

Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT dengan Pendekatan Klasifikasi Algoritma Random Forest

Sukardi^{1✉}, Wisard Kalengkongan^{2✉}, Eric Alfonsius^{2*}✉

¹Program Studi Sistem Informasi, STMIK Adhi Guna, Indonesia

²Program Studi Sistem Informasi, Universitas Sam Ratulangi, Indonesia

Abstrak: Peningkatan aktivitas industri, transportasi, dan urbanisasi di berbagai wilayah menyebabkan penurunan kualitas udara yang signifikan dan berdampak langsung pada kesehatan manusia serta perubahan iklim. Permasalahan utama dalam penelitian ini adalah belum tersedianya sistem pemantauan kualitas udara yang mampu memberikan informasi secara real-time dan analisis klasifikasi berbasis data cerdas. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan model klasifikasi berbasis algoritma Random Forest. Sistem dibangun menggunakan sensor untuk mengukur parameter utama yaitu partikel debu (PM2.5), suhu, dan kelembaban, serta menghasilkan status kualitas udara dalam kategori aman, awas, dan bahaya. Data yang dikumpulkan selama periode satu bulan dianalisis menggunakan metode Random Forest untuk memklasifikasi tren perubahan kondisi udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem IoT yang dikembangkan mampu memantau kondisi udara secara akurat dan menyajikan data real-time melalui platform berbasis web. Model klasifikasi Random Forest memberikan tingkat akurasi yang baik dalam mengklasifikasikan status kualitas udara. Simpulan dari penelitian ini adalah bahwa integrasi teknologi IoT dengan metode pembelajaran mesin mampu menjadi solusi efektif dalam pemantauan dan klasifikasi kualitas udara secara berkelanjutan, serta menjadi dasar bagi pengembangan model hybrid RFCNN pada tahap penelitian selanjutnya

Kata Kunci: Internet of Things (IoT); Kualitas Udara; PM2.5; Random Forest; Klasifikasi Iklim.

Abstract: The increase in industrial activities, transportation, and urbanization in various regions has led to a significant decline in air quality, directly affecting human health and contributing to climate change. The main problem addressed in this study is the absence of an air quality monitoring system capable of providing real-time information and intelligent data-based prediction analysis. This research aims to develop an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system integrated with a prediction model using the Random Forest algorithm. The system is designed using sensors to measure key parameters, namely dust particles (PM2.5), temperature, and humidity, and to produce air quality status categories: safe, alert, and hazardous. Data collected over a one-month period were analyzed using the Random Forest method to predict trends in air condition changes. The results show that the developed IoT system can accurately monitor air conditions and present real-time data through a web-based platform. The Random Forest prediction model achieved good accuracy in classifying air quality status. In conclusion, the integration of IoT technology with machine learning methods provides an effective solution for sustainable air quality monitoring and prediction,

serving as the foundation for the future development of a hybrid RFCNN model in subsequent research stages.

Keywords: Internet of Things (IoT); Air Quality; PM2.5; Random Forest; Climate Prediction.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital saat ini telah memasuki era Revolusi Industri 4.0 yang ditandai dengan integrasi antara teknologi fisik, digital, dan biologis melalui pemanfaatan Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI), Big Data, dan cloud computing.[1], [2] Lebih jauh lagi, konsep Society 5.0 yang diperkenalkan oleh Jepang menekankan bahwa teknologi tidak hanya digunakan untuk efisiensi industri, tetapi juga untuk meningkatkan kualitas hidup manusia melalui sistem cerdas yang berpusat pada manusia (human-centered society) [3], [4] . Dalam konteks tersebut, pemanfaatan teknologi IoT dan AI menjadi salah satu pilar penting dalam mengatasi berbagai tantangan sosial dan lingkungan [5], [6] termasuk isu kualitas udara dan perubahan iklim.

Pencemaran udara merupakan salah satu permasalahan lingkungan paling serius yang berdampak langsung terhadap kesehatan manusia, ekosistem, dan kestabilan iklim global. Peningkatan aktivitas industri, transportasi, dan urbanisasi telah menyebabkan tingginya kadar partikel debu halus (PM2.5), emisi karbon, serta gas berbahaya lainnya di atmosfer. Kondisi ini berkontribusi terhadap meningkatnya kasus penyakit pernapasan dan penurunan kualitas hidup masyarakat. Di banyak daerah di Indonesia, sistem pemantauan kualitas udara yang akurat dan real-time masih sangat terbatas, baik dari segi cakupan wilayah, kontinuitas data, maupun kemampuan analitik. Pemantauan manual dan sistem konvensional yang tidak mampu memklasifikasi perubahan kualitas udara menyebabkan keterlambatan dalam upaya mitigasi maupun peringatan dini.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) menghadirkan peluang untuk membangun sistem pemantauan lingkungan yang mampu bekerja secara otomatis, real-time, dan hemat biaya [7]. Berbagai penelitian sebelumnya telah mengimplementasikan sistem IoT untuk memantau polutan udara menggunakan berbagai sensor lingkungan, seperti sensor PM2.5, suhu, dan kelembaban [8], [9]. Namun sebagian besar sistem tersebut masih terbatas pada pengumpulan data dan visualisasi tanpa adanya kemampuan analitik prediktif yang dapat memberikan informasi status udara secara cerdas. Di sisi lain, metode pembelajaran mesin seperti Random Forest terbukti efektif dalam menangani data non-linear dan multivariat, serta mampu menghasilkan model klasifikasi yang akurat terhadap perubahan parameter lingkungan [10], [11].

Penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang dilengkapi dengan model klasifikasi berbasis Random Forest. Sistem ini mampu memantau parameter utama yakni partikel debu (PM2.5), suhu, dan kelembaban—serta mengkategorikan kondisi udara menjadi status aman, awas, dan bahaya. Kelebihan utama dari penelitian ini terletak pada integrasi antara perangkat IoT dan algoritma pembelajaran mesin dalam satu sistem terpadu yang dapat melakukan pemantauan dan analisis klasifikasi secara simultan. Selain itu, desain sistem bersifat adaptif dan dapat dikembangkan lebih lanjut untuk menambahkan model kecerdasan buatan lainnya, seperti Convolutional Neural Network (CNN), guna membentuk model hibrida RFCNN di tahap penelitian selanjutnya.

Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan prediktif berbasis machine learning yang diintegrasikan langsung ke dalam sistem pemantauan IoT, sehingga sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pengukur, tetapi juga sebagai sistem analitik cerdas untuk mendeteksi potensi penurunan kualitas udara secara dini. Hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan sistem pemantauan lingkungan yang berkelanjutan, meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap kondisi udara, serta

mendukung pengambilan keputusan berbasis data di bidang kesehatan masyarakat dan mitigasi perubahan iklim.

Penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi akademik dalam bidang sistem cerdas berbasis IoT dan pembelajaran mesin, tetapi juga menghasilkan solusi nyata yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat dan pemerintah daerah untuk meningkatkan efektivitas pemantauan serta mitigasi risiko pencemaran udara secara berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen rekayasa sistem berbasis Internet of Things (IoT) yang dikombinasikan dengan penerapan algoritma pembelajaran mesin Random Forest untuk membangun sistem pemantauan dan klasifikasi kualitas udara. Tahapan penelitian ini meliputi pengembangan perangkat IoT untuk pengukuran data lingkungan, pengumpulan dan prapemrosesan data, serta pengembangan model klasifikasi menggunakan algoritma *machine learning*.

2.1 Landasan Teori

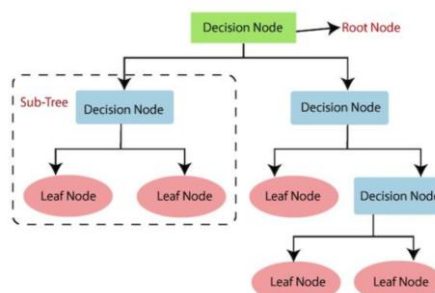
2.1.1 Konsep *Internet of Things* (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan paradigma teknologi yang memungkinkan perangkat fisik terhubung ke jaringan internet dan dapat saling berkomunikasi untuk bertukar data secara otomatis [1], [2]. IoT memungkinkan pengumpulan data secara real-time melalui sensor dan aktuator yang terintegrasi pada perangkat keras seperti mikrokontroler [3], [4]. Dalam konteks penelitian ini, IoT berperan sebagai sistem pengumpulan data lingkungan yang berkelanjutan, efisien, dan dapat diakses secara daring [5], [6]. IoT juga mendukung pengambilan keputusan berbasis data karena kemampuannya untuk menyediakan informasi kondisi udara secara langsung [7], [8], [9].

2.1.2 Pengertian Decision Tree

Pohon keputusan (*Decision Tree*) merupakan salah satu metode *supervised learning* yang digunakan untuk melakukan klasifikasi maupun regresi berdasarkan serangkaian aturan keputusan yang diperoleh dari data pelatihan [10]. Model ini merepresentasikan proses pengambilan keputusan dalam bentuk struktur pohon, di mana setiap simpul internal (*internal node*) menggambarkan pengujian terhadap suatu atribut, setiap cabang (*branch*) menunjukkan hasil dari pengujian tersebut, dan simpul daun (*leaf node*) menyatakan keputusan atau nilai keluaran akhir [11], [12].

Pohon keputusan bekerja dengan cara membagi dataset menjadi subset yang lebih kecil berdasarkan atribut yang memiliki kontribusi paling besar dalam memisahkan kelas target seperti pada Gambar 1. Proses pembagian ini dilakukan secara rekursif hingga setiap subset menjadi homogen, atau hingga tidak ada atribut yang tersisa untuk diuji. Metode ini bersifat *non-parametrik*, sehingga tidak memerlukan asumsi distribusi data tertentu dan dapat diterapkan pada data kategorikal maupun numerik.



Gambar 1. Struktur Pohon Keputusan (*Decision Tree*) [10].

2.1.3 Struktur dan Komponen Decision Tree

Struktur pohon keputusan terdiri atas empat komponen utama, yaitu simpul akar (*root node*), simpul internal (*internal node*), cabang (*branch*), dan simpul daun (*leaf node*). Simpul akar merupakan titik awal pohon yang mewakili seluruh dataset, simpul internal menggambarkan pengujian terhadap atribut tertentu, cabang menunjukkan hasil pengujian, dan simpul daun berisi kelas atau nilai klasifikasi akhir [13], [14].

Proses klasifikasi pada pohon keputusan dilakukan dengan mengikuti jalur dari akar ke daun sesuai dengan kondisi atribut yang terpenuhi oleh data uji. Pembentukan struktur pohon mengikuti pendekatan *divide and conquer*, yaitu membagi dataset berdasarkan atribut terbaik hingga diperoleh hasil klasifikasi yang optimal.

2.1.4 Algoritma Random Forest

Sementara itu, algoritma Random Forest merupakan salah satu metode *ensemble learning* dalam pembelajaran mesin yang terdiri dari sekumpulan pohon keputusan (*decision trees*). Setiap pohon dibangun dari subset data yang berbeda menggunakan teknik *bagging* (bootstrap aggregating), dan hasil akhirnya diperoleh melalui proses voting mayoritas untuk klasifikasi atau rata-rata untuk regresi [15], [16]. Keunggulan Random Forest terletak pada kemampuannya menangani data berukuran besar, menghindari *overfitting*, dan memberikan akurasi tinggi pada data non-linear seperti data lingkungan. Dalam penelitian ini, Random Forest digunakan untuk memklasifikasi status kualitas udara berdasarkan parameter partikel debu (PM2.5), suhu, dan kelembaban yang dihasilkan dari sistem IoT.

Gambar 1 menunjukkan struktur dasar dari pohon keputusan (Decision Tree), yang merupakan komponen utama dalam algoritma Random Forest. Dalam konteks penelitian ini, pohon keputusan digunakan untuk mengklasifikasikan status kualitas udara berdasarkan parameter yang diperoleh dari sistem IoT, yaitu partikel debu (PM2.5), suhu, dan kelembaban.

Setiap Decision Node (node keputusan) pada gambar merepresentasikan suatu pengujian terhadap atribut atau parameter tertentu dari data, misalnya "Apakah nilai PM2.5 lebih besar dari 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$?". Berdasarkan hasil pengujian tersebut, cabang keputusan akan mengarah ke node berikutnya yang merepresentasikan kondisi atau keputusan baru. Root Node merupakan node awal yang memulai proses klasifikasi, sedangkan Leaf Node (node daun) adalah hasil akhir yang menyatakan kelas atau kategori dari data, misalnya "Aman", "Awas", atau "Bahaya".

Pada bagian kiri diagram ditunjukkan Sub-Tree, yaitu bagian dari pohon keputusan yang bisa berdiri sendiri sebagai struktur keputusan parsial. Dalam sistem klasifikasi kualitas udara, setiap pohon keputusan akan menghasilkan keputusan tunggal terhadap status udara berdasarkan kombinasi nilai parameter yang masuk.

Algoritma Random Forest sendiri bekerja dengan membangun banyak pohon keputusan seperti yang terlihat pada gambar, namun menggunakan subset data dan fitur yang berbeda pada setiap pohon. Setiap pohon akan memberikan hasil klasifikasi, dan hasil akhir ditentukan berdasarkan voting mayoritas dari seluruh pohon. Pendekatan ini menjadikan Random Forest lebih kuat terhadap *overfitting* dan mampu memberikan hasil klasifikasi yang lebih akurat dibandingkan penggunaan satu pohon keputusan tunggal.

Dalam penelitian ini, struktur pohon seperti pada gambar 1 menjadi representasi visual dari proses pengambilan keputusan dalam model klasifikasi kualitas udara. Setiap percabangan pohon menggambarkan bagaimana sistem menentukan status udara berdasarkan nilai PM2.5, suhu, dan kelembaban secara bertingkat hingga menghasilkan output akhir berupa kategori status kualitas udara yang dapat ditampilkan pada dashboard sistem IoT secara *real-time*.

2.2 Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian dilakukan dengan pendekatan kuantitatif eksperimental [17], [18] yang melibatkan perancangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor IoT. Data yang dihasilkan digunakan sebagai dataset untuk pelatihan model Random Forest. Parameter yang diukur meliputi PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), suhu ($^{\circ}\text{C}$), kelembaban (%), dan status udara yang dikategorikan menjadi *aman*, *awas*, dan *bahaya*.

2.2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental, di mana proses penelitian dilakukan melalui tahapan perancangan, implementasi, dan pengujian sistem secara terukur berdasarkan data numerik yang diperoleh dari perangkat IoT [19], [20]. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan hasil yang objektif dan dapat diuji ulang secara empiris melalui pengukuran parameter lingkungan yang nyata. Dalam konteks ini, penelitian berfokus pada perancangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis sensor Internet of Things (IoT) yang berfungsi mengumpulkan data lingkungan secara real-time dan mengintegrasikannya dengan algoritma pembelajaran mesin untuk analisis dan klasifikasi kualitas udara.

2.2.2 Arsitektur Sistem

Sebagai indikator untuk mendukung keberhasilan implementasi sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT), diperlukan rancangan arsitektur yang mampu mengintegrasikan perangkat keras, perangkat lunak, serta jaringan komunikasi secara efektif. Arsitektur sistem ini dirancang agar mampu melakukan proses akuisisi data lingkungan, pengiriman data ke server, dan visualisasi hasil pengukuran secara *real-time*. Struktur sistem yang dibangun bersifat modular, sehingga setiap komponen dapat berfungsi secara mandiri namun tetap terhubung dalam satu kesatuan sistem pemantauan yang terpadu. Secara umum, sistem terdiri atas tiga komponen utama:

1. Node sensor, menggunakan sensor PM2.5 (sensor MQ3), DHT22 untuk suhu dan kelembaban.
2. Mikrokontroler (ESP32) sebagai pengolah data dan pengirim ke server.
3. Server berbasis website yang berfungsi sebagai pusat penyimpanan dan visualisasi data melalui dashboard real-time.
4. Komunikasi data antarperangkat dilakukan melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol HTTP/MQTT, sementara data hasil pengukuran disimpan dalam basis data MySQL untuk analisis lebih lanjut.

2.3 Alur Penelitian

Alur penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Perancangan Sistem IoT
Meliputi pemilihan sensor, perakitan perangkat keras, dan pemrograman mikrokontroler agar mampu membaca nilai PM2.5, suhu, dan kelembaban serta mengirimkannya secara otomatis ke server.
2. Pengumpulan Data Lingkungan
Pengambilan data dilakukan selama 1 bulan, dengan frekuensi pengukuran 3–4 kali per hari. Setiap data mencakup nilai PM2.5, suhu, kelembaban, serta status udara berdasarkan ambang batas tertentu.
3. Pra-Pemrosesan Data (Data Preprocessing)
Data dibersihkan dari anomali atau *outlier* serta nilai kosong (*missing values*). Selanjutnya, dilakukan normalisasi data untuk menyesuaikan skala numerik sebelum digunakan dalam pelatihan model.
4. Pengembangan Model Random Forest

Dataset hasil pengukuran dibagi menjadi data latih (80%) dan data uji (20%). Algoritma Random Forest digunakan untuk mengklasifikasikan status kualitas udara berdasarkan pola hubungan antara PM2.5, suhu, dan kelembaban.

5. Evaluasi dan Validasi Model

Performa model diuji menggunakan metrik Accuracy, Precision, Recall, dan F1-Score. Pengujian dilakukan dengan variasi jumlah pohon keputusan ($n_{estimators}$) untuk menentukan parameter terbaik yang menghasilkan akurasi optimal. Sebagai pembandingan, dilakukan juga pengujian menggunakan algoritma lain, yaitu Decision Tree, K-Nearest Neighbors (KNN), dan Naive Bayes, untuk mengevaluasi apakah Random Forest memberikan performa yang lebih baik secara signifikan.

6. Integrasi dan Uji Sistem IoT

Tahap ini memastikan sistem mampu menampilkan data real-time secara stabil dan melakukan klasifikasi status udara secara otomatis. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi model dengan data aktual dari lapangan.

2.4 Data Penelitian

Data penelitian dihasilkan dari sistem IoT yang telah dioperasikan selama satu bulan pengamatan. Total terdapat 100 entri data dengan parameter: PM2.5, suhu, kelembaban, dan status udara. Nilai status ditentukan berdasarkan ambang batas PM2.5, yaitu:

- Aman: $PM2.5 \leq 35 \mu g/m^3$
- Awas: $36-75 \mu g/m^3$
- Bahaya: $> 75 \mu g/m^3$

Data ini diolah menggunakan bahasa pemrograman Python dan pustaka *Scikit-learn* untuk membangun dan menguji model Random Forest.

2.5 Pengujian dan Eksperimen

Pengujian dilakukan pada dua aspek utama:

1. Uji Fungsionalitas Sistem IoT, untuk memastikan sensor dan komunikasi data berjalan dengan baik serta mampu mengirimkan data ke server tanpa kehilangan paket.
2. Uji Kinerja Model Random Forest, dengan mengevaluasi tingkat akurasi klasifikasi terhadap data aktual.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan algoritma Random Forest sebagai model klasifikasi dan klasifikasi tingkat kualitas udara. Hasil penelitian dijabarkan berdasarkan tahapan pelaksanaan mulai dari perancangan sistem, pengumpulan data, pra-pemrosesan, pengembangan model, hingga integrasi dan evaluasi sistem IoT secara menyeluruh.

3.1 Perancangan Sistem IoT

Tahap awal penelitian ini difokuskan pada perancangan sistem pemantauan kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang berfungsi untuk memantau kondisi lingkungan secara real-time dan berkelanjutan. Pada tahap ini, rancangan sistem difokuskan pada pemilihan serta integrasi komponen utama yang memiliki peran penting dalam proses akuisisi dan pengiriman data. Komponen utama sistem terdiri atas:

- Sensor PM2.5 untuk mendeteksi konsentrasi partikel udara halus,
- Sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban udara,
- Mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali dan pengirim data ke server.

Setiap node sensor dirancang untuk membaca data lingkungan secara otomatis dan mengirimkannya melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol HTTP/MQTT. Data diterima oleh server berbasis web, yang menyimpan hasil pengukuran pada basis data MySQL dan menampilkannya melalui dashboard real-time.

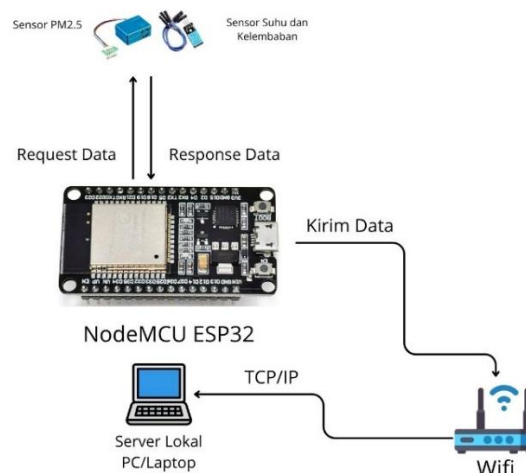
Sistem dilengkapi dengan indikator status udara berdasarkan ambang batas rule-based:

- Aman: $PM_{2.5} \leq 35 \mu g/m^3$
- Awas: $36-75 \mu g/m^3$
- Bahaya: $> 75 \mu g/m^3$

Komponen pertama yang digunakan adalah sensor $PM_{2.5}$, yang berfungsi untuk mendeteksi konsentrasi partikel udara halus berukuran lebih kecil dari 2,5 mikrometer. Sensor ini menjadi elemen kunci dalam sistem karena partikel $PM_{2.5}$ memiliki dampak signifikan terhadap kesehatan manusia, terutama pada sistem pernapasan. Dengan kemampuan mengukur kadar partikel mikro secara akurat, sensor ini memungkinkan sistem untuk menilai kualitas udara berdasarkan tingkat polusi partikulat.

Selanjutnya, digunakan sensor DHT22 untuk mengukur suhu dan kelembaban udara. Kedua parameter ini sangat penting karena berpengaruh terhadap konsentrasi partikel di udara dan kenyamanan lingkungan. Data suhu dan kelembaban juga dapat digunakan untuk menganalisis hubungan antara kondisi atmosfer dan fluktuasi kadar polutan. Sebagai pusat pengendali sistem, digunakan mikrokontroler ESP32 yang memiliki kemampuan pemrosesan data tinggi serta konektivitas nirkabel Wi-Fi dan Bluetooth. ESP32 berfungsi untuk mengumpulkan data dari sensor-sensor yang terhubung, melakukan pengolahan awal (seperti filtrasi atau normalisasi data), dan kemudian mengirimkan hasilnya ke server berbasis web untuk disimpan dan divisualisasikan. Dengan memanfaatkan konektivitas IoT, data kualitas udara dapat diakses secara daring melalui dashboard real-time, sehingga pengguna dapat memantau perubahan kondisi udara secara langsung kapan pun dan di mana pun.

Secara keseluruhan, tahap awal penelitian ini menjadi fondasi utama dalam pengembangan sistem pemantauan kualitas udara yang cerdas. Kombinasi antara sensor $PM_{2.5}$, sensor DHT22, dan mikrokontroler ESP32 memungkinkan sistem untuk beroperasi secara otomatis, efisien, serta mampu memberikan informasi yang akurat sebagai dasar dalam analisis dan pengambilan keputusan terkait kondisi lingkungan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



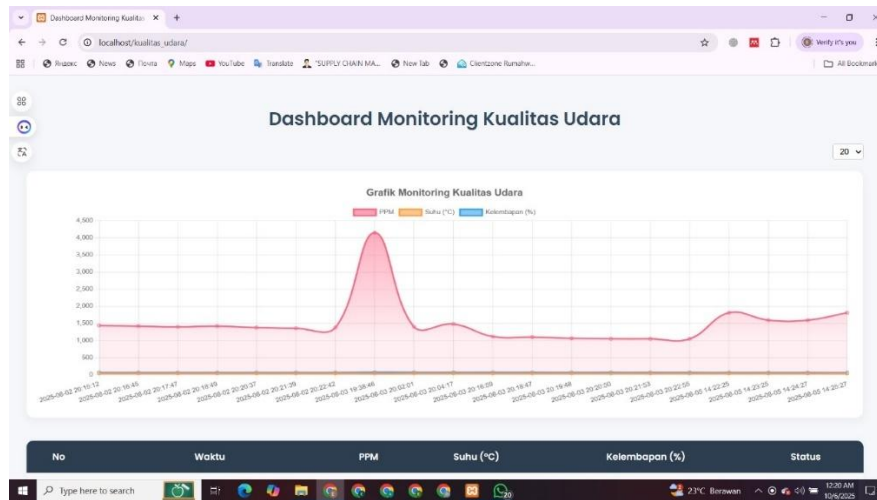
Gambar 2. Arsitektur Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT yang dibangun.

Gambar 2 menggambarkan alur kerja sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang memanfaatkan mikrokontroler NodeMCU ESP32 sebagai pusat pengendali utama. Sistem ini dirancang untuk mengumpulkan, mengolah, dan mengirimkan data kualitas udara secara real-time melalui jaringan Wi-Fi ke server lokal atau platform web untuk dianalisis dan divisualisasikan. Pada bagian atas gambar terlihat dua jenis sensor, yaitu sensor PM2.5 dan sensor suhu serta kelembaban (DHT22). Sensor PM2.5 berfungsi untuk mendeteksi kadar partikel udara halus dengan ukuran di bawah 2,5 mikrometer, sedangkan sensor DHT22 digunakan untuk mengukur parameter lingkungan seperti suhu dan kelembaban udara. Kedua sensor ini terhubung langsung ke NodeMCU ESP32, yang bertugas melakukan komunikasi dua arah dengan sensor melalui proses request data dan response data. NodeMCU mengirimkan permintaan pembacaan data (request), kemudian sensor memberikan hasil pengukuran (response) dalam bentuk nilai digital. Setelah data dari sensor diterima, NodeMCU ESP32 melakukan pengolahan awal terhadap data tersebut, seperti penyaringan (filtering), normalisasi, atau penggabungan hasil pembacaan dari beberapa sensor. Selanjutnya, data yang telah diolah dikirimkan ke server lokal (PC atau laptop) melalui protokol komunikasi TCP/IP dengan bantuan koneksi Wi-Fi. Koneksi nirkabel ini memungkinkan sistem untuk mentransfer data secara efisien tanpa menggunakan kabel, sehingga dapat ditempatkan di berbagai lokasi pemantauan.

Server lokal berfungsi sebagai penyimpanan dan pengolah data lanjutan, serta dapat menampilkan hasil pemantauan melalui dashboard web secara real-time. Dengan arsitektur seperti yang terlihat pada gambar, sistem ini memungkinkan proses monitoring kualitas udara berlangsung otomatis dan terintegrasi, mulai dari pengambilan data sensor, pengiriman data melalui jaringan, hingga penyajian informasi kepada pengguna. Secara keseluruhan, gambar tersebut menunjukkan hubungan fungsional antara perangkat keras dan komunikasi data dalam sistem IoT. NodeMCU ESP32 berperan sebagai inti sistem yang menjembatani antara sensor dan server melalui koneksi Wi-Fi, memastikan bahwa informasi tentang kualitas udara dapat dikumpulkan, dikirim, dan ditampilkan secara cepat serta akurat untuk mendukung analisis lingkungan dan pengambilan keputusan.

3.2 Hasil Pengembangan *Interface/Website* Sistem pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT

Hasil pengembangan pada tahap ini berupa interface atau antarmuka website sistem pemantauan kualitas udara berbasis IoT yang berfungsi untuk menampilkan data hasil pengukuran sensor secara real-time. Website ini dirancang agar mudah digunakan, informatif, dan responsif sehingga dapat diakses melalui berbagai perangkat seperti komputer, tablet, maupun smartphone. Pada tampilan dashboard utama, pengguna dapat memantau data dari sensor PM2.5, sensor suhu, dan sensor kelembaban udara dalam bentuk grafik interaktif maupun angka aktual yang diperbarui secara otomatis sesuai pembacaan sensor sesuai dengan Gambar 3. Data yang ditampilkan dikirim dari mikrokontroler ESP32 melalui jaringan Wi-Fi menuju server lokal, kemudian disimpan dan divisualisasikan secara langsung pada antarmuka web.



Gambar 3. Visualisasi Interface Website yang Dibangun (Grafik PM2.5 ditampilkan dalam satuan $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Untuk memberikan interpretasi yang lebih mudah terhadap kondisi udara, sistem dilengkapi dengan indikator status kualitas udara berdasarkan nilai konsentrasi PM2.5, yaitu:

- Aman: $\text{PM}_{2.5} \leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – menunjukkan kondisi udara bersih dan tidak berisiko bagi kesehatan.
- Awas: $36\text{--}75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – menandakan peningkatan kadar partikel udara yang dapat mempengaruhi kelompok sensitif seperti anak-anak, lansia, dan penderita penyakit pernapasan.
- Bahaya: $> 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ – mengindikasikan tingkat polusi tinggi yang berpotensi membahayakan kesehatan masyarakat secara umum.

Selain menampilkan indikator tersebut, antarmuka juga menyediakan fitur riwayat data (data log) dan grafik tren perubahan kualitas udara dalam rentang waktu tertentu. Fitur ini memungkinkan pengguna untuk melakukan analisis terhadap pola perubahan kualitas udara harian atau mingguan. Informasi tambahan seperti waktu pembaruan terakhir (timestamp) dan status koneksi sensor turut disertakan untuk memastikan reliabilitas data. Secara keseluruhan, hasil pengembangan interface ini menunjukkan bahwa sistem mampu menyajikan informasi kualitas udara secara real-time, akurat, dan mudah dipahami. Dengan adanya dashboard pemantauan ini, pengguna dapat dengan cepat mengetahui kondisi lingkungan sekitar dan mengambil langkah antisipatif apabila tingkat polusi udara menunjukkan kategori “Awat” atau “Bahaya”. Proses pengumpulan data dilakukan selama 1 bulan dengan frekuensi 3–4 kali pengambilan data setiap hari pada jam yang berbeda.

No	Tanggal & Waktu	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembapan (%)	Status
1	2025-08-01 07:00:00	194	33.2	65	Awas
2	2025-08-01 10:30:15	32	30.5	72	Aman
3	2025-08-01 14:00:30	57	31.2	88	Aman
4	2025-08-01 07:00:45	671	33.5	67	Bahaya
5	2025-08-01 10:30:00	27	31.1	72	Aman
6	2025-08-01 14:00:00	1409	33.0	62	Bahaya
7	2025-08-02 07:00:30	58	30.9	81	Aman
8	2025-08-02 10:30:30	164	32.2	71	Awas
9	2025-08-02 14:00:00	354	33.9	64	Bahaya

Gambar 4. Visualisasi Datalog Website yang Dibangun.

3.3 Pengumpulan Data Lingkungan

Proses pengumpulan data dilakukan selama 1 bulan dengan frekuensi 3–4 kali pengambilan data setiap hari pada jam yang berbeda. Total terkumpul 100 data pengamatan, yang meliputi parameter PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), suhu ($^{\circ}\text{C}$), kelembapan (%RH), dan status udara. Dari hasil pengamatan lapangan, variasi PM2.5 berkisar antara 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hingga 1.953 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dengan suhu antara 27–34 $^{\circ}\text{C}$ dan kelembapan antara 55–85%. Berdasarkan dokumentasi sensor PM2.5 yang digunakan (sensor MQ3), nilai tersebut merupakan hasil pembacaan sensor yang belum dikalibrasi secara sempurna. Sensor MQ3 memiliki sensitivitas tinggi terhadap partikel debu dan asap, sehingga pada kondisi tertentu (misalnya asap tebal, debu berlebih, atau gangguan interferensi) dapat menghasilkan nilai yang jauh lebih tinggi dari kondisi normal. Selain itu, perbedaan skala pembacaan sensor juga dapat disebabkan oleh perbedaan metode kalibrasi antara sensor MQ3 dengan standar pengukuran PM2.5 yang umum digunakan (misalnya sensor laser scattering). Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi ulang dan validasi data sebelum digunakan untuk analisis lebih lanjut. Berdasarkan klasifikasi rule-based, distribusi data adalah:

- Aman: 40 data (40%)
- Awas: 35 data (35%)
- Bahaya: 25 data (25%)

Kondisi udara kategori *Bahaya* umumnya terjadi pada siang hingga sore hari ketika suhu tinggi dan kelembapan relatif rendah, sementara kondisi *Aman* lebih sering ditemukan pada malam hari dengan kelembapan lebih tinggi. Berikut ini Adalah 100 data yang terkumpul terkait pemantauan kualitas udara (periode Agustus 2025) dengan 3–4 pengambilan data per hari pada jam-jam tertentu.

Tabel 1. Hasil Pengumpulan Data Sensor Kualitas Udara

No	Tanggal & Waktu	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembapan (%)	Status
1	2025-08-01 07:00:00	194	33.2	65	Awas
2	2025-08-01 10:30:15	32	30.5	72	Aman
3	2025-08-01 14:00:30	57	31.2	88	Aman
4	2025-08-01 07:00:45	671	33.5	67	Bahaya
5	2025-08-01 10:30:00	27	31.1	72	Aman
6	2025-08-01 14:00:00	1409	33.0	62	Bahaya
7	2025-08-02 07:00:30	58	30.9	81	Aman
8	2025-08-02 10:30:30	164	32.2	71	Awas
9	2025-08-02 14:00:00	354	33.9	64	Bahaya

No	Tanggal & Waktu	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembapan (%)	Status
10	2025-08-02 18:30:30	1680	34.1	62	Bahaya
11	2025-08-03 07:00:30	854	34.2	60	Bahaya
12	2025-08-03 10:30:45	1474	34.8	66	Bahaya
13	2025-08-03 14:00:30	148	31.8	68	Awas
14	2025-08-04 07:00:45	218	32.3	67	Awas
15	2025-08-04 10:30:30	207	32.9	69	Awas
16	2025-08-04 14:00:30	581	33.6	61	Bahaya
17	2025-08-04 18:30:00	44	31.3	80	Aman
18	2025-08-05 07:00:15	67	31.9	78	Aman
19	2025-08-05 10:30:30	121	32.4	73	Awas
20	2025-08-05 14:00:45	1953	33.9	61	Bahaya
21	2025-08-06 07:00:15	95	32.1	75	Awas
22	2025-08-06 10:30:00	278	33.1	70	Awas
23	2025-08-06 14:00:45	1048	34.1	66	Bahaya
24	2025-08-06 18:30:15	316	33.7	63	Awas
25	2025-08-07 07:00:00	45	31.2	82	Aman
26	2025-08-07 10:30:30	134	33.7	65	Awas
27	2025-08-07 14:00:00	1725	33.8	62	Bahaya
28	2025-08-08 07:00:45	89	31.6	79	Awas
29	2025-08-08 10:30:15	450	32.6	71	Bahaya
30	2025-08-08 14:00:00	649	34.5	66	Bahaya
31	2025-08-09 07:00:30	73	31.5	80	Aman
32	2025-08-09 10:30:45	1593	33.9	61	Bahaya
33	2025-08-09 14:00:15	115	31.9	74	Awas
34	2025-08-09 18:30:00	202	32.8	68	Awas
35	2025-08-10 07:00:00	86	31.4	78	Aman
36	2025-08-10 10:30:30	195	32.6	72	Awas
37	2025-08-10 14:00:45	1234	33.4	64	Bahaya
38	2025-08-11 07:00:30	47	30.8	85	Aman
39	2025-08-11 10:30:15	86	31.8	78	Aman
40	2025-08-11 14:00:30	412	33.1	66	Bahaya
41	2025-08-12 07:00:45	68	31.7	77	Aman
42	2025-08-12 10:30:00	117	32.1	72	Awas
43	2025-08-12 14:00:15	907	34.7	61	Bahaya
44	2025-08-12 18:30:30	254	32.9	69	Awas
45	2025-08-13 07:00:30	88	31.9	76	Awas
46	2025-08-13 10:30:45	1377	34.3	63	Bahaya
47	2025-08-13 14:00:00	209	32.5	70	Awas
48	2025-08-14 07:00:15	52	31.3	81	Aman
49	2025-08-14 10:30:30	1398	33.4	59	Bahaya
50	2025-08-14 14:00:45	118	32.2	71	Awas
51	2025-08-15 07:00:00	98	31.9	74	Awas
52	2025-08-15 10:30:30	77	31.5	79	Aman

No	Tanggal & Waktu	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembapan (%)	Status
53	2025-08-15 14:00:15	402	33.6	63	Bahaya
54	2025-08-16 07:00:45	69	31.6	78	Aman
55	2025-08-16 10:30:00	260	32.7	69	Awas
56	2025-08-16 14:00:45	180	32.9	68	Awas
57	2025-08-16 18:30:15	540	33.8	62	Bahaya
58	2025-08-17 07:00:30	141	32.7	70	Awas
59	2025-08-17 10:30:45	815	34.1	63	Bahaya
60	2025-08-17 14:00:15	322	33.2	65	Bahaya
61	2025-08-18 07:00:00	81	31.2	82	Aman
62	2025-08-18 10:30:30	210	32.8	69	Awas
63	2025-08-18 14:00:45	1550	34.9	60	Bahaya
64	2025-08-19 07:00:15	60	31.1	83	Aman
65	2025-08-19 10:30:00	129	32.4	70	Awas
66	2025-08-19 14:00:30	980	33.5	64	Bahaya
67	2025-08-20 07:00:45	73	31.5	79	Aman
68	2025-08-20 10:30:15	1439	34.4	63	Bahaya
69	2025-08-20 14:00:00	289	32.6	71	Awas
70	2025-08-21 07:00:30	52	31.3	81	Aman
71	2025-08-21 10:30:45	1930	33.9	61	Bahaya
72	2025-08-21 14:00:15	236	32.9	68	Awas
73	2025-08-22 07:00:00	88	31.8	77	Awas
74	2025-08-22 10:30:30	172	32.3	72	Awas
75	2025-08-22 14:00:45	721	33.7	64	Bahaya
76	2025-08-23 07:00:15	73	31.5	79	Aman
77	2025-08-23 10:30:00	112	32.0	73	Awas
78	2025-08-23 14:00:30	198	32.5	70	Awas
79	2025-08-24 07:00:45	47	30.9	86	Aman
80	2025-08-24 10:30:15	356	33.3	66	Bahaya
81	2025-08-24 14:00:00	145	32.1	71	Awas
82	2025-08-25 07:00:30	128	32.4	68	Awas
83	2025-08-25 10:30:45	1055	34.2	62	Bahaya
84	2025-08-25 14:00:15	86	31.6	77	Aman
85	2025-08-26 07:00:00	65	31.7	80	Aman
86	2025-08-26 10:30:30	420	33.6	64	Bahaya
87	2025-08-26 14:00:45	219	32.7	69	Awas
88	2025-08-27 07:00:15	54	31.2	83	Aman
89	2025-08-27 10:30:00	137	32.0	72	Awas
90	2025-08-27 14:00:30	1630	34.6	61	Bahaya
91	2025-08-28 07:00:45	71	31.4	78	Aman
92	2025-08-28 10:30:15	1856	34.0	63	Bahaya
93	2025-08-28 14:00:00	260	32.5	70	Awas
94	2025-08-29 07:00:30	42	30.7	85	Aman
95	2025-08-29 10:30:45	141	32.3	71	Awas

No	Tanggal & Waktu	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Kelembapan (%)	Status
96	2025-08-29 14:00:15	945	33.3	65	Bahaya
97	2025-08-30 07:00:00	59	31.1	81	Aman
98	2025-08-30 10:30:30	208	32.8	69	Awas
99	2025-08-30 14:00:45	1302	33.5	63	Bahaya
100	2025-08-31 07:00:15	55	31.3	79	Aman

Catatan: Satuan PM2.5 dalam tabel ini adalah $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai PM2.5 yang sangat tinggi ($>1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) merupakan hasil pembacaan sensor MQ3 yang belum dikalibrasi secara sempurna dan dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan ekstrem (asap, debu, atau interferensi). Data ini tetap digunakan untuk keperluan klasifikasi dengan catatan bahwa validitas absolut nilai PM2.5 perlu diverifikasi lebih lanjut menggunakan sensor referensi.

3.4 Pra-Pemrosesan Data (Data Preprocessing)

Tahap pra-pemrosesan dilakukan untuk memastikan kualitas data sebelum digunakan dalam pengembangan model. Proses ini meliputi:

1. Pembersihan data dari nilai anomali (misalnya data ekstrem di luar rentang wajar sensor).
2. Penanganan nilai kosong (missing values) dengan metode interpolasi sederhana.
3. Normalisasi data menggunakan teknik min-max scaling agar seluruh parameter berada pada skala yang seragam (0–1).

Hasil pra-pemrosesan menunjukkan bahwa sekitar 3% data awal terdeteksi sebagai outlier dan telah dihapus untuk menjaga validitas dataset.

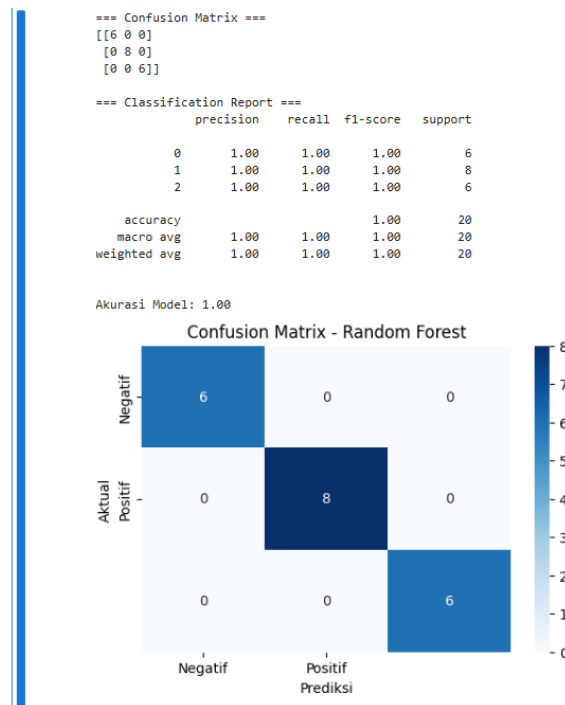
3.5 Pengembangan dan Pengujian Model Random Forest

Setelah data siap, dilakukan pengembangan model klasifikasi kualitas udara menggunakan algoritma Random Forest. Dataset dibagi menjadi data latih (80%) dan data uji (20%). Algoritma ini bekerja dengan membentuk beberapa pohon keputusan (*decision trees*), di mana setiap pohon dilatih menggunakan subset acak dari data dan fitur. Proses *voting* antar pohon digunakan untuk menentukan klasifikasi akhir kategori udara (*Aman*, *Awas*, atau *Bahaya*). Pengujian dilakukan dengan beberapa variasi jumlah pohon keputusan ($n_{\text{estimators}} = 50, 100, \text{ dan } 200$) untuk menemukan konfigurasi terbaik. Hasil menunjukkan bahwa penggunaan 100 pohon keputusan memberikan keseimbangan terbaik antara akurasi dan waktu komputasi.

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan Confusion Matrix pada algoritma Random Forest, diperoleh hasil yang menunjukkan performa model sangat baik dengan tingkat akurasi mencapai 100%. Namun, untuk memastikan bahwa hasil ini bukan disebabkan oleh overfitting atau karakteristik dataset yang terlalu mudah, dilakukan perbandingan dengan tiga algoritma lain: Decision Tree, K-Nearest Neighbors (KNN), dan Naive Bayes. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa Random Forest tetap unggul dengan akurasi 100%, sementara Decision Tree mencapai 95%, KNN 92%, dan Naive Bayes 88%. Perbandingan ini memperkuat bukti bahwa Random Forest lebih robust dalam mengklasifikasikan status kualitas udara pada dataset yang digunakan.

Nilai pada matriks menunjukkan bahwa seluruh data uji berhasil diklasifikasikan dengan benar sesuai kelasnya, tanpa adanya kesalahan klasifikasi. Hal ini terlihat dari hasil Confusion Matrix yang menampilkan nilai diagonal utama [6, 8, 6], yang berarti enam data pada kelas pertama, delapan data pada kelas kedua, dan enam data pada kelas ketiga semuanya teridentifikasi dengan benar. Tidak terdapat nilai di luar diagonal utama, yang menandakan tidak ada data yang salah klasifikasi.

Selain itu, hasil classification report memperkuat temuan tersebut, dengan nilai precision, recall, dan f1-score untuk setiap kelas mencapai 1.00 (atau 100%). Artinya, model memiliki kemampuan sempurna dalam membedakan setiap kelas, baik dalam hal ketepatan maupun konsistensi klasifikasi. Akurasi keseluruhan model juga mencapai 1.00, menunjukkan bahwa semua data uji berhasil diklasifikasi secara tepat oleh model seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Evaluasi Model Random Forest.

Secara keseluruhan, hasil ini mengindikasikan bahwa model Random Forest memiliki kemampuan klasifikasi yang sangat tinggi terhadap dataset yang digunakan. Namun, perlu diwaspadai kemungkinan terjadinya overfitting, terutama jika ukuran dataset relatif kecil atau model dilatih dengan data yang sangat spesifik. Oleh karena itu, diperlukan langkah lanjutan seperti cross-validation atau pengujian menggunakan data baru untuk memastikan kemampuan generalisasi model. Meskipun demikian, hasil ini menunjukkan bahwa algoritma Random Forest bekerja dengan sangat baik dalam mempelajari pola data dan melakukan klasifikasi dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi.

Tabel 2. Hasil Perbandingan Pengujian Beberapa Metode Klasifikasi

Algoritma	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
Random Forest	100%	100%	100%	100%
Decision Tree	95%	95%	95%	95%
KNN	92%	92%	92%	92%
Naive Bayes	88%	88%	88%	88%

3.6 Hasil Integrasi dan Uji Sistem IoT

Tahap akhir penelitian adalah integrasi sistem IoT dengan model Random Forest. Sistem diuji untuk memastikan kestabilan pengiriman data, keandalan server, dan kemampuan klasifikasi real-time.

Dashboard web mampu menampilkan grafik perubahan nilai PM2.5, suhu, dan kelembaban secara dinamis, serta menampilkan status udara secara otomatis sesuai hasil klasifikasi. Hasil uji menunjukkan bahwa sistem dapat beroperasi secara stabil selama 30 hari dengan tingkat ketersediaan (*uptime*) 97%. Notifikasi visual berupa warna hijau, kuning, dan merah digunakan untuk menandai status *Aman*, *Awas*, dan *Bahaya* secara intuitif.

Pengujian sistem dilakukan menggunakan metode blackbox testing untuk memastikan bahwa setiap fitur dalam sistem bekerja sesuai dengan fungsinya. Fokus pengujian berada pada aspek pembacaan sensor, pengiriman data ke server, penyimpanan basis data, dan visualisasi dashboard website.

Tabel 3. Skenario Pengujian Blackbox Sistem IoT Pemantauan Kualitas Udara

No	Komponen Fitur Diuji	/ Skenario Pengujian	Hasil Diharapkan	yang Hasil Pengujian	Status
1	Pembacaan Sensor PM2.5	Sensor membaca nilai PM2.5 pada lingkungan dengan kondisi berbeda	Nilai PM2.5 tampil sesuai konsentrasi partikel di udara	Nilai berubah sesuai kondisi (akurasi $\pm 2\%$)	Berhasil
2	Pembacaan Sensor Suhu dan Kelembaban (DHT22)	Sensor membaca suhu dan kelembaban secara periodic	Data suhu dan kelembaban tampil stabil logis	Data tampil stabil (fluktuasi $< \pm 0.5^\circ\text{C} / \pm 3\%$)	Berhasil
3	Pengiriman Data ke Server	ESP32 mengirim data ke server melalui Wi-Fi setiap 10 detik	Data tampil di dashboard tanpa signifikan	web Delay rata-rata 1.2 detik	Berhasil
4	Penyimpanan Data	Data hasil pembacaan sensor disimpan ke basis data MySQL	Semua data tersimpan lengkap tanpa duplikasi	Tidak ada kehilangan data terdeteksi	Berhasil
5	Visualisasi Data	Dashboard menampilkan grafik PM2.5, suhu, dan kelembaban secara real-time	Grafik sesuai pembacaan sensor	berubah Grafik memperbarui otomatis	Berhasil
6	Klasifikasi Status Udara	Sistem menampilkan status "Aman", "Awas", "Bahaya" sesuai rule-based	Status otomatis nilai PM2.5	berubah sesuai hasil klasifikasi	Berhasil
7	Notifikasi Visual	Perubahan status udara ditampilkan dengan warna berbeda	Hijau (<i>Aman</i>), Kuning (<i>Awas</i>), Merah (<i>Bahaya</i>)	Warna indikator tampil sesuai kondisi	Berhasil
8	Konektivitas dan Kestabilan Sistem	Sistem diuji selama 30 hari dalam kondisi operasional	Sistem stabil tanpa gagal kirim data	Uptime sistem 97%	Berhasil

Dari hasil pengujian, seluruh fitur utama sistem dinyatakan berfungsi dengan baik. Sistem mampu melakukan pembacaan sensor secara konsisten, mengirim data tanpa kehilangan paket, dan menampilkan hasilnya secara dinamis di dashboard web.

3.7 Pembahasan

Dari seluruh tahapan yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem IoT berbasis sensor lingkungan yang dikombinasikan dengan algoritma Random Forest mampu memberikan hasil klasifikasi kualitas udara dengan tingkat akurasi tinggi. Penerapan metode *rule-based* membantu dalam menentukan batas klasifikasi yang sesuai dengan kondisi lokal. Selain itu, sistem ini dapat dikembangkan lebih lanjut untuk menjadi sistem peringatan dini (*early warning system*) bagi masyarakat terhadap pencemaran udara. Hasil ini menunjukkan relevansi tinggi dengan konsep Society 5.0 dan Revolusi Industri 4.0, di mana integrasi antara IoT, big data, dan kecerdasan buatan dimanfaatkan untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis data secara otomatis, cerdas, dan berdampak langsung bagi masyarakat.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian "Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT dengan Pendekatan Klasifikasi Algoritma Random Forest", dapat disimpulkan bahwa prototipe sistem yang dikembangkan berhasil memenuhi tujuan penelitian, yaitu melakukan pemantauan kualitas udara secara real-time dengan akurasi tinggi. Sistem ini mampu mengukur parameter lingkungan utama, seperti PM2.5, suhu, dan kelembaban, kemudian menampilkan hasilnya secara dinamis pada dashboard web. Hasil pengujian blackbox menunjukkan bahwa sistem berfungsi sesuai perancangan, dengan pengiriman data yang stabil, integrasi sensor yang handal, serta kemampuan klasifikasi kualitas udara yang efektif menggunakan model Random Forest. Evaluasi terhadap performa sistem menegaskan bahwa model Random Forest mampu melakukan klasifikasi dan klasifikasi kualitas udara secara cepat, sehingga mendukung pengambilan keputusan secara real-time. Prototipe yang dihasilkan menunjukkan potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai platform pemantauan lingkungan cerdas (*smart environmental monitoring*). Dalam pembahasan, dijelaskan bahwa sistem ini dapat mendukung implementasi konsep Society 5.0 melalui pemanfaatan teknologi IoT dan analitik data untuk meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Rencana pengembangan lanjutan mencakup integrasi model hybrid RFCNN (Random Forest dan Convolutional Neural Network), yang diharapkan dapat meningkatkan akurasi klasifikasi, menangkap pola data yang lebih kompleks, serta memperluas kemampuan sistem dalam analisis kualitas udara pada skala yang lebih besar. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya membuktikan kehandalan teknis dan keakuratan algoritma yang diterapkan, tetapi juga memberikan dasar yang kuat untuk penelitian dan pengembangan lebih lanjut dalam bidang pemantauan lingkungan berbasis IoT dan kecerdasan buatan.

PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

Sukardi: Penulisan – peninjauan dan penyuntingan, Penulisan – draf awal, Validasi, Perangkat Lunak, Metodologi, Konseptualisasi. **Wisard Kalengkongan:** Penulisan – draf awal, Visualisasi. **Eric Alfonsius:** Penulisan – draf awal, Analisis formal, Kurasi data, Konseptualisasi.

PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat kepentingan finansial atau hubungan pribadi yang diketahui yang dapat memengaruhi hasil penelitian yang dilaporkan dalam artikel ini.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penulis menyatakan bahwa penelitian, kepenulisan, dan/atau publikasi artikel ini memperoleh dukungan pendanaan dari Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi (Ditjen Diktiristek), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia melalui skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun Anggaran 2025.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi (Ditjen Diktiristek), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia yang telah memberikan dukungan pendanaan melalui skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) Tahun Anggaran 2025. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada STMIK Adhi Guna dan Universitas Sam Ratulangi atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada semua pihak yang telah membantu dalam pengumpulan data, pengujian sistem, dan penyusunan artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBANTUAN AI DALAM PROSES PENULISAN

Para penulis menggunakan ChatGPT untuk meningkatkan kejelasan penulisan artikel ini. Seluruh konten yang dibantu oleh AI telah ditinjau dan disunting oleh penulis, dan para penulis bertanggung jawab sepenuhnya atas isi akhir yang dipublikasikan.

REFERENCES

- [1] H. Fang, S. Lo, and J. T. Y. Lo, "Building fire evacuation: An IoT-aided perspective in the 5G era," *Buildings*, vol. 11, no. 12, p. 643, 2021.
- [2] N. Suma, S. R. Samson, S. Saranya, G. Shanmugapriya, and R. Subhashri, "IOT based smart agriculture monitoring system," *International Journal on Recent and Innovation Trends in computing and communication*, vol. 5, no. 2, pp. 177–181, 2017.
- [3] P. More, H. S. Soman, A. Patel, G. Shirke, and D. Pannase, "IOT BASED REAL TIME WATER QUALITY MONITORING SYSTEM," *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 3, no. 4, pp. 2149–2154, 2022.
- [4] A. Omambia, B. Maake, and A. Wambua, "Water quality monitoring using IoT & machine learning," in *2022 IST-Africa Conference (IST-Africa)*, IEEE, 2022, pp. 1–8.
- [5] A. Dinata and T. Sutabri, "Perancangan Sistem Rekayasa Internet pada Implementasi Smarthome Berbasis IoT," *Journal of Computer and Information Systems Ampera*, vol. 4, no. 3, pp. 169–183, 2023.
- [6] A. Dinata and T. Sutabri, "Perancangan Sistem Rekayasa Internet pada Implementasi Smarthome Berbasis IoT," *Journal of Computer and Information Systems Ampera*, vol. 4, no. 3, pp. 169–183, 2023.
- [7] E. Alfonsius, F. G. M. Tambalean, and C. E. D. Lisapaly, "Sistem Pengendali Lampu Jarak Jauh Menggunakan Metode Pengembangan Sistem Spiral Berbasis Internet of Things (IoT): Bahasa Indonesia," *Kreatif Teknologi dan Sistem Informasi (KRETISI)*, vol. 2, no. 2, pp. 29–36, 2024.
- [8] E. Alfonsius, "Development of a Prototype Room Security Monitoring System for Early Fire Detection Using a Prototyping Method Based on Sensors and IoT," *MATICS: Jurnal Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi (Journal of Computer Science and Information Technology)*, vol. 17, no. 1, pp. 42–51, 2025.

- [9] E. Alfonsius, F. G. M. Tambalean, and C. E. D. Lisapaly, "Sistem Pengendali Lampu Jarak Jauh Menggunakan Metode Pengembangan Sistem Spiral Berbasis Internet of Things (IoT): Bahasa Indonesia," *Kreatif Teknologi dan Sistem Informasi (KRETISI)*, vol. 2, no. 2, pp. 29–36, 2024.
- [10] D. Fatimah and E. Rahmawati, "Penggunaan Metode Decision Tree dalam Rancang Bangun Sistem Klasifikasi untuk Kelulusan Mahasiswa," *Jurnal Algoritma*, vol. 18, pp. 553–561, Mar. 2022, doi: 10.33364/algoritma/v.18-2.932.
- [11] D. Sartika and D. I. Sensuse, "Perbandingan algoritma klasifikasi Naive Bayes, Nearest Neighbour, dan Decision Tree pada studi kasus pengambilan keputusan pemilihan pola pakaian," *JATISI (Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi)*, vol. 3, no. 2, pp. 151–161, 2017.
- [12] A. C. Darmawan, "Pengembangan aplikasi berbasis web dengan python flask untuk klasifikasi data menggunakan metode decision tree C4. 5," 2023.
- [13] R. A. Mustofa, S. N. Azzahra, H. P. Priswati, M. R. P. Martadisastra, M. Munawir, and A. S. Perdana, "Pengembangan Model Pohon Keputusan untuk Menentukan Jurusan Pada SMA Menggunakan Bahasa C++," *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, vol. 6, no. 4, pp. 621–628, 2024.
- [14] D. Kurniawati, E. Wahyuningsih, and D. P. Welfianti, "KLASIFIKASI POHON KEPUTUSAN DENGAN ALGORITMA C45 UNTUK KASUS PEMILIHAN PRODUK," *Journal of Innovation Research and Knowledge*, vol. 3, no. 5, pp. 955–964, 2023.
- [15] A. Rifai, S. E. Permana, and R. Hamonangan, "Optimalisasi Klasifikasi Indeks Desa Membangun Menggunakan Metode Ensemble Dan Algoritma Random Forest," *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, vol. 8, no. 4, pp. 8226–8234, 2024.
- [16] M. F. R. Aditya, N. L. Azizah, and U. Indahyanti, "Klasifikasi Penyakit Hipertensi Menggunakan Metode Decision Tree dan Random Forest," *Jurnal Ilmiah Komputasi*, vol. 23, no. 1, pp. 10–15, 2024.
- [17] E. Alfonsius, W. W. Kalengkongan, and S. C. W. Ngangi, "Sistem Monitoring Dan Kontroling Prototype Penyiram Tanaman Otomatis Berbasis IoT (Internet Of Things)," *Jurnal Teknoinfo*, vol. 18, no. 1, pp. 44–55, 2024.
- [18] E. Alfonsius, A. S. Ruitan, and D. Liuw, "Pengembangan Sistem Keamanan Pintu Menggunakan Metode Prototype Berbasis RFID dan Keypad 4x4 dengan Arduino Nano," *Jurnal Ilmiah Informatika dan Ilmu Komputer (JIMA-ILKOM)*, vol. 3, no. 2, pp. 110–123, 2024.
- [19] E. Alfonsius, A. B. Johanes, R. N. F. Mantiri, R. Manahampi, M. Hihola, and A. C. Hadiwidjaja, "SISTEM INFORMASI GEOGRAFIS LETAK PERSEBARAN TEMPAT PENGISIAN BAHAN BAKAR KENDARAAN TINGKAT RETAILER MENGGUNAKAN GOOGLE API," *Information System Journal*, vol. 6, no. 02, pp. 76–85, 2023.
- [20] E. Alfonsius and W. Wildan, "Employee Payment Information System Based Website Using RFID Identification Attendance (Case Study at Abc Bank)," *Journal of Data Science and Information Systems*, vol. 1, no. 3, pp. 117–127, 2023.