsional terhadap kemungkinan kesalahan klasifikasi.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Perancangan Stasiun Cuaca

Gambar 2 merupakan diagram stasiun cuaca dan Gambar 3 merupakan realisasi prototipe stasiun cuaca yang dibuat. Stasiun cuaca yang dibangun terdiri dari mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai unit pemrosesan utama yang menerima data dari berbagai sensor cuaca. Sensor yang digunakan dalam sistem ini

meliputi BME280 untuk mengukur suhu, kelembaban, dan tekanan udara; Tipping bucket untuk mendeteksi curah hujan; Anemometer untuk mengukur kecepatan angin; Wind Vane Direction untuk menentukan arah angin; serta TSL2561 untuk mengukur intensitas cahaya. Data dari sensor dikirimkan sebagai input ke ESP32 untuk diproses lebih lanjut. Setelah data diolah, ESP32 mengirimkan hasil pengukuran menggunakan komunikasi Serial (RX-TX) antar dua ESP32, di mana ESP32 Slave menampilkan data secara real-time ke TFT LCD. Selain itu, sistem dilengkapi tombol pada ESP32 Slave untuk mengubah tampilan parameter sensor di TFT LCD. Setiap kali tombol ditekan, informasi yang ditampilkan akan berganti, seperti suhu, kelembaban, tekanan, angin, cahaya, dan curah hujan.



Gambar 2. Diagram stasiun cuaca

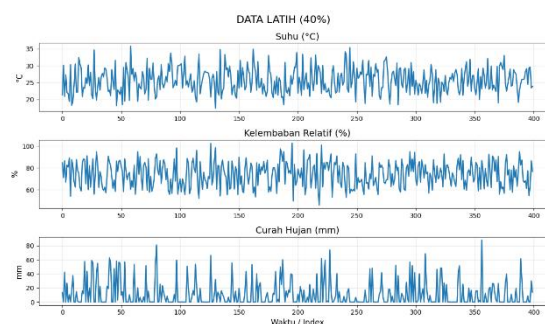
Berbeda dengan pendekatan sistem monitoring konvensional yang hanya mengirimkan data mentah ke server eksternal, sistem ini melakukan pemrosesan klasifikasi langsung pada perangkat (*edge computing*). Hal ini memungkinkan pengambilan keputusan secara *real-time* tanpa ketergantungan jaringan. Untuk memastikan validitas pengukuran, setiap sensor dikalibrasi awal dan diuji kestabilannya melalui pengambilan data berulang. Data yang diperoleh disimpan sementara dalam memori dan diproses menggunakan model Gaussian Naïve Bayes yang ditanamkan langsung pada ESP32.



Gambar 3. Prototipe stasiun cuaca

3.2. Klasifikasi Cuaca dengan Naïve Baiyes

Data latih dalam penelitian ini diperoleh dengan mengacu pada penelitian sebelumnya [17]. Digunakan 1000 data cuaca untuk data latih dan pengujian, masing digunakan 40% dan 60%. Data latih diperlihatkan pada Gambar 4. Data yang digunakan mencakup suhu, kelembaban dan curah hujan dengan label kondisi cuaca cerah, cerah berawan, hujan ringan, hujan lebat.



Gambar 4. Data latih

Pemilihan fitur dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan meteorologis dan karakteristik statistik data, sehingga tidak dilakukan secara arbitrer dan tetap memiliki relevansi ilmiah terhadap fenomena cuaca yang dimodelkan. Suhu udara dipilih karena merupakan parameter fundamental dalam dinamika atmosfer yang berpengaruh terhadap pembentukan awan dan sistem presipitasi. Variasi suhu dalam rentang waktu pendek

umumnya menunjukkan pola distribusi kontinu yang mendekati normal, sehingga sesuai dengan asumsi Gaussian pada model Naïve Bayes. Kelembaban relatif juga dipertimbangkan sebagai fitur utama karena berperan langsung dalam proses kondensasi uap air; peningkatan kelembaban meningkatkan probabilitas terbentuknya awan dan hujan. Sementara itu, curah hujan digunakan sebagai indikator langsung kondisi presipitasi, dengan klasifikasi intensitas mengacu pada standar operasional Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika [18], sehingga memiliki dasar ilmiah dan regulatif yang jelas.

Secara konseptual, ketiga fitur tersebut memenuhi dua kriteria utama, yaitu relevansi fisik terhadap proses atmosfer dan kesesuaian dengan asumsi distribusi statistik model Gaussian Naïve Bayes. Suhu dan kelembaban merupakan variabel kontinu yang dapat dimodelkan menggunakan distribusi normal, sedangkan curah hujan memberikan daya diskriminatif yang kuat antar kelas cuaca. Fitur lain seperti tekanan udara, arah angin, dan intensitas cahaya tidak dimasukkan dalam model utama karena pertimbangan metodologis: tekanan udara cenderung berubah secara gradual sehingga kurang diskriminatif untuk klasifikasi jangka pendek, arah angin bersifat kategorikal dan memerlukan proses pengkodean tambahan yang meningkatkan kompleksitas, serta intensitas cahaya sangat dipengaruhi oleh siklus harian (diurnal cycle) yang berpotensi menimbulkan bias tanpa normalisasi waktu. Dengan demikian, pemilihan fitur dilakukan secara selektif untuk menjaga keseimbangan antara validitas meteorologis dan efisiensi komputasi pada sistem embedded.

Tabel 2. Tabel Parameter Statistik Fitur Cuaca Gaussian Naive Bayes

kelas	mean suhu	std suhu	mean RH	std RH	mean hujan	std hujan
cerah	29.47	2.27	60.4	5.62	0.02	0.063
cerah berawan	26.99	2.31	69.5	5.34	0.03	0.094
hujan ringan	22.49	2.11	82.3	4.57	10.56	5.97
hujan lebat	21.95	2.24	85.5	6.72	37.69	20.53

Hasil dari proses data latih menghasilkan parameter yang ditampilkan pada Tabel 2, yang memuat nilai mean dan standar deviasi untuk setiap variabel cuaca pada masing-masing kelas. Parameter ini menggambarkan karakteristik umum dari distribusi data suhu, kelembaban relatif (RH), dan curah hujan yang digunakan dalam metode Gaussian Naive Bayes. Nilai mean menunjukkan kecenderungan rata-rata kondisi cuaca pada tiap kelas, sedangkan standar deviasi menunjukkan seberapa besar variasi data di sekitar nilai rata-rata tersebut. Dari tabel terlihat bahwa kondisi cerah cenderung memiliki suhu lebih tinggi dan curah hujan yang sangat kecil, sementara kondisi hujan lebat memiliki suhu lebih rendah, kelembaban yang tinggi, serta curah hujan yang jauh lebih besar. Perbedaan pola ini menunjukkan bahwa setiap kelas cuaca memiliki ciri statistik yang cukup berbeda, sehingga parameter tersebut dapat digunakan sebagai dasar model untuk mengenali dan mengklasifikasikan kondisi cuaca secara lebih akurat.

3.3. Implementasi Sistem

Untuk mengintegrasikan perangkat yang telah dibangun diperlukan program untuk dapat mengimplementasikan secara keseluruhan. Langkah setiap kerja program ditunjukkan pada Tabel 3 berupa pseudocode. Sistem dirancang untuk memantau kondisi cuaca secara real-time dengan menggunakan berbagai sensor dan perangkat untuk mengumpulkan data lingkungan. Pertama, sensor-sensor seperti BME280 untuk mengukur suhu, kelembaban, dan tekanan, serta sensor arah angin, TSL2561 untuk intensitas cahaya, dan sensor tipping bucket untuk curah hujan diinisialisasi. Selain itu, sensor kecepatan angin juga diatur dengan menggunakan interrupt untuk memproses data secara langsung. TFT LCD yang terhubung melalui antarmuka SPI digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran secara visual.

Untuk meningkatkan akurasi sistem, model klasifikasi cuaca berbasis Naive Bayes diterapkan dengan menggunakan fitur-fitur seperti suhu, kelembaban, dan curah hujan sebagai input untuk memprediksi kondisi cuaca seperti "Cerah", "Cerah Berawan", "Hujan Ringan", atau "Hujan Lebat". Setiap perubahan data lingkungan yang terdeteksi oleh sensor, seperti saat tipping bucket menerima curah

hujan atau sensor kecepatan angin terpicu oleh interrupt, langsung diproses dan diperbarui dalam sistem. Proses utama dari sistem ini berlangsung dalam loop yang terus-menerus membaca data dari sensor, melakukan klasifikasi cuaca dengan model Naive Bayes, dan menampilkan hasilnya di layar TFT, mencakup suhu, kelembapan, tekanan, arah angin, intensitas cahaya, curah hujan, kecepatan angin, serta prediksi cuaca yang dihasilkan. Dengan demikian, sistem ini memberikan informasi cuaca yang komprehensif dan real-time untuk keperluan pemantauan lingkungan.

Tabel 3. *Pseudocode* program sistem keseluruhan

```

Mulai

    Inisialisasi semua sensor dan perangkat:
        - Inisialisasi BME280 dengan antarmuka I2C (mengukur suhu, kelembapan, tekanan)
        - Inisialisasi sensor arah angin sebagai input digital
        - Inisialisasi TSL2561 dengan antarmuka I2C (untuk mengukur intensitas cahaya)
        - Inisialisasi tipping bucket sebagai input digital (menggunakan interrupt)
        - Inisialisasi sensor kecepatan angin sebagai input digital (menggunakan interrupt)
        - Inisialisasi TFT LCD dengan antarmuka SPI untuk menampilkan hasil

    Atur fungsi interrupt:
        - Saat terjadi interrupt pada tipping bucket, tambahkan jumlah curah hujan
        - Saat terjadi interrupt pada sensor kecepatan angin, hitung kecepatan angin

    Inisialisasi model Naive Bayes:
        - Tentukan dataset pelatihan untuk klasifikasi cuaca (menggunakan fitur suhu, kelembapan, dan curah hujan)
        - Latih model Naive Bayes dengan data historis untuk label cuaca:
            - "Cerah"
            - "Cerah Berawan"
            - "Hujan Ringan"
            - "Hujan Lebat"

    Loop Utama:
        - Baca data lingkungan dari BME280 (suhu, kelembapan, tekanan)
    
```

```

        - Baca arah angin dari sensor
        - Baca intensitas cahaya dari TSL2561
        - Baca data curah hujan (dari tipping bucket)
        - Baca kecepatan angin (dari interrupt)

        - Lakukan klasifikasi cuaca menggunakan Naive Bayes:
            - Fitur input: suhu, kelembapan, curah hujan
            - Hasil output: prediksi cuaca (Cerah, Cerah Berawan, Hujan Ringan, Hujan Lebat)

        - Update layar TFT dengan data berikut:
            - Suhu
            - Kelembapan
            - Tekanan
            - Arah angin
            - Intensitas cahaya
            - Curah hujan (dari tipping bucket)
            - Kecepatan angin (dari interrupt)
            - Hasil klasifikasi cuaca (Cerah, Cerah Berawan, Hujan Ringan, Hujan Lebat)

Selesai
    
```

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

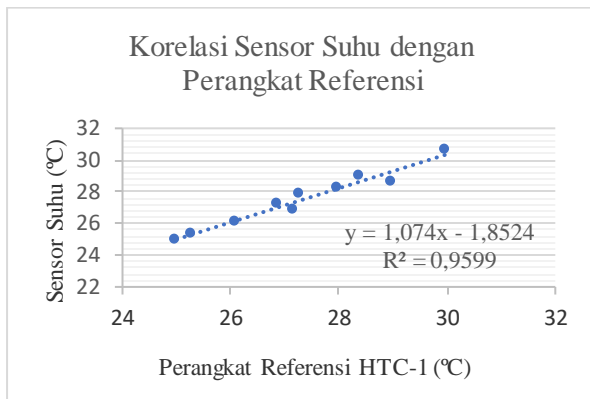
4.1. Pengujian Sensor Stasiun Cuaca Sensor Suhu

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai suhu yang terbaca oleh sensor BME280 mendekati nilai yang ditampilkan oleh alat referensi HTC-1 seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5. Hal ini menunjukkan bahwa sensor BME280 memiliki kinerja yang baik dalam mengukur suhu dengan akurasi yang memadai. Analisis regresi menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9599, yang menunjukkan bahwa 95,99% variasi data suhu dari alat referensi memiliki kesesuaian dengan hasil pembacaan sensor BME280. Angka ini menggambarkan tingkat korelasi yang sangat baik antara kedua alat ukur, sehingga menunjukkan bahwa sensor BME280 dapat diandalkan dalam sistem pemantauan suhu.

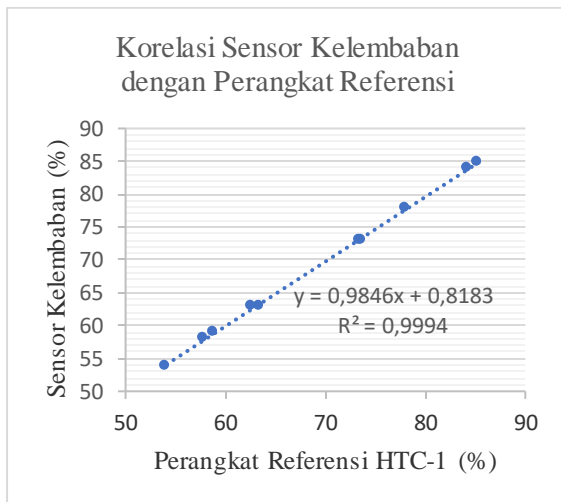
Sensor Kelembaban

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kelembaban yang terbaca oleh sensor BME280 mendekati nilai yang ditampilkan oleh alat referensi HTC-1 seperti yang

diperlihatkan pada Gambar 6. Hal ini menunjukkan bahwa sensor BME280 memiliki kinerja yang baik dalam mengukur kelembaban dengan akurasi yang memadai. Analisis regresi menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9994, yang menunjukkan bahwa 99,94% variasi data kelembaban dari alat referensi memiliki kesesuaian dengan hasil pembacaan sensor BME280. Angka ini menggambarkan tingkat korelasi yang sangat baik antara kedua alat ukur, sehingga menunjukkan bahwa sensor BME280 dapat diandalkan dalam sistem pemantauan kelembaban.



Gambar 5. Korelasi sensor suhu



Gambar 6. Korelasi sensor kelembaban

Tekanan Udara

Pengujian nilai tekanan udara dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor BME280 terhadap hasil perhitungan menggunakan rumus barometrik standar berdasarkan International Standard Atmosphere (ISA). Dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = P_b \cdot \left(\frac{T_b}{T_b + L_b \cdot (h - h_b)} \right)^{\frac{g \cdot M}{R \cdot L_b}}$$

Dimana:

- P_b = 101325 Pa (Tekanan udara di permukaan laut)
- L_b = -0,0065 k/m (Tingkat penurunan suhu terhadap ketinggian)
- T_b = 288,15 K (suhu dipermukaan laut)
- H_b = 0 (ketinggian dasar lapisan)
- h = 742 m dan 800 m (Ketinggian lokasi dari permukaan laut)
- g = 9,80665 m/s²
- M = 0,0289644 kg/mol
- R = 8,31432 J / $\frac{mol}{k}$

Pada pengukuran, sensor BME280 terbaca tekanan udara sebesar 931,0 hPa, sementara hasil perhitungan teoritis menunjukkan nilai sebesar 928,80 hPa. Selisih antara keduanya sebesar 2,2 hPa menunjukkan bahwa hasil pembacaan sensor BME280 sangat dekat dengan nilai yang dihitung berdasarkan kondisi standar atmosfer, yang menunjukkan akurasi yang baik pada pengukuran tekanan udara oleh sensor tersebut.

Kecepatan Angin

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sensor Anemometer dapat membaca dan menghitung kecepatan angin berdasarkan jumlah rotasi baling-baling per satuan waktu. Dalam sistem ini, sensor menghasilkan pulsa untuk setiap dua rotasi, sehingga nilai rotasi per detik dihitung dari jumlah pulsa yang diterima dalam interval waktu tertentu. Nilai rotasi per detik dimasukkan ke dalam persamaan, yaitu:

$$v = -0,0181 \cdot R^2 + 1,3859 \cdot R + 1,4055$$

R = Rotasi perdetik

v = kecepatan angin m/s

Arah Angin

Bentuk sensor arah angin diperlihatkan pada Gambar 7. Sensor arah angin terbentuk dari 8 magnet yang tersusun lingkaran dan setiap magnet menunjukkan sudut untuk menentukan arah mata angin. Tabel 4 merupakan susunan arah mata angin dari formasi magnet yang disusun.



Gambar 7. Sensor arah angin

Tabel 4. Nilai derajat arah angin

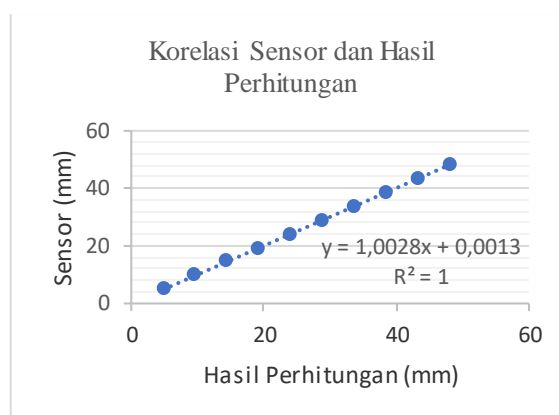
No	Arah Angin	Sudut (°)	Keterangan
1	Utara	360	Sensor mendeteksi angin dari arah utara
2	Timur Laut	45	Sensor mendeteksi angin dari arah Timur Laut
3	Timur	90	Sensor mendeteksi angin dari arah Timur
4	Tenggara	135	Sensor mendeteksi angin dari arah Tenggara
5	Selatan	180	Sensor mendeteksi angin dari arah selatan
6	Barat Daya	225	Sensor mendeteksi angin dari arah Barat Daya
7	Barat	270	Sensor mendeteksi angin dari arah Barat
8	Barat Laut	315	Sensor mendeteksi angin dari arah Barat Laut

Sensor arah angin menunjukkan kemampuan kerja yang baik dalam mengenali arah datangnya angin sesuai dengan konfigurasi sudut yang telah ditetapkan. Setiap arah angin yang terdeteksi memberikan respons yang sesuai, ditandai dengan keluaran informasi bahwa angin berasal dari arah tertentu seperti utara, timur laut, timur, hingga barat laut.

Curah Hujan

Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat pengukuran curah hujan tipe tipping bucket yang memiliki luas penampang corong sebesar 8 cm × 6,5 cm, sehingga total luas penampang adalah 52 cm². Selanjutnya dilakukan pengujian dengan menuangkan air ke dalam corong secara bertahap, dengan volume berturut-turut sebesar 25 ml, 50 ml, 75 ml, 100 ml, 125 ml, 150 ml, 175 ml, 200ml, 225 ml, dan 250 ml. Setiap volume tersebut dikonversikan ke dalam satuan curah hujan (mm) menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{Curah hujan (mm)} = \left(\frac{\text{volume air (ml)}}{\text{Luas penampang}} \right) \times 10$$

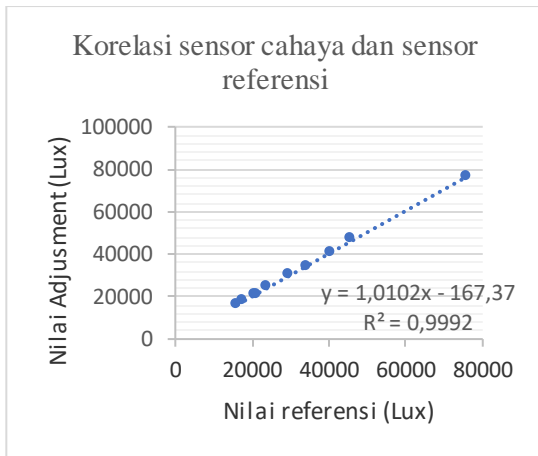


Gambar 8. Korelasi sensor curah hujan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai curah hujan yang dihasilkan oleh sensor tipping bucket sangat mendekati nilai perhitungan teoritis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8, dengan selisih antara hasil pembacaan sensor dan nilai perhitungan berada dalam kisaran 0,018 mm hingga 0,137 mm, yang menunjukkan deviasi yang relatif kecil. Hal ini memperlihatkan bahwa sensor memiliki respons linier dan proporsional terhadap volume air yang masuk, di mana setiap penambahan volume air menghasilkan peningkatan nilai curah hujan yang konsisten, baik pada hasil pengukuran sensor maupun perhitungan matematis. Selain itu, analisis regresi menghasilkan nilai koefisien determinasi (R²) sebesar 1, yang menunjukkan kesesuaian sempurna antara seluruh variasi data curah hujan dari perhitungan teoritis dan hasil pembacaan sensor tipping bucket.

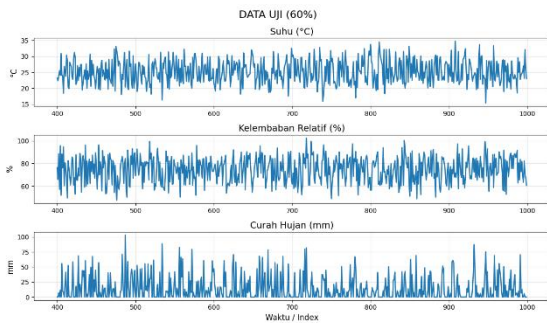
Intensitas Cahaya

Pengujian sensor TSL2561 dilakukan dengan cara membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap nilai intensitas cahaya yang diperoleh dari alat referensi UNI-T UT383 Lux Meter. Gambar 9 memperlihatkan analisis regresi yang menghasilkan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9992. Angka ini menunjukkan bahwa 99,92% variasi data intensitas cahaya dari alat referensi memiliki kesesuaian dengan hasil pembacaan sensor.



Gambar 9. Korelasi sensor cahaya

4.2. Performansi Naïve Baiyes

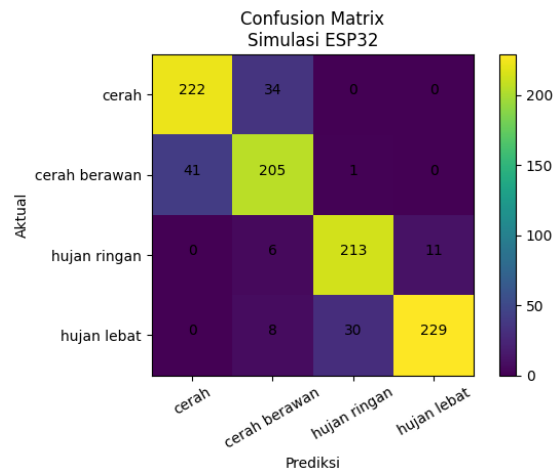


Gambar 10. Data Uji

Pengujian prediksi dilakukan menggunakan 60% data uji yang tidak digunakan pada proses pelatihan model diperlihatkan pada Gambar 10. Data uji tersebut merepresentasikan kondisi baru yang digunakan untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi algoritma dalam mengklasifikasikan kondisi cuaca. Proses pengujian dilakukan pada perangkat ESP32 yang telah ditanamkan algoritma Gaussian Naive Bayes menggunakan parameter mean dan standar deviasi yang diperoleh dari data

latih. Implementasi pada ESP32 bertujuan untuk mensimulasikan kondisi sistem nyata (real-time), sehingga model tidak hanya diuji secara komputasi, tetapi juga pada perangkat dengan keterbatasan sumber daya.

Hasil performansi model ditunjukkan melalui confusion matrix pada Gambar 10. Confusion matrix memperlihatkan perbandingan antara label aktual dan label hasil prediksi untuk setiap kelas cuaca, yaitu cerah, cerah berawan, hujan ringan, dan hujan lebat. Nilai pada diagonal utama menunjukkan jumlah prediksi yang benar, sedangkan nilai di luar diagonal menunjukkan kesalahan klasifikasi. Berdasarkan Gambar 11, sebagian besar data berada pada diagonal utama, yang menunjukkan bahwa model mampu mengenali pola cuaca dengan cukup baik. Kesalahan prediksi yang terjadi umumnya berada pada kelas yang memiliki karakteristik mirip, misalnya antara cerah dan cerah berawan, serta antara hujan ringan dan hujan lebat, yang secara statistik memiliki rentang nilai fitur yang saling berdekatan.



Gambar 11. Confusion matrix klasifikasi cuaca

Tabel 5. Nilai derajat arah angin

Accuracy	Precision	Recall	F1
0.869	0.870	0.870	0.869

Tabel 5 menunjukkan performa secara kuantitatif, performansi model menghasilkan nilai accuracy sebesar 0,869, precision sebesar 0,870, recall sebesar 0,870, dan F1-score sebesar 0,869. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa model memiliki tingkat ketepatan dan konsistensi yang baik dalam

mengklasifikasikan kondisi cuaca berdasarkan parameter suhu, kelembaban relatif, dan curah hujan. Precision dan recall yang seimbang menunjukkan bahwa model tidak hanya mampu memberikan prediksi yang tepat, tetapi juga mampu mengenali sebagian besar data pada setiap kelas dengan baik. Dengan demikian, implementasi Gaussian Naive Bayes pada ESP32 dapat dikatakan cukup efektif untuk digunakan dalam sistem klasifikasi cuaca berbasis sensor secara real-time.

5. KESIMPULAN

- a. Sensor BME280 menunjukkan akurasi tinggi dengan nilai R^2 suhu 0,9599 (identik dengan HTC-1), kelembaban 0,9994, dan tekanan udara 931,0 hPa yang mendekati nilai teoritis 928,80 hPa. Sensor TSL2561 mencatat R^2 0,9992, sedangkan sensor tipping bucket mencapai R^2 1 pada pengujian volume air 25–250 ml. Sensor arah angin berfungsi sesuai konfigurasi, dan sensor kecepatan angin konsisten pada 1 rotasi per detik ($\pm 2,8$ m/s atau $\pm 5,4$ knot). Kesimpulannya, sensor-sensor yang digunakan dalam penelitian ini menunjukkan performa yang sangat baik dan dapat diandalkan untuk aplikasi pemantauan cuaca.
- b. Berdasarkan hasil pengujian menggunakan 60% data uji, algoritma Gaussian Naive Bayes yang diimplementasikan pada ESP32 mampu mengklasifikasikan kondisi cuaca dengan baik dengan nilai accuracy 0,869, precision 0,870, recall 0,870, dan F1-score 0,869, sehingga menunjukkan bahwa model memiliki kinerja yang cukup akurat, konsisten, serta sesuai untuk diterapkan pada sistem klasifikasi cuaca real-time berbasis perangkat embedded.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Universitas Jenderal Achmad Yani sebagai pemberi dana melalui program pendanaan Hibah Penelitian Internal Kompetitif Unjani. Ucapan terima kasih juga ditujukan pada Kelompok Bidang Keahlian Teknik Kendali dan Instrumentasi Prodi Teknik Elektro Universitas Jendral Achmad Yani dan Pusat

Teknologi Instrumentasi dan Otomasi ITB yang telah memberikan dukungan berupa sarana, dan prasarana terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Kania, W. Gunawan, T. I. Solihati, N. Hidayanti, and A. Miftach, "Sistem Monitoring Deteksi Cuaca Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jurnal Sistem Informatika dan Informatika (Simika)*, vol. 7, no. 2, 2024, [Online]. Available: <https://www.unbaja.ac.id>
- [2] Muhammad Ali Ridla and Ahmad Fawaid, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Pengukur Cuaca Menggunakan Arduino Pada Stasiun Meteorologi Kelas III Banyuwangi," *Journal Of Computer Science And Technology (JOCSTEC)*, vol. 2, no. 2, pp. 73–80, Jun. 2024, doi: 10.59435/jocstec.v2i2.282.
- [3] M. R. Hilyawan, M. Noer Chandra Gumelar, and Howeri, "Implementasi Stasiun Cuaca di Area Universitas Pamulang PsdkU Serang Berbasis Internet of Things (IoT)," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 14, no. 2, 2024.
- [4] Suparli, "Sistem Monitoring Berbasis Web Untuk Stasiun Cuaca Dengan Metode Extreme Programming (Studi Kasus: PT. Meteo Nusantara Instrumen)," *OKTAL : Jurnal Ilmu Komputer dan Science*, vol. 2, no. 4, 2023, [Online]. Available: <https://journal.mediapublikasi.id/index.php/oktal>
- [5] S. Bahri and A. R. Arif, "Monitoring Cuaca Berbasis Raspberry dengan Menggunakan Modul Lora," *RESISTOR (Elektronika Kendali Telekomunikasi Tenaga Listrik Komputer)*, vol. 4, no. 1, 2021.
- [6] B. Prayogo, G. Forda Nama, and M. A. Muhammad, "Rancang Bangun Prototipe Sistem Monitoring Mini Stasiun Cuaca pada BMKG Provinsi Lampung," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 9, no. 1, 2021.
- [7] J. Arifin, D. Kurnianto, and E. Salam, "Rancang Bangun Deteksi Air Hujan dengan Report Via SMS Berbasis Arduino Uno," *ELECTRICIAN – Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 13, no. 1, 2019.
- [8] A. T. Prakasa, Liyantono, and S. Widodo, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Kualitas Air dan Stasiun Cuaca Berbasis Sensor Industrial dengan Protokol Modbus RS485," *Jurnal Keteknikaan Pertanian*, vol. 13, no. 1, pp. 98–114, Feb. 2025, doi: 10.19028/jtep.013.1.98-114.

- [9] A. Yuniarto and D. Septiadi, "Komparasi Data Pemantauan Cuaca antara Stasiun Meteorologi Di Tapak RDNK dan KNS untuk Proses Perizinan," *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, vol. 21, no. 2, pp. 115–124, 2019.
- [10] F. A. Zulafah, D. Dewatama, and Siswoko, "Rancang Bangun Stasiun Cuaca Berbasis Wireless Sensor Network dengan LoRa SX1278," *TESLA*, vol. 24, no. 2, 2022.
- [11] S. Ispramono Hadi *et al.*, "Penerapan Fuzzy C-Means dan Fuzzy Sugeno dalam Memprediksi Cuaca," *Jurnal Informatika*, vol. 18, no. 1, 2022, [Online]. Available: <https://dataonline.bmkg.go.id/>
- [12] A. Sani and Firdaus, "Stasiun Pemantau Cuaca Berbasis IoT (Internet of Things) dengan Metode Exponential Smoothing," *Journal of Applied Electrical Engineering*, vol. 5, no. 2, 2021.
- [13] E. Batzolis, E. Vrochidou, and G. A. Papakostas, "Machine Learning in Embedded Systems: Limitations, Solutions and Future Challenges," in *2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, CCWC 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 345–350. doi: 10.1109/CCWC57344.2023.10099348.
- [14] D. Irawan Saputra and D. Lukman Hakim, "Implementasi Algoritma Gaussian Naive Bayes Classifier Untuk Prediksi Potensi Tsunami Berbasis Mikrokontroler," *Journal of Electrical Engineering and Information Technology*, vol. 20, no. 2, 2022.
- [15] V. Sze, Y.-H. Chen, T.-J. Yang, and J. Emer, "Efficient Processing of Deep Neural Networks: A Tutorial and Survey," in *Proceedings of the IEEE*, Aug. 2017. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1703.09039>
- [16] J. A. Firdaus, A. Setia Budi, and E. Setiawan, "Analisis Performa Algoritma Machine Learning pada Perangkat Embedded Atmega328p," *Jurnal Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (JTIK)*, vol. 10, no. 2, pp. 245–254, 2023, doi: 10.25126/jtiik.2023106196.
- [17] D. Udjulawa, "Implementasi Algoritma K-Nearest Neighbor untuk Klasifikasi Cuaca," *Jurnal Algoritme*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2023, doi: 10.35957/algoritme.xxxx.
- [18] V. P. Bangun and K. Lumban Toruan, "Rancang Bangun Penakar Hujan Dengan Peringatan Dini Hujan Lebat Menggunakan Tipping Bucket dan Mikrokontroler ESP32," *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, pp. 1–10, Apr. 2024, doi: 10.23917/emitor.v24i1.2612.