

SKRIPSI

**SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA MENGGUNAKAN
IOT DAN MACHINE LEARNING UNTUK PREDIKSI POLUSI
DENGAN ALGORITMA RANDOM FOREST**

DISUSUN OLEH

RAJA SYAHLUL IDHAMSyah RUZFI

NPM. 2209020211



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFORMASI
FAKULTAS KOMPUTER DAN TEKNOLOGI INFORMASI
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2026**

**SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA
MENGUNAKAN IOT DAN MACHINE LEARNING UNTUK
PREDIKSI POLUSI DENGAN MENGGUNAKAN
ALGORITMA RANDOM FOREST**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer
(S.Kom) dalam Program Studi Teknologi Informasi, pada Fakultas Ilmu
Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara**

RAJA SYAHLUL IDHAMSyah Ruzfi

NPM. 2209020211

**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI INFORMASI
FAKULTAS KOMPUTER DAN TEKNOLOGI INFORMASI
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

MEDAN

2026

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Skripsi : SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA
MENGUNAKAN IOT DAN MACHINE LEARNING
UNTUK PREDIKSI POLUSI DENGAN
MENGUNAKAN ALGORITMA RANDOM FOREST

Nama Mahasiswa : RAJA SYAHLUL IDHAMSYAH RUZFI

NPM : 2209020211

Program Studi : TEKNOLOGI INFORMASI

Menyetujui

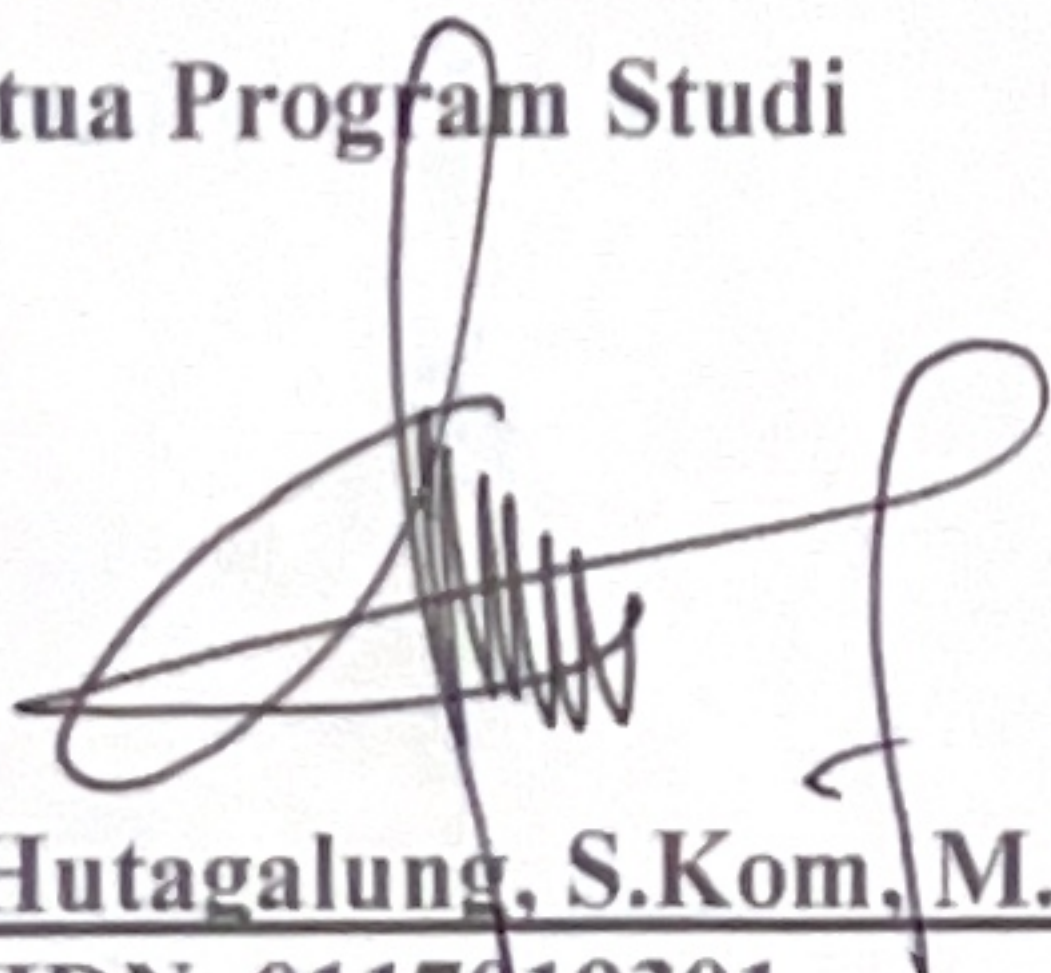
Komisi Pembimbing



(Yohanni Syahra, S.SI., M.Kom.)

NIDN. 0129108201

Ketua Program Studi



(Fatma Sari Hutagalung, S.Kom., M.Kom.)

NIDN. 0117019301

Dekan



(Dr. Al-Khowarizmi, S.Kom., M.Kom.)

NIDN. 0127099201

PERNYATAAN ORISINALITAS

SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA MENGGUNAKAN IOT DAN MACHINE LEARNING UNTUK PREDIKSI POLUSI DENGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA RANDOM FOREST

SKRIPSI

saya menyatakan bahwa karya tulis ini adalah hasil karya sendiri, kecuali beberapa kutipan dan ringkasan yang masing-masing disebutkan sumbernya.

Medan, 20 Maret 2026

Yang membuat pernyataan



Raja Syahlul Idhamsyah Ruzfi

NPM. 2209020211

**PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN
AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, saya bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Raja Syahlul Idhamsyah Ruzfi
NPM : 2209020211
Program Studi : Teknologi Informasi
Karya Ilmiah : Skripsi

Demi Pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Hak Bedas Royalti Non-Eksekutif (*Non-Exclusive Royalty free Right*) atas penelitian skripsi saya yang berjudul:

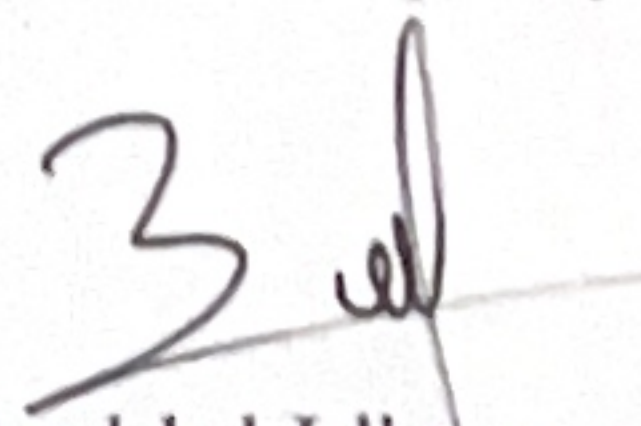
**SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA MENGGUNAKAN IOT
DAN MACHINE LEARNING UNTUK PREDIKSI POLUSI DENGAN
MENGGUNAKAN ALGORITMA RANDOM FOREST**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksekutif ini, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara berhak menyimpan, mengalih media, memformat, mengelola dalam bentuk database, merawat dan mempublikasikan Skripsi saya ini tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis dan sebagai pemegang dan atau sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya.

Medan, 20 Maret 2026

Yang membuat pernyataan



Raja Syahlul Idhamsyah Ruzfi

NPM. 2209020211

RIWAYAT HIDUP

DATA PRIBADI

Nama Lengkap : Raja Syahlul Idhamsyah Ruzfi
Tempat dan Tanggal Lahir : RantauPrapat 24 juni 2003
Alamat Rumah : Jln.prof dr hamka no.138
Telepon/Faks/HP : 081396740572
E-mail : raja56ruzfi@gmail.com
Instansi Tempat Kerja : -
Alamat Kantor : -

DATA PENDIDIKAN

SD : SDN 116241 RantauPrapat TAMAT: 2016
SMP : MTSN 1 RantauPrapat TAMAT: 2019
SMA : SMAN 1 RantauPrapat TAMAT: 2021

KATA PENGANTAR



Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan Iot dan Machine Learning untuk Prediksi Polusi dengan Menggunakan Algoritma Random forest” Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer (S.Kom) pada Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Sumatera Utara. Penulis tentunya berterima kasih kepada berbagai pihak dalam dukungan serta doa dalam penyelesaian skripsi. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Akrim, M.Pd., Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU)
2. Bapak Dr. Al-Khowarizmi, S.Kom., M.Kom. Dekan Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi (FIKTI) UMSU.
3. Ibu Dr. Firaahmi Rizky, S.Kom., M.Kom selaku Wakil Dekan I Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi.
4. Bapak Mhd. Basri, S.Si., M.Kom selaku Wakil Dekan III Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi.
5. Bapak/Ibu Fatma Sari Hutagalung, S.Kom, M.Kom., Ketua Program Studi Teknologi Informasi
6. Pembimbing Yohanni Syahra, S.Si., M.Kom., selaku dosen pembimbing, yang telah memberikan arahan, bimbingan, dukungan, serta masukan yang sangat berarti selama proses penyusunan skripsi ini hingga selesai dengan baik.
7. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada ayahanda Raja Zulfikarsyah S.H., M.A.P atas segala doa, pengorbanan, perhatian, dan dukungan yang tiada henti sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.

8. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada ibunda Tengku Lula Apita S.E atas kasih sayang, doa, serta dukungan yang selalu diberikan sehingga menjadi kekuatan bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
9. Terima kasih kepada saudara-saudari penulis, Raja Safitry Febrina Ruzfi, Raja Khadijah Melfrina Ruzfi. S.Psi., Raja Savira Ratu Aisah Ruzfi, yang senantiasa memberikan dukungan, doa, dan semangat selama proses penyusunan skripsi ini.
10. Semua pihak yang terlibat langsung ataupun tidak langsung yang tidak dapat penulis ucapkan satu-persatu yang telah membantu penyelesaian skripsi ini

Medan, 20 Maret 2026

Penulis



Raja Syahlul Idhamsyah Ruzfi

SISTEM MONITORING KUALITAS UDARA MENGGUNAKAN IOT DAN MACHINE LEARNING UNTUK PREDIKSI POLUSI DENGAN MENGGUNAKAN ALGORITMA RANDOM FOREST

ABSTRAK

Kualitas udara merupakan faktor penting yang memengaruhi kesehatan manusia dan lingkungan. Peningkatan aktivitas industri dan transportasi menyebabkan meningkatnya konsentrasi polutan udara, sehingga diperlukan sistem monitoring yang mampu memberikan informasi secara real-time dan akurat. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan algoritma machine learning Random Forest untuk melakukan prediksi kualitas udara. Sistem yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terhubung dengan sensor DHT22, MQ-135, dan MQ-7 untuk memperoleh data suhu, kelembaban, serta konsentrasi gas pencemar. Data yang diperoleh dikirim ke server dan ditampilkan melalui antarmuka web dalam bentuk dashboard monitoring. Selain itu, data historis digunakan untuk membangun model prediksi kualitas udara menggunakan algoritma Random Forest. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan monitoring kualitas udara secara real-time serta memberikan prediksi dengan tingkat akurasi sebesar 95.91%. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat digunakan sebagai solusi dalam pemantauan dan prediksi kualitas udara secara efektif.

Kata Kunci: IoT, kualitas udara, Random Forest, monitoring, machine learning

AIR QUALITY MONITORING SYSTEM USING IOT AND MACHINE LEARNING TO PREDICTION POLLUTION USING RANDOM FOREST ALGORITHM

ABSTRAK

Air quality is an important factor affecting human health and the environment. The increase in industrial and transportation activities has led to higher air pollution levels, requiring a monitoring system that can provide real-time and accurate information. This study aims to develop an Internet of Things (IoT)-based air quality monitoring system integrated with the Random Forest machine learning algorithm for air quality prediction. The system uses an ESP32 microcontroller connected to DHT22, MQ-135, and MQ-7 sensors to collect environmental data such as temperature, humidity, and gas concentration. The collected data is transmitted to a server and displayed through a web-based monitoring dashboard. Furthermore, historical data is utilized to build a prediction model using the Random Forest algorithm. The results show that the system can monitor air quality in real-time and provide predictions with an accuracy of 95.91%. Therefore, the developed system can be used as an effective solution for air quality monitoring and prediction.

Keywords: IoT, air quality, Random Forest, monitoring, machine learning

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	iv
RIWAYAT HIDUP.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II LANDASAN TEORI	7
2.1 Sistem Monitoring	7
2.2 Kualitas Udara.....	7
2.3 Sistem Monitoring Kualitas Udara	9
2.4 Internet Of Things.....	10
2.5 Machine Learning	11
2.6 Random Forest	12
2.7 Perangkat Keras (Hardware)	14
3.7.1 Mikrokontroler ESP 32.....	14
3.7.2 Sensor DHT22	15
3.7.3 Sensor MQ-135.....	17
3.7.4 Sensor MQ-7	18
3.7.5 Module MicroSD.....	19
3.7.6 LCD I2C	21
3.7.7 RTC.....	22
3.7.8 BreadBoard.....	22
3.7.9 Kabel Jumper	23

2.8	Web Server.....	24
2.9	Arduino IDE	24
2.10	Visual Studio Code	25
2.11	Draw.io	26
2.12	Figma.....	26
2.13	Prinsip Kerja Sistem Monitoring Kualitas Udara.....	27
2.14	Prinsip Kerja Prediksi Kualitas Udara	29
2.15	Penelitian Terdahulu	30
2.16	Analisis GAP	33
BAB III METEDOLOGI PENELITIAN.....		35
3.1	Metode Penelitian	35
3.2	Prosedur Penelitian	35
3.3	Alur Sistem	37
3.4	Variabel Penelitian	41
3.4.1	Variabel Independen (Input).....	41
3.4.2	Variabel Dependen (Output)	42
3.5	Dataset Penelitian dan Pelabelan Data.....	43
3.6	Implementasi Algoritma Random Forest dalam Penelitian.....	44
3.7	Evaluasi Model Prediksi Random Forest.....	48
3.8	Alat dan Bahan Penelitian.....	49
3.8.1	Perangkat Keras (Hardware).....	49
3.8.2	Perangkat Lunak (Software)	50
3.9	Perancangan Prototipe.....	51
3.10	Diagram Blok	51
3.11	Rancangan Web	54
3.12	Lokasi dan Jadwal Penelitian	55
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		57
4.1	Implementasi Sistem Monitoring Kualitas Udara	57
4.1.1	Perangkat Monitoring Kualitas Udara	57
4.1.2	Akuisisi Data Sensor	58
4.2	Sistem Monitoring dan Visualisasi Data.....	59
4.2.1	Tampilan Dashboard	59
4.2.2	Halaman Data Historis Monitoring	60
4.2.3	Halaman Evaluasi Model.....	61

4.3	Analisis Model Prediksi	62
4.3.1	Dataset dan Pelabelan	63
4.3.2	Hasil Klasifikasi.....	63
4.3.3	Evaluasi Model	64
4.4	Evaluasi Kinerja Sistem	66
4.5	Pembahasan	67
BAB V	KESIMPULAN.....	69
5.1	Kesimpulan	69
5.2	Saran	70
DAFTAR PUSTAKA.....		71
LAMPIRAN.....		74

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Sensor DHT11 Dan DHT22	17
Tabel 2.2 Ringkasan Penelitian Terdahulu	30
Tabel 3.1 Jadwal Penelitian	56
Tabel 4.1 Data Hasil Sensor.....	59
Tabel 4.2 Dataset Penelitian	63
Tabel 4.3 Hasil Prediksi	64
Tabel 4.4 Confusion Matrix.....	64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Standart ISPU (Indeks Standar Pencemaran Udara).....	8
Gambar 2.2 Ilustrasi Mekanisme Kerja Algoritma Random Forest.....	13
Gambar 2.3 Mikrokontroler ESP32	15
Gambar 2.4 Sensor DHT 22	16
Gambar 2.6 Sensor MQ 135	18
Gambar 2.7 Sensor MQ7	19
Gambar 2.8 Module MicroSD.....	20
Gambar 2.9 LCD I2C	21
Gambar 2.10 BreadBoard	23
Gambar 2.13 Arduino IDE	25
Gambar 2.14 Draw IO	26
Gambar 2.15 Figma	27
Gambar 3.1 Alur Penelitian.....	36
Gambar 3.2 Alur Sistem	38
Gambar 3.3 Perancangan Prototipe	51
Gambar 3.4 Diagram Blok	51
Gambar 3.5 Rancangan Web	55
Gambar 4.1 Prototipe alat Monitoring	58
Gambar 4.2 Halaman Dashboard.....	60
Gambar 4.3 Halaman Data Historis.....	61
Gambar 4.4 Halaman Evaluasi Model.....	62

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kualitas udara merupakan salah satu indikator penting dalam menilai kesehatan lingkungan dan kualitas hidup manusia. Peningkatan konsentrasi polutan udara, terutama di wilayah perkotaan, disebabkan oleh aktivitas manusia seperti transportasi, industri, dan pembakaran bahan bakar fosil. Paparan polusi udara dalam jangka panjang dapat meningkatkan risiko gangguan kesehatan, khususnya penyakit pernapasan dan kardiovaskular, serta berkontribusi terhadap meningkatnya angka kematian dini (World Health Organization, 2022).

Sistem pemantauan kualitas udara yang tersedia saat ini umumnya masih bersifat konvensional, statis, dan jumlahnya terbatas. Sistem tersebut belum mampu merepresentasikan kondisi kualitas udara secara lokal dan real-time, sehingga informasi yang diperoleh sering kali kurang relevan bagi masyarakat pada lingkungan tertentu. Keterbatasan ini menyebabkan rendahnya efektivitas sistem monitoring dalam memberikan informasi kualitas udara yang akurat dan tepat waktu (Putro et al., 2024)

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) memberikan peluang dalam pengembangan sistem monitoring kualitas udara yang lebih adaptif dan fleksibel. IoT memungkinkan integrasi sensor lingkungan, mikrokontroler, dan jaringan internet sehingga proses pengumpulan dan pengiriman data kualitas udara dapat dilakukan secara otomatis dan real-time. Pemanfaatan teknologi IoT terbukti mampu meningkatkan efisiensi pemantauan lingkungan serta memperluas akses informasi udara kepada masyarakat (Saputra et al., 2023).

Dalam sistem monitoring berbasis IoT, mikrokontroler ESP32 banyak digunakan karena telah dilengkapi modul Wi-Fi terintegrasi dan memiliki kemampuan pemrosesan data yang memadai. Penggunaan ESP32 memungkinkan integrasi berbagai sensor lingkungan, seperti sensor suhu, kelembaban, dan sensor gas, sehingga mendukung proses monitoring kualitas udara secara berkelanjutan dan efisien (Wijaya & Nugroho, 2023)

Meskipun sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT mampu menyediakan data secara real-time, sistem tersebut umumnya masih bersifat deskriptif dan belum memiliki kemampuan untuk memprediksi kondisi kualitas udara di masa mendatang. Oleh karena itu, diperlukan penerapan machine learning untuk menganalisis pola data lingkungan dan menghasilkan prediksi tingkat kualitas udara. Salah satu algoritma yang efektif dalam menangani data lingkungan yang kompleks dan bersifat non-linear adalah Random Forest, yang telah terbukti memiliki tingkat akurasi tinggi dalam permasalahan klasifikasi dan prediksi kualitas udara (Li et al., 2024)

Selain itu, pemilihan algoritma Random Forest dalam penelitian ini didasarkan pada karakteristik data kualitas udara yang bersifat multivariat dan non-linear. Data hasil pembacaan sensor seperti suhu, kelembaban, konsentrasi gas umum, dan karbon monoksida memiliki hubungan yang kompleks serta dapat saling memengaruhi dalam menentukan kategori kualitas udara. Random Forest sebagai metode ensemble learning mampu membangun banyak pohon keputusan berdasarkan subset data dan fitur yang berbeda, sehingga menghasilkan model yang lebih stabil dan memiliki kemampuan generalisasi yang baik. Keunggulan ini menjadikan Random Forest lebih robust terhadap noise data sensor serta mampu

mengurangi risiko overfitting dibandingkan metode single decision tree. Dengan demikian, algoritma ini dinilai sesuai untuk diimplementasikan pada sistem prediksi kualitas udara berbasis IoT yang memanfaatkan data primer dari sensor secara real-time.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan algoritma Random Forest untuk melakukan prediksi kategori kualitas udara berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Sistem yang dikembangkan diharapkan tidak hanya mampu memantau kondisi kualitas udara secara real-time, tetapi juga memberikan prediksi sebagai bentuk peringatan dini terhadap potensi pencemaran udara.

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, sebagian besar sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) masih terbatas pada penyajian data secara real-time tanpa kemampuan prediksi, sementara penelitian prediksi kualitas udara dengan algoritma machine learning, khususnya Random Forest, umumnya menggunakan dataset sekunder dan tidak terintegrasi langsung dengan sistem IoT. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang terintegrasi dengan algoritma Random Forest dan memanfaatkan data primer hasil pembacaan sensor secara langsung, serta didukung mekanisme penyimpanan data lokal sebagai cadangan untuk menjaga keberlanjutan data historis.

1.2 Rumusan Masalah

Agar penelitian dapat berjalan terarah dan fokus pada permasalahan utama, maka perlu ditetapkan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor gas?
2. Bagaimana proses pengumpulan dan penyimpanan data kualitas udara secara real-time untuk keperluan analisis?
3. Bagaimana Penerapan algoritma Random Forest dalam memprediksi tingkat polusi udara berdasarkan data sensor?
4. Seberapa akurat hasil prediksi kualitas udara yang dihasilkan oleh model Random Forest?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya, terdapat beberapa batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengembangan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) dengan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali utama.
2. Sensor yang digunakan dalam penelitian ini terbatas pada sensor DHT22 untuk pengukuran suhu dan kelembapan udara, sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas pencemar udara, serta sensor MQ-7 untuk mendeteksi kandungan karbon monoksida (CO).
3. Sistem penyimpanan data menggunakan modul MicroSD yang dilengkapi dengan Real Time Clock (RTC) sebagai penanda waktu pencatatan data, terutama ketika koneksi jaringan tidak tersedia.
4. Algoritma Machine Learning yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada metode Random Forest untuk melakukan analisis dan prediksi kualitas udara berdasarkan data sensor.

5. Pengujian sistem dilakukan pada lingkungan lokal dalam skala prototipe dan belum diterapkan pada skala industri maupun wilayah pemantauan yang luas.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan dari rumusan masalah di atas, adapun tujuan penelitian yang dapat dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengembangkan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu melakukan pengambilan data secara otomatis.
2. Membangun sistem penyimpanan data kualitas udara secara real-time yang tetap dapat berfungsi meskipun terjadi gangguan atau keterbatasan koneksi jaringan.
3. Mengimplementasikan algoritma Random Forest sebagai metode prediksi untuk menentukan tingkat kualitas udara berdasarkan data hasil pembacaan sensor.
4. Melakukan evaluasi terhadap kinerja sistem serta tingkat akurasi model prediksi kualitas udara yang dihasilkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan solusi alternatif dalam pemantauan kualitas udara yang bersifat real-time, otomatis, dan mudah diakses oleh pengguna.

2. Menyediakan sistem prediksi kualitas udara yang dapat digunakan sebagai bentuk peringatan dini terhadap potensi pencemaran udara di lingkungan sekitar.
3. Menjadi referensi dalam pengembangan sistem Internet of Things (IoT) dan penerapan Machine Learning pada bidang pemantauan lingkungan.
4. Memberikan kontribusi akademik dalam pengembangan penelitian terkait sistem cerdas berbasis teknologi IoT dan analisis data lingkungan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Sistem Monitoring

Sistem monitoring merupakan suatu sistem yang dirancang untuk melakukan pemantauan terhadap kondisi suatu objek, proses, atau lingkungan secara berkelanjutan. Tujuan utama dari sistem monitoring adalah memperoleh data yang akurat dan terkini sehingga kondisi aktual dari objek yang dipantau dapat diketahui secara jelas. Monitoring dilakukan melalui proses pengamatan, pencatatan, dan penyajian data secara sistematis agar dapat digunakan sebagai dasar analisis dan pengambilan keputusan.

Dalam perkembangannya, sistem monitoring telah banyak diterapkan secara otomatis dengan bantuan teknologi digital sehingga mampu bekerja secara real-time maupun berkala. Penerapan sistem monitoring memungkinkan proses pengawasan dilakukan secara lebih efektif dibandingkan dengan metode manual karena data yang dihasilkan bersifat terukur dan terdokumentasi dengan baik. Hal ini menjadikan sistem monitoring sebagai komponen penting dalam berbagai bidang, khususnya pada pemantauan kondisi lingkungan (Pebralia et al., 2024).

2.2 Kualitas Udara

Kualitas udara merupakan kondisi udara di suatu wilayah yang ditentukan oleh kandungan zat pencemar di dalamnya. Udara dikatakan tercemar apabila mengandung satu atau lebih zat berbahaya dalam konsentrasi tertentu sehingga dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Menurut World Health Organization, polusi udara merupakan salah satu faktor

risiko utama penyebab penyakit pernapasan, kardiovaskular, serta kematian dini, khususnya di wilayah perkotaan (World Health Organization, 2021).

Di Indonesia, kualitas udara dinyatakan menggunakan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), yaitu suatu indeks yang menggambarkan tingkat pencemaran udara berdasarkan konsentrasi parameter pencemar tertentu. ISPU dihitung berdasarkan parameter utama seperti partikulat (PM₁₀ dan PM_{2.5}), karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen dioksida (NO₂), dan ozon (O₃). Kategori kualitas udara suatu wilayah ditentukan oleh nilai ISPU tertinggi dari parameter yang diukur (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, 2020)



Gambar 2.1 Standart ISPU (Indeks Standar Pencemaran Udara)

ISPU diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori, yaitu baik, sedang, tidak sehat, sangat tidak sehat, dan berbahaya, yang masing-masing menunjukkan tingkat risiko terhadap kesehatan manusia. Penggunaan ISPU bertujuan untuk memudahkan penyampaian informasi kualitas udara kepada masyarakat serta sebagai dasar pengambilan kebijakan dan peringatan dini terhadap dampak kesehatan akibat pencemaran udara (Kementerian Lingkungan Hidup dan

Kehutanan 2020). Oleh karena itu, ISPU digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini untuk menginterpretasikan hasil monitoring dan prediksi kualitas udara yang dihasilkan oleh sistem berbasis Internet of Things dan algoritma machine learning.

2.3 Sistem Monitoring Kualitas Udara

Sistem monitoring kualitas udara merupakan suatu sistem yang digunakan untuk memantau kondisi udara ambien secara berkelanjutan. Pemantauan dilakukan dengan tujuan memperoleh informasi mengenai kondisi kualitas udara pada suatu lingkungan sehingga perubahan yang terjadi dapat diketahui secara cepat. Dengan adanya sistem monitoring, proses pengawasan kualitas udara dapat dilakukan secara lebih sistematis dibandingkan dengan pengamatan manual.

Monitoring kualitas udara menjadi penting karena pencemaran udara dapat berdampak terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Oleh karena itu, sistem monitoring kualitas udara banyak digunakan sebagai sarana untuk mengetahui tingkat pencemaran udara dan sebagai dasar dalam evaluasi kondisi lingkungan (Pebralia et al., 2024).

Dalam perkembangannya, sistem monitoring kualitas udara telah diterapkan secara otomatis sehingga mampu bekerja secara real-time maupun berkala. Data yang diperoleh dari proses monitoring dicatat dan disajikan dalam bentuk informasi yang mudah dipahami, seperti tabel atau grafik, sehingga dapat digunakan untuk melihat pola perubahan kualitas udara dari waktu ke waktu. Penerapan sistem monitoring yang terstruktur juga membantu meningkatkan efektivitas pengawasan lingkungan (Hidayati, 2024).

Selain sebagai alat pemantauan, sistem monitoring kualitas udara berperan sebagai sarana pengumpulan data lingkungan yang berkelanjutan. Data yang

dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk analisis tingkat pencemaran udara, evaluasi kualitas lingkungan, serta sebagai bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan. Penerapan sistem monitoring kualitas udara juga dapat mendukung peningkatan kesadaran masyarakat terhadap pentingnya menjaga kualitas udara (Greenlab, 2024).

2.4 Internet Of Things

Internet of Things (IoT) merupakan konsep teknologi yang memungkinkan objek fisik dilengkapi sensor dan kemampuan komputasi untuk saling terhubung melalui jaringan internet. Melalui IoT, data dari lingkungan fisik dapat dikumpulkan dan diproses secara otomatis sehingga mendukung sistem pemantauan dan pengambilan keputusan berbasis data (Environesia, 2025). Konsep ini banyak diterapkan pada berbagai bidang, termasuk lingkungan, kesehatan, dan industri.

Dalam konteks pemantauan lingkungan, IoT berperan penting dalam menyediakan data secara real-time dan berkelanjutan. Sistem monitoring berbasis IoT memungkinkan pengumpulan data lingkungan tanpa keterbatasan jarak dan waktu, sehingga kondisi lingkungan dapat dipantau secara lebih fleksibel dibandingkan sistem konvensional (Hidayati, 2024). Pendekatan ini sangat relevan untuk pemantauan kualitas udara yang bersifat dinamis.

Penerapan IoT pada sistem kualitas udara juga memungkinkan integrasi antara perangkat sensor, mikrokontroler, dan platform pemantauan. Dengan integrasi tersebut, data kualitas udara dapat diakses oleh pengguna melalui antarmuka digital. Pada penelitian ini, IoT digunakan sebagai fondasi utama untuk

menghubungkan perangkat monitoring kualitas udara dengan sistem pengolahan dan analisis data.

2.5 Machine Learning

Machine learning merupakan cabang dari kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) yang memungkinkan sistem komputer mempelajari pola dari data dan menghasilkan prediksi atau keputusan tanpa harus diprogram secara eksplisit. Proses pembelajaran dilakukan dengan memanfaatkan data historis sehingga sistem mampu mengenali hubungan antar variabel dan melakukan generalisasi terhadap data baru (IBM, 2025).

Secara umum, machine learning diklasifikasikan ke dalam tiga pendekatan utama, yaitu *supervised learning*, *unsupervised learning*, dan *reinforcement learning*. *Supervised learning* merupakan pendekatan yang paling banyak digunakan dalam penelitian prediksi karena model dilatih menggunakan data berlabel untuk memetakan hubungan antara variabel input dan output. Pendekatan ini umum diterapkan pada permasalahan klasifikasi dan regresi, termasuk prediksi kualitas udara (Azizah et al., 2025)

Data kualitas udara memiliki karakteristik yang kompleks, bersifat non-linear, serta dipengaruhi oleh berbagai faktor lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan konsentrasi gas pencemar. Oleh karena itu, penggunaan machine learning menjadi relevan karena mampu menangani kompleksitas data tersebut dan menghasilkan prediksi yang lebih akurat dibandingkan metode konvensional (Sarker, 2021)

Dalam penelitian ini, machine learning digunakan untuk menganalisis data hasil monitoring kualitas udara yang diperoleh dari sensor berbasis Internet of

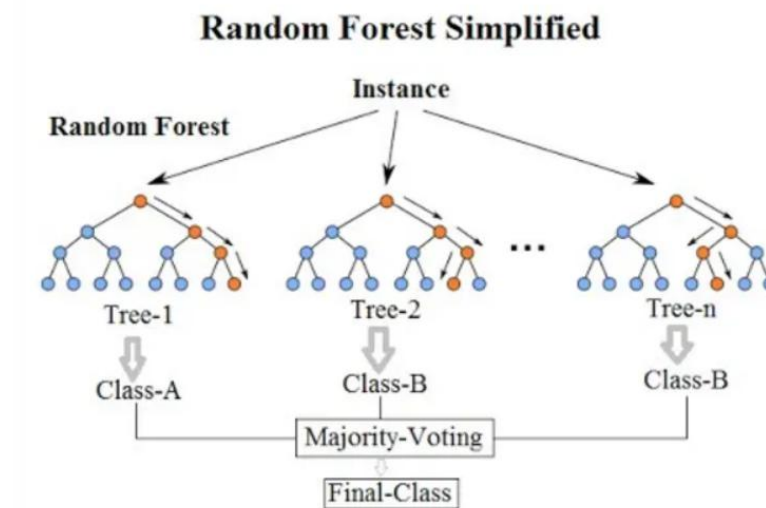
Things. Data tersebut digunakan sebagai dataset pelatihan dan pengujian untuk membangun model prediksi tingkat polusi udara, sehingga sistem tidak hanya bersifat monitoring, tetapi juga memiliki kemampuan prediktif sebagai bentuk peringatan dini.

2.6 Random Forest

Random Forest merupakan algoritma machine learning yang termasuk dalam metode ensemble learning, yaitu teknik pembelajaran yang menggabungkan sejumlah pohon keputusan (decision tree) untuk menghasilkan prediksi yang lebih akurat dan stabil. Algoritma ini banyak digunakan pada permasalahan klasifikasi maupun regresi karena kemampuannya dalam mengurangi risiko overfitting serta menangani data yang kompleks dan bersifat non-linear (Nugroho et al., 2024).

Prinsip kerja Random Forest didasarkan pada dua mekanisme utama, yaitu bootstrap sampling dan pemilihan fitur secara acak (random feature selection). Pada proses bootstrap sampling, data latih diambil secara acak dengan pengembalian untuk membangun setiap pohon keputusan, sehingga setiap pohon memiliki komposisi data yang berbeda. Selain itu, pada setiap proses pemisahan node, hanya sebagian fitur yang dipilih secara acak untuk menentukan pemisahan terbaik. Pendekatan ini menghasilkan kumpulan pohon keputusan yang beragam dan tidak saling bergantung, sehingga meningkatkan kemampuan generalisasi model (Hidayat et al., 2023)

Secara umum, tahapan kerja algoritma Random Forest dimulai dengan pembentukan beberapa subset data dari dataset utama menggunakan teknik bootstrap. Setiap subset data digunakan untuk membangun satu pohon keputusan tanpa dilakukan proses pemangkasan (pruning). Setelah seluruh pohon keputusan terbentuk, masing-masing pohon menghasilkan prediksi terhadap data masukan. Hasil prediksi tersebut kemudian digabungkan untuk memperoleh keputusan akhir, di mana pada permasalahan klasifikasi digunakan metode majority voting, sedangkan pada permasalahan regresi digunakan nilai rata-rata dari seluruh prediksi pohon keputusan.



Gambar 2.2 Ilustrasi Mekanisme Kerja Algoritma Random Forest

Random Forest memiliki beberapa keunggulan, antara lain mampu menangani data berdimensi tinggi, memiliki ketahanan terhadap noise, serta menghasilkan tingkat akurasi yang relatif tinggi dibandingkan metode pohon keputusan tunggal. Oleh karena itu, algoritma ini banyak diterapkan dalam prediksi kualitas udara yang melibatkan parameter lingkungan yang bersifat dinamis dan saling berhubungan (Firdaus, 2024).

Dalam penelitian ini, Random Forest digunakan sebagai landasan teori untuk mendukung sistem prediksi kualitas udara berbasis Internet of Things. Algoritma ini dinilai sesuai karena mampu memodelkan hubungan kompleks antara parameter lingkungan, seperti suhu, kelembapan, dan konsentrasi gas pencemar, dalam menentukan tingkat kualitas udara.

2.7 Perangkat Keras (Hardware)

Perangkat keras (*hardware*) merupakan bagian fundamental dalam perancangan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things. Perangkat keras berfungsi sebagai media akuisisi data lingkungan, pemrosesan awal data, serta penghubung antara kondisi fisik lingkungan dan sistem digital. Pemilihan komponen hardware pada penelitian ini disesuaikan dengan kebutuhan sistem monitoring yang bersifat real-time, berkelanjutan, dan mendukung pembentukan dataset untuk analisis machine learning.

Sistem hardware yang dirancang terdiri dari mikrokontroler sebagai pusat kendali, beberapa sensor lingkungan sebagai perangkat input, serta modul pendukung untuk penyimpanan dan konektivitas data.

3.7.1 Mikrokontroler ESP 32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems dan banyak digunakan dalam pengembangan sistem Internet of Things. ESP32 dilengkapi dengan prosesor dual-core 32-bit, modul WiFi dan Bluetooth terintegrasi, serta mendukung berbagai antarmuka komunikasi seperti GPIO, ADC, I2C, dan SPI.

Keunggulan utama ESP32 terletak pada kemampuannya mengintegrasikan proses komputasi, komunikasi data, dan pengolahan sensor dalam satu perangkat. Hal ini menjadikan ESP32 sangat sesuai digunakan pada sistem monitoring kualitas udara yang membutuhkan pengambilan data secara kontinu dan pengiriman data secara real-time (Arduino Indonesia, 2024).



Gambar 2.3 Mikrokontroler ESP32

Dalam penelitian ini, ESP32 berfungsi sebagai pusat kendali utama yang menerima data dari sensor DHT22, MQ-135, dan MQ-7. Data tersebut kemudian diolah, disimpan pada media penyimpanan lokal, serta digunakan sebagai input untuk pembentukan dataset prediksi kualitas udara. Penelitian oleh Nugroho dan Wijaya (2023) menunjukkan bahwa ESP32 memiliki stabilitas komunikasi yang baik dan mampu menangani pemrosesan data lingkungan secara efisien.

3.7.2 Sensor DHT22

Sensor DHT22 merupakan sensor digital yang digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban udara dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan sensor DHT11. Sensor ini bekerja dengan prinsip pengukuran kelembaban berbasis kapasitif dan pengukuran suhu menggunakan thermistor presisi, kemudian

mengonversi hasil pengukuran tersebut menjadi data digital yang dapat langsung dibaca oleh mikrokontroler (Waveshare, 2021).

Sensor DHT22 memiliki rentang pengukuran suhu antara $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ serta rentang kelembaban $0\text{--}100\text{ \%RH}$ dengan tingkat akurasi yang relatif baik. Karakteristik tersebut menjadikan sensor DHT22 mampu menghasilkan data lingkungan yang lebih stabil dan representatif dibandingkan sensor dengan spesifikasi lebih rendah (Digiware Store, 2025).

Dalam sistem monitoring kualitas udara, suhu dan kelembaban merupakan parameter lingkungan yang berpengaruh terhadap konsentrasi, dispersi, dan pergerakan polutan udara di atmosfer. Selain itu, kondisi suhu dan kelembaban juga dapat memengaruhi sensitivitas sensor gas seperti MQ-135 dan MQ-7. Oleh karena itu, data suhu dan kelembaban dari sensor DHT22 digunakan sebagai variabel pendukung dalam analisis kualitas udara serta sebagai fitur input pada proses pembelajaran machine learning.



Gambar 2.4 Sensor DHT 22

Pada penelitian ini, sensor DHT22 digunakan untuk memperoleh data kondisi lingkungan sekitar yang kemudian dikombinasikan dengan data gas polutan untuk membentuk pola prediksi kualitas udara menggunakan algoritma Random Forest.

Meskipun sensor DHT11 dan DHT22 memiliki fungsi yang sama, yaitu mengukur suhu dan kelembaban udara, keduanya memiliki perbedaan karakteristik teknis yang memengaruhi tingkat akurasi dan rentang pengukuran. Perbedaan tersebut perlu dipahami untuk menentukan sensor yang paling sesuai dengan kebutuhan sistem monitoring kualitas udara. Oleh karena itu, perbandingan antara sensor DHT11 dan DHT22 disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan Sensor DHT11 Dan DHT22

Parameter	DHT11	DHT22
Rentang Suhu	0 – 50 °C	-40 – 80 °C
Akurasi Suhu	±2 °C	±0,5 °C
Rentang Kelembapan	20 – 90 %	0 – 100 %
Akurasi Kelembapan	±5 %	±2-3 %
Resolusi Data	Rendah	Tinggi
Interval Pembacaan	±1 Detik	±2 Detik
Konsumsi Daya	Rendah	Sedang
Harga	Lebih Murah	Lebih Mahal

Berdasarkan Tabel 2.1, sensor DHT22 memiliki keunggulan dari sisi rentang pengukuran dan tingkat akurasi dibandingkan sensor DHT11. Hal ini menyebabkan DHT22 lebih sesuai digunakan pada sistem monitoring kualitas udara yang membutuhkan data lingkungan yang lebih presisi sebagai pendukung analisis dan pemodelan machine learning (Waveshare, 2021).

3.7.3 Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 merupakan sensor gas yang digunakan untuk mendeteksi berbagai jenis gas pencemar seperti amonia (NH₃), nitrogen oksida (NO_x), benzena,

alkohol, dan karbon dioksida (CO₂). Sensor ini bekerja berdasarkan perubahan resistansi material semikonduktor ketika terpapar gas tertentu.

Sensor MQ-135 banyak digunakan dalam sistem monitoring kualitas udara karena mampu mendeteksi gas polutan umum yang sering ditemukan di lingkungan perkotaan. Sensor ini efektif digunakan dalam sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT untuk mendeteksi perubahan konsentrasi gas pencemar secara relatif (Rafilla et al., 2025).



Gambar 2.6 Sensor MQ 135

Dalam penelitian ini, sensor MQ-135 digunakan sebagai indikator utama tingkat pencemaran udara secara umum. Data yang dihasilkan oleh sensor ini menjadi salah satu parameter penting dalam proses analisis dan prediksi tingkat polusi udara menggunakan algoritma Random Forest.

3.7.4 Sensor MQ-7

Sensor MQ-7 merupakan sensor gas yang dirancang khusus untuk mendeteksi karbon monoksida (CO). Karbon monoksida merupakan gas beracun yang tidak berwarna dan tidak berbau, sehingga keberadaannya sulit dideteksi secara langsung oleh manusia.

Sensor MQ-7 bekerja dengan siklus pemanasan tertentu (5V/1.4V) untuk meningkatkan sensitivitas terhadap gas CO. Dalam konteks kualitas udara, karbon monoksida menjadi indikator penting karena gas ini banyak dihasilkan dari aktivitas transportasi dan pembakaran bahan bakar fosil. Sensor MQ-7 memiliki sensitivitas yang baik dalam mendeteksi gas CO dan cocok digunakan pada sistem monitoring udara berbasis mikrokontroler (Jogja Robotika, 2025).



Gambar 2.7 Sensor MQ7

Pada penelitian ini, sensor MQ-7 digunakan untuk memantau konsentrasi karbon monoksida sebagai parameter spesifik polusi udara, yang selanjutnya digunakan dalam proses prediksi kualitas udara.

3.7.5 Module MicroSD

Modul MicroSD digunakan sebagai media penyimpanan data hasil pembacaan sensor secara lokal pada sistem monitoring kualitas udara. Penyimpanan data secara lokal sangat penting dalam sistem Internet of Things untuk menjaga keberlangsungan pencatatan data, khususnya ketika terjadi gangguan koneksi jaringan internet. Data yang disimpan meliputi hasil pembacaan sensor suhu, kelembaban, serta konsentrasi gas pencemar yang diambil secara berkala.



Gambar 2.8 Module MicroSD

Dalam penelitian ini, modul MicroSD juga berfungsi sebagai mekanisme cadangan (*data backup*) ketika koneksi WiFi pada mikrokontroler ESP32 tidak tersedia atau mengalami gangguan. Pada kondisi tersebut, data hasil monitoring kualitas udara tetap disimpan ke dalam MicroSD sehingga tidak terjadi kehilangan data (*data loss*). Setelah koneksi WiFi kembali terhubung, sistem secara otomatis akan mengirimkan data yang tersimpan di MicroSD ke *cloud server* untuk proses penyimpanan dan analisis lebih lanjut.

Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan *reliability* sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT, terutama pada lingkungan dengan kestabilan jaringan yang tidak menentu. Penggunaan penyimpanan lokal sebagai cadangan dalam sistem IoT dapat meningkatkan kontinuitas data dan mendukung pembentukan dataset yang lebih lengkap untuk analisis machine learning (Hafis, 2023).

Dengan adanya mekanisme penyimpanan lokal dan pengiriman otomatis ke cloud, sistem yang dikembangkan tidak hanya mampu melakukan monitoring secara real-time, tetapi juga memastikan bahwa seluruh data kualitas udara tetap terdokumentasi dengan baik dan dapat digunakan dalam proses pelatihan serta evaluasi model prediksi kualitas udara.

3.7.6 LCD I2C

Liquid Crystal Display (LCD) merupakan perangkat output yang digunakan untuk menampilkan informasi dalam bentuk karakter, angka, maupun simbol tertentu. LCD banyak digunakan pada sistem embedded dan Internet of Things (IoT) karena konsumsi daya yang rendah, ukuran yang relatif kecil, serta kemudahan integrasi dengan mikrokontroler. Salah satu jenis LCD yang umum digunakan adalah LCD karakter 16×2 yang mampu menampilkan 16 karakter dalam dua baris tampilan.

Pada implementasi konvensional, LCD dihubungkan menggunakan mode paralel yang membutuhkan banyak pin input/output. Untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pin, LCD dapat dikombinasikan dengan antarmuka I2C (Inter-Integrated Circuit). I2C merupakan protokol komunikasi serial sinkron yang hanya menggunakan dua jalur komunikasi utama, yaitu SDA (Serial Data) dan SCL (Serial Clock), sehingga sangat sesuai untuk sistem dengan keterbatasan pin.



Gambar 2.9 LCD I2C

LCD I2C umumnya dilengkapi dengan modul tambahan berbasis IC PCF8574 yang berfungsi sebagai ekspander input/output. Modul ini mengubah komunikasi paralel LCD menjadi komunikasi serial I2C, sehingga mikrokontroler

seperti ESP32 dapat mengendalikan LCD dengan lebih sederhana. Penggunaan LCD I2C sangat mendukung sistem monitoring berbasis IoT karena mampu menampilkan data sensor secara real-time dengan konfigurasi rangkaian yang minimal.

3.7.7 RTC

Real Time Clock (RTC) merupakan modul yang digunakan untuk menyediakan informasi waktu secara akurat pada sistem *embedded*. RTC mampu menyimpan data waktu dan tanggal secara kontinu meskipun sistem dalam keadaan mati karena dilengkapi dengan baterai cadangan.

Dalam sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT), RTC berfungsi sebagai pemberi penanda waktu *timestamp* pada setiap data hasil pembacaan sensor. Dengan adanya *timestamp*, data dapat disusun secara kronologis sehingga memudahkan dalam proses analisis serta pembentukan dataset untuk kebutuhan machine learning (Warstek, 2024).

3.7.8 BreadBoard

Breadboard merupakan papan prototyping elektronik yang digunakan untuk merangkai dan menguji rangkaian tanpa memerlukan proses penyolderan. Breadboard memiliki jalur koneksi internal yang memungkinkan komponen elektronik dihubungkan satu sama lain melalui lubang-lubang yang tersusun secara sistematis.

Penggunaan breadboard sangat umum pada tahap perancangan awal sistem elektronik karena memberikan fleksibilitas tinggi dalam melakukan modifikasi rangkaian. Komponen dapat dilepas dan dipasang kembali dengan mudah tanpa

merusak perangkat yang digunakan. Oleh karena itu, breadboard banyak dimanfaatkan dalam pengembangan sistem mikrokontroler, sensor, dan modul tampilan sebelum direalisasikan ke dalam bentuk PCB permanen (KMTech, 2025).

Dalam sistem IoT, breadboard berfungsi sebagai media perakitan sementara yang mendukung proses pengujian sensor, modul LCD I2C, dan sistem catu daya secara menyeluruh.



Gambar 2.10 BreadBoard

3.7.9 Kabel Jumper

Kabel jumper merupakan kabel penghantar listrik yang digunakan untuk menghubungkan antar komponen elektronik pada breadboard maupun antara modul dan mikrokontroler. Kabel jumper tersedia dalam beberapa jenis konektor, yaitu male-to-male, male-to-female, dan female-to-female.

Dalam tahap prototyping, kabel jumper memegang peranan penting karena memungkinkan hubungan listrik dilakukan tanpa penyolderan. Penggunaan kabel jumper mempermudah perakitan dan pengujian rangkaian, khususnya pada sistem embedded dan IoT yang melibatkan banyak sensor dan modul tambahan.

2.8 Web Server

Web server adalah perangkat lunak atau sistem komputer yang bertindak sebagai perantara antara klien dan layanan berbasis jaringan, bertanggung jawab atas penerimaan permintaan HTTP/HTTPS dan mengirimkan data atau layanan yang diminta oleh klien (Nusabot, 2024). Dalam sistem Internet of Things (IoT), web server memainkan peran penting sebagai pusat penampungan dan penyajian data dari perangkat cerdas yang terhubung.

Arsitektur web server dalam konteks IoT mengikuti model **client-server** di mana ESP32 bertindak sebagai klien yang mengirim data sensor, sedangkan server menerima, memproses, dan menyajikan data tersebut kepada pengguna akhir. Implementasi dapat dilakukan pada server lokal atau layanan cloud tergantung volume data dan kebutuhan aplikasi (Server.co.id, 2025).

2.9 Arduino IDE

Arduino Integrated Development Environment (IDE) merupakan lingkungan pengembangan perangkat lunak yang digunakan untuk memprogram mikrokontroler berbasis Arduino serta perangkat *embedded* lain yang kompatibel. Arduino IDE menyediakan antarmuka grafis sederhana dan dukungan bahasa pemrograman berbasis C/C++ yang telah dimodifikasi untuk memudahkan proses penulisan dan unggah kode (Santoso et al., 2024).

Dalam pengembangan sistem IoT, Arduino IDE digunakan untuk membuat program yang membaca data dari sensor DHT22, MQ-135, MQ-7, melakukan pemrosesan awal, dan mengirimkannya ke web server melalui protokol HTTP. Arduino IDE juga dilengkapi dengan Serial Monitor yang berfungsi untuk memantau data real-time selama pengembangan dan pengujian perangkat.

Keunggulan utama Arduino IDE adalah kemudahan penggunaan, dukungan pustaka (library) yang luas, serta komunitas pengguna besar (Arduino Indonesia, 2024).



Gambar 2.13 Arduino IDE

2.10 Visual Studio Code

Visual Studio Code merupakan perangkat lunak yang digunakan dalam pengembangan aplikasi, termasuk sistem berbasis web dan pengolahan data. Editor ini mendukung berbagai bahasa pemrograman seperti HTML, CSS, JavaScript, Python, PHP, serta menyediakan fitur debugging, IntelliSense, manajemen kode, dan integrasi Git yang memudahkan proses pengembangan.

Dalam penelitian ini, Visual Studio Code digunakan sebagai alat bantu dalam pengembangan sistem monitoring kualitas udara, baik pada sisi backend (API web server), frontend dashboard, maupun pengolahan dataset machine learning. Fitur Live Server memungkinkan preview real-time dashboard, sementara ekstensi Python mendukung preprocessing data untuk model Random Forest.

2.11 Draw.io

Draw.io (juga dikenal sebagai diagrams.net) adalah aplikasi berbasis web yang digunakan untuk membuat berbagai jenis diagram seperti *flowchart*, diagram sistem, skema jaringan, dan alur data. Draw.io menjadi alat bantu visualisasi penting dalam perancangan dan dokumentasi sistem karena antarmukanya yang intuitif, fleksibel, dan tidak memerlukan instalasi perangkat lunak tambahan.

Penggunaan diagram dalam perancangan sistem bertujuan untuk mempermudah pemahaman struktur kerja sistem dan hubungan antar komponen. Visualisasi yang baik dapat membantu pembaca atau pengembang lain memahami proses data mulai dari pengambilan oleh sensor ESP32 hingga penyimpanan MicroSD dan penyajian pada dashboard web. Diagram yang dibuat dengan Draw.io dapat diekspor ke format PNG, SVG, dan PDF sehingga mudah diintegrasikan ke dalam laporan atau skripsi.



Gambar 2.14 Draw IO

2.12 Figma

Figma merupakan aplikasi berbasis web yang digunakan untuk merancang desain antarmuka pengguna (UI/UX). Figma memungkinkan pembuatan desain

sistem secara visual sebelum diimplementasikan ke dalam bentuk aplikasi atau website.

Dalam penelitian ini, Figma digunakan untuk merancang tampilan dashboard monitoring kualitas udara, termasuk visualisasi data sensor (suhu, kelembaban, CO, CO₂), grafik historis AQI, serta hasil prediksi Random Forest. Perancangan antarmuka yang baik dapat meningkatkan kemudahan penggunaan sistem serta pengalaman pengguna secara keseluruhan.



Gambar 2.15 Figma

2.13 Prinsip Kerja Sistem Monitoring Kualitas Udara

Sistem monitoring kualitas udara merupakan suatu mekanisme pemantauan kondisi lingkungan yang dilakukan secara berkelanjutan dengan memanfaatkan sensor, perangkat pemrosesan, serta media komunikasi data. Prinsip kerja sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) bertumpu pada kemampuan perangkat untuk melakukan pengukuran parameter lingkungan, mengolah data hasil pengukuran, serta menyajikan informasi kondisi udara secara real-time (Pratiwi et al., 2024)

Proses monitoring dimulai dari pengambilan data kualitas udara menggunakan sensor lingkungan. Sensor suhu dan kelembaban digunakan untuk menggambarkan kondisi fisik udara, sedangkan sensor gas berfungsi untuk

mendeteksi keberadaan zat pencemar. Data yang dihasilkan oleh sensor merupakan representasi kondisi udara pada waktu tertentu dan bersifat kontinu.

Data sensor yang diperoleh kemudian diproses oleh mikrokontroler sebagai pusat kendali sistem. Pemrosesan ini meliputi konversi sinyal sensor menjadi data digital, penggabungan beberapa parameter lingkungan, serta pemberian penanda waktu. Mikrokontroler berperan penting dalam memastikan data yang dihasilkan bersifat terstruktur dan siap disimpan maupun dikirimkan (Wijaya & Nugroho, 2023)

Selanjutnya, data kualitas udara disimpan ke dalam media penyimpanan lokal maupun dikirimkan ke sistem penyimpanan terpusat melalui jaringan internet. Penyimpanan data memungkinkan terbentuknya arsip data historis kualitas udara yang dapat digunakan untuk keperluan monitoring jangka panjang. Informasi kualitas udara yang telah diproses kemudian ditampilkan kepada pengguna melalui antarmuka visual, baik berupa tampilan lokal maupun berbasis web. Sistem monitoring kualitas udara dengan prinsip kerja tersebut mampu memberikan gambaran kondisi udara secara aktual dan terdokumentasi (Hidayat & Santoso, 2025).

Prinsip kerja sistem monitoring berbasis IoT melibatkan proses akuisisi data dari sensor, pengolahan data oleh mikrokontroler, serta pengiriman data ke server untuk ditampilkan kepada pengguna. Integrasi antar komponen tersebut memungkinkan sistem bekerja secara real-time dan berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan penelitian (Dewi & Syahra, 2025), yang menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis IoT mampu mengelola data lingkungan secara terstruktur dan memberikan informasi secara cepat kepada pengguna.

2.14 Prinsip Kerja Prediksi Kualitas Udara

Sistem prediksi polusi udara merupakan pengembangan lanjutan dari sistem monitoring kualitas udara yang memanfaatkan data historis sebagai dasar analisis. Prinsip kerja sistem prediksi polusi udara didasarkan pada pendekatan machine learning, yaitu kemampuan sistem untuk mempelajari pola hubungan antara parameter lingkungan dan tingkat polusi udara berdasarkan data yang telah dikumpulkan sebelumnya (Wulandari et al., 2024).

Data historis kualitas udara yang dihasilkan dari sistem monitoring digunakan sebagai masukan (input) dalam proses pembelajaran model prediksi. Data tersebut mencakup berbagai parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, CO, CO₂ dari sensor DHT22, MQ-135, MQ-7. Sebelum digunakan dalam proses pembelajaran, data melalui tahap pra-pemrosesan untuk memastikan konsistensi dan kualitas data, sehingga pola yang dipelajari oleh model dapat merepresentasikan kondisi lingkungan secara lebih akurat (Hafis, 2023).

Algoritma Random Forest bekerja dengan membangun sejumlah pohon keputusan yang masing-masing dilatih menggunakan subset data yang dipilih secara acak. Setiap pohon keputusan menghasilkan prediksi berdasarkan pola data yang dipelajari. Hasil prediksi dari seluruh pohon keputusan kemudian digabungkan untuk menghasilkan prediksi akhir. Pendekatan ensemble learning ini memungkinkan sistem prediksi memiliki tingkat kestabilan dan akurasi yang lebih baik dibandingkan metode pohon keputusan tunggal.

Hasil dari proses prediksi berupa estimasi tingkat polusi udara atau kategori kualitas udara AQI. Informasi prediksi ini memberikan gambaran kecenderungan kondisi kualitas udara di masa mendatang dan dapat digunakan sebagai dasar

peringatan dini terhadap potensi pencemaran udara. Dengan demikian, prinsip kerja sistem prediksi polusi udara bersifat komplementer terhadap sistem monitoring, dimana monitoring menyediakan data aktual, sedangkan prediksi memberikan analisis berbasis pola data historis.

2.15 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan untuk mengetahui perkembangan penelitian terkait sistem monitoring dan prediksi kualitas udara serta untuk menentukan posisi penelitian yang dilakukan. Ringkasan penelitian terdahulu yang relevan disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Ringkasan Penelitian Terdahulu

NO	Judul dan peneliti	Pembahasan	Metode	Kelebihan atau Kekurangan
1	Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis IoT Pebralia et al. (2024)	Pengembangan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT untuk pemantauan kondisi udara secara real-time menggunakan sensor gas dan mikrokontroler	Internet of Things (IoT)	Sistem mampu memantau kualitas udara secara real-time dan kontinu, namun belum dilengkapi dengan kemampuan prediksi kualitas udara

NO	Judul dan peneliti	Pembahasan	Metode	Kelebihan atau Kekurangan
2	Monitoring Kualitas Udara IoT + Cloud Hafis (2023)	Implementasi sistem monitoring kualitas udara dengan penyimpanan data MicroSD dan cloud server	IoT dan cloud computing	Data kualitas udara tersimpan dan dapat diakses secara jarak jauh, namun data belum dimanfaatkan untuk analisis prediktif berbasis machine learning
3	Implementasi ESP32 Monitoring Lingkungan Nugroho & Wijaya (2023)	Pemanfaatan ESP32 dalam akuisisi data sensor DHT22, MQ-135, MQ-7 lingkungan	ESP32 dan Sensor	ESP32 terbukti stabil dan efisien dalam pengolahan data sensor, namun sistem belum terintegrasi dengan model

NO	Judul dan peneliti	Pembahasan	Metode	Kelebihan atau Kekurangan
				prediksi kualitas udara
4	Prediksi Kualitas Udara Random Forest Yuhandri (2025)	Algoritma Random Forest untuk prediksi kualitas udara berbasis data historis	<i>Random Forest</i>	Model memiliki tingkat akurasi yang tinggi dan mampu menangani data non-linear, namun menggunakan dataset sekunder dan tidak terintegrasi dengan sistem IoT
5	Sistem Monitoring dan Prediksi Kualitas Udara Berbasis IoT	Integrasi sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT dengan algoritma machine learning untuk melakukan analisis dan prediksi	IoT dan Random Forest	Mampu melakukan monitoring dan prediksi kualitas udara secara terintegrasi dengan tingkat

NO	Judul dan peneliti	Pembahasan	Metode	Kelebihan atau Kekurangan
	dan Machine Learning Rahman et al. (2024)	kondisi kualitas udara secara real-time.		akurasi yang baik, namun membutuhkan dataset yang cukup besar untuk menghasilkan model yang optimal.

2.16 Analisis GAP

Berdasarkan ringkasan penelitian terdahulu pada Tabel 2.2, dapat diketahui bahwa pengembangan sistem monitoring kualitas udara dan sistem prediksi kualitas udara masih belum terintegrasi secara menyeluruh. Penelitian Pebralia (2024) dan Hafis (2023) menunjukkan bahwa sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) telah mampu melakukan pemantauan kondisi udara secara real-time serta penyimpanan data MicroSD. Namun, sistem tersebut belum memanfaatkan data hasil monitoring untuk melakukan prediksi kualitas udara.

Penelitian oleh Nugroho & Wijaya (2023) menekankan pada pemanfaatan mikrokontroler ESP32 dalam pengolahan data sensor lingkungan DHT22, MQ-135, MQ-7 dan menunjukkan kinerja perangkat yang baik. Akan tetapi, penelitian tersebut belum mengintegrasikan algoritma machine learning sebagai metode

prediksi kualitas udara. Di sisi lain, penelitian Yuhandri (2025) membuktikan bahwa algoritma Random Forest memiliki tingkat akurasi tinggi dalam prediksi kualitas udara, namun menggunakan dataset sekunder dan tidak terhubung langsung dengan sistem monitoring berbasis IoT.

Selanjutnya, penelitian Rahman et al. (2024) telah menggabungkan sistem monitoring berbasis IoT dengan analisis data berbasis machine learning, namun implementasi algoritma yang digunakan masih terbatas dan belum memanfaatkan metode ensemble learning secara optimal.

Oleh karena itu, penelitian ini dikembangkan untuk mengintegrasikan sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT dengan algoritma Random Forest dalam satu sistem yang terpadu. Penelitian ini menggunakan data primer dari sensor lingkungan ESP32 + MicroSD + RTC sebagai cadangan, sehingga diharapkan mampu menghasilkan sistem monitoring dan prediksi kualitas udara yang lebih komprehensif dengan akurasi 95.91%.

BAB III

METEDOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimental dengan pendekatan rekayasa sistem (engineering research). Penelitian ini berfokus pada perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan algoritma Random Forest untuk memprediksi tingkat polusi udara.

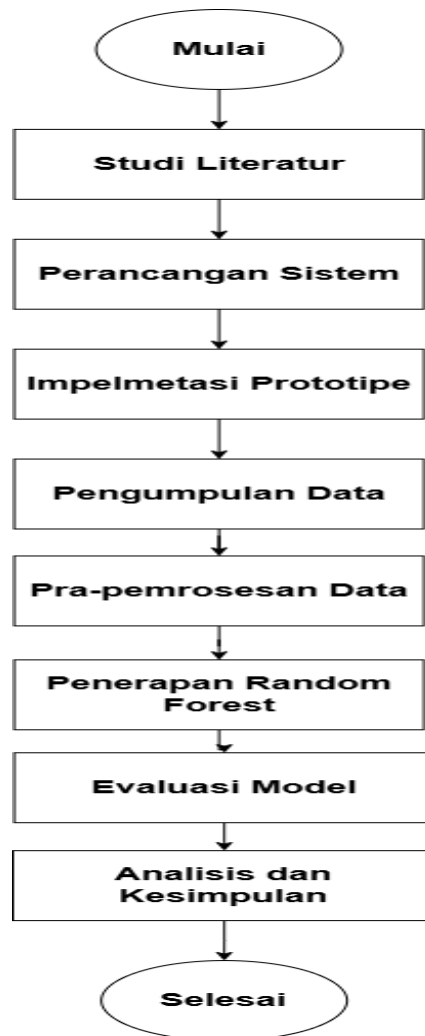
Pendekatan eksperimental digunakan karena penelitian ini melibatkan pembuatan prototipe sistem, pengujian fungsional perangkat keras dan perangkat lunak, serta evaluasi kinerja model machine learning berdasarkan data hasil pengukuran sensor. Proses penelitian mencakup dua komponen utama, yaitu:

1. Monitoring kualitas udara, yang bertujuan untuk memperoleh data lingkungan secara real-time menggunakan sensor suhu, kelembaban, dan gas pencemar.
2. Prediksi kualitas udara, yang bertujuan untuk menganalisis data historis hasil monitoring menggunakan algoritma Random Forest guna menentukan kategori kualitas udara berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU).

3.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian menjelaskan tahapan pelaksanaan penelitian secara sistematis dan terstruktur, mulai dari tahap persiapan hingga tahap analisis dan penarikan kesimpulan. Prosedur ini disusun untuk memastikan bahwa penelitian

berjalan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan serta menghasilkan data dan analisis yang valid.



Gambar 3.1 Alur Penelitian

Pada Gambar 3.1 menggambarkan tahapan prosedur penelitian yang dilakukan secara sistematis dan berurutan. Proses penelitian diawali dengan tahap studi literatur untuk memperoleh dasar teori dan referensi ilmiah yang relevan dengan sistem monitoring kualitas udara, Internet of Things (IoT), serta algoritma Random Forest. Tahap ini menjadi landasan dalam menentukan metode dan pendekatan penelitian yang digunakan.

Tahap selanjutnya adalah perancangan sistem, yang meliputi perancangan perangkat keras dan perangkat lunak sesuai dengan kebutuhan sistem monitoring kualitas udara. Setelah perancangan selesai, dilakukan perakitan dan implementasi prototipe sistem, diikuti dengan pengujian fungsional untuk memastikan seluruh komponen bekerja dengan baik.

Setelah sistem berfungsi secara optimal, dilakukan pengumpulan data kualitas udara menggunakan sensor yang telah terpasang. Data hasil monitoring kemudian melalui tahap pra-pemrosesan, yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas data sebelum digunakan dalam proses pembelajaran machine learning.

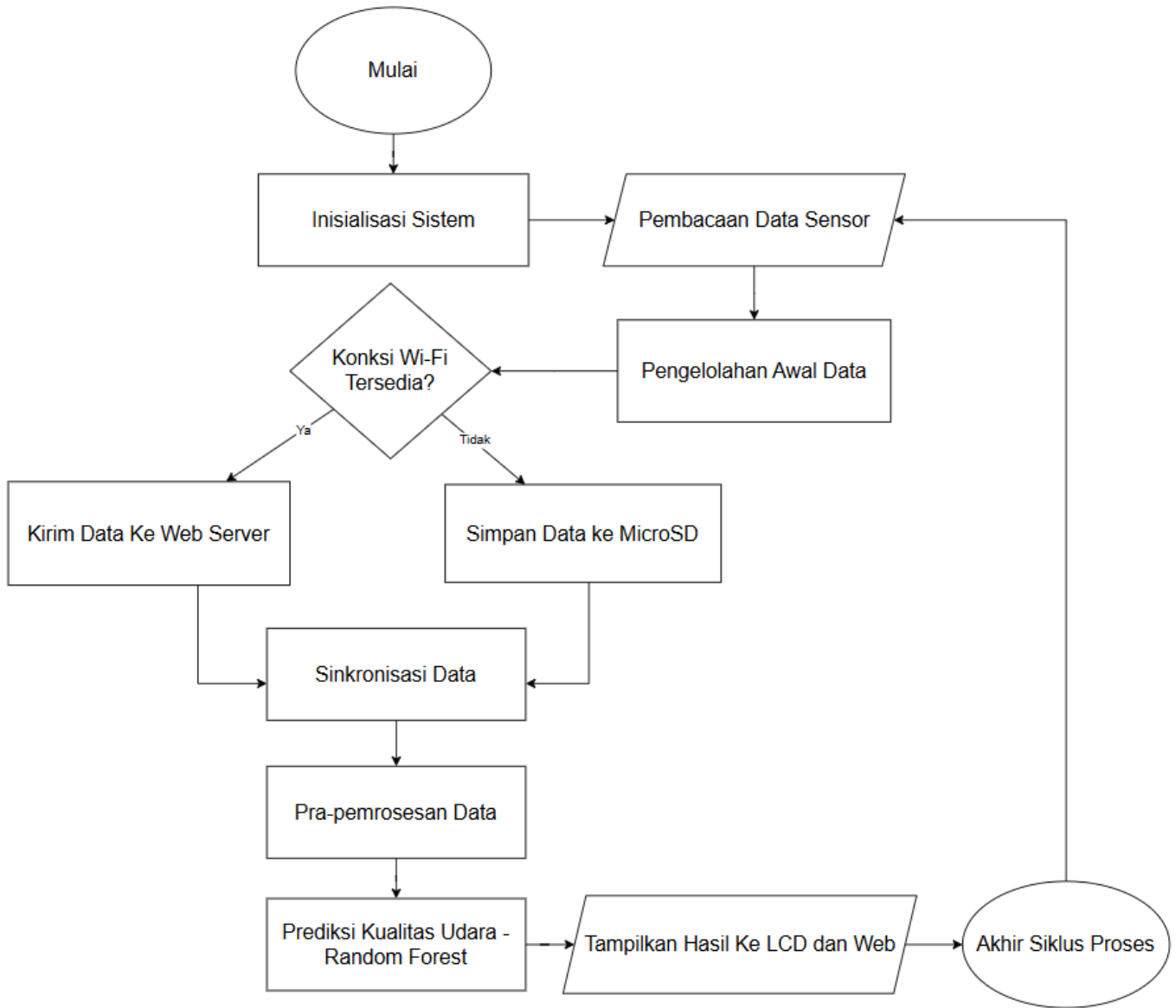
Data yang telah dipra-pemrosesan selanjutnya digunakan pada tahap penerapan algoritma Random Forest untuk membangun model prediksi kualitas udara. Model yang terbentuk kemudian diuji dan dievaluasi untuk mengetahui tingkat kinerja dan akurasi prediksi yang dihasilkan. Tahap akhir penelitian adalah analisis hasil dan penarikan kesimpulan, yang merangkum capaian penelitian serta memberikan gambaran hasil yang diperoleh.

3.3 Alur Sistem

Alur sistem menggambarkan tahapan kerja sistem monitoring dan prediksi kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang terintegrasi dengan algoritma Random Forest. Alur ini menjelaskan proses mulai dari pengambilan data sensor hingga penyajian hasil monitoring dan prediksi kualitas udara kepada pengguna.

Untuk mempermudah pemahaman cara kerja sistem yang dikembangkan, diperlukan gambaran alur sistem yang menjelaskan tahapan proses dan hubungan antar komponen. Alur sistem ini menunjukkan proses pengambilan data kualitas

udara dari sensor, pengolahan oleh mikrokontroler, penyimpanan data, hingga penyajian hasil monitoring dan prediksi kepada pengguna.



Gambar 3.2 Alur Sistem

1. Inisialisasi Sistem

Proses sistem diawali dengan inisialisasi seluruh komponen, meliputi mikrokontroler ESP32, sensor DHT22, sensor MQ-135, sensor MQ-7, modul MicroSD, RTC, LCD I2C, serta koneksi jaringan Wi-Fi. Tahap ini bertujuan untuk

memastikan seluruh perangkat berada dalam kondisi siap beroperasi sebelum proses pengambilan data dilakukan.

2. Pembacaan Data Sensor

Setelah sistem berhasil diinisialisasi, ESP32 melakukan pembacaan data dari seluruh sensor, yaitu:

1. Sensor DHT22 untuk memperoleh data suhu dan kelembaban udara
2. Sensor MQ-135 untuk mendeteksi gas polutan udara secara umum
3. Sensor MQ-7 untuk mendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida (CO)

Data yang diperoleh merupakan kondisi kualitas udara pada waktu tertentu.

3. Pengolahan Awal Data

Data sensor yang diperoleh kemudian diproses oleh ESP32. Proses ini meliputi:

1. Konversi data sensor menjadi format digital
2. Penggabungan seluruh parameter lingkungan
3. Penambahan informasi waktu (timestamp) dari RTC

Tahap ini bertujuan agar data tersusun secara terstruktur dan siap disimpan maupun dikirimkan.

4. Penyimpanan Data

Sistem melakukan pengecekan ketersediaan koneksi jaringan:

1. Jika koneksi Wi-Fi tersedia, data hasil monitoring dikirimkan ke web server dan disimpan ke dalam database
2. Jika koneksi Wi-Fi tidak tersedia, data disimpan sementara ke dalam modul MicroSD sebagai penyimpanan lokal

Mekanisme ini bertujuan untuk mencegah kehilangan data (data loss) akibat gangguan jaringan.

5. Sinkronisasi Data

Ketika koneksi jaringan kembali tersedia, sistem secara otomatis melakukan sinkronisasi data yang tersimpan di MicroSD ke web server sehingga seluruh data historis tetap tercatat secara lengkap.

6. Pra-pemrosesan Data

Data yang telah terkumpul selanjutnya melalui tahap pra-pemrosesan, yang meliputi:

1. Penanganan data kosong atau tidak valid
2. Penyesuaian format data
3. Normalisasi data jika diperlukan

Tahap ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas data sebelum digunakan dalam proses prediksi.

7. Prediksi Kualitas Udara dengan Random Forest

Data hasil pra-pemrosesan digunakan sebagai input algoritma Random Forest. Algoritma ini melakukan proses klasifikasi untuk menentukan kategori kualitas udara berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU), yaitu:

1. Baik
2. Sedang
3. Tidak Sehat
4. Sangat Tidak Sehat
5. Berbahaya

Hasil prediksi diperoleh berdasarkan mayoritas keputusan dari pohon-pohon keputusan pada model Random Forest.

8. Penyajian Informasi

Hasil monitoring dan prediksi kualitas udara kemudian ditampilkan melalui dua media, yaitu:

1. LCD I2C, untuk menampilkan informasi secara lokal dan real-time
2. Antarmuka web, untuk menampilkan data monitoring, data historis, serta hasil prediksi dalam bentuk tabel dan grafik

9. Akhir Siklus Proses

Setelah seluruh tahapan selesai, sistem tidak berhenti, melainkan kembali ke tahap pembacaan data sensor untuk menjalankan siklus monitoring dan prediksi secara berulang dan berkelanjutan.

3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian digunakan untuk menjelaskan hubungan antara data input dan output dalam sistem monitoring dan prediksi kualitas udara. Variabel yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari variabel independen dan variabel dependen sebagai berikut:

3.4.1 Variabel Independen (Input)

Variabel independen merupakan variabel yang berperan sebagai variabel masukan (input) dalam sistem prediksi dan diduga memengaruhi hasil prediksi kualitas udara. Variabel independen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Suhu udara (°C)

Suhu udara merupakan parameter lingkungan yang diukur menggunakan sensor DHT22 dan menggambarkan kondisi termal udara di lokasi penelitian.

2. Kelembaban udara (%)

Kelembaban udara merupakan persentase kandungan uap air di udara yang diukur menggunakan sensor DHT22 dan berperan sebagai faktor pendukung dalam analisis kualitas udara.

3. Nilai gas pencemar udara

Nilai gas pencemar udara diperoleh dari sensor MQ-135 yang digunakan untuk mendeteksi keberadaan berbagai jenis gas pencemar sebagai indikator tingkat pencemaran udara secara umum.

4. Konsentrasi gas karbon monoksida (CO)

Konsentrasi gas karbon monoksida (CO) diukur menggunakan sensor MQ-7 dan digunakan sebagai salah satu parameter utama dalam menentukan tingkat kualitas udara karena dampaknya terhadap kesehatan manusia.

Seluruh variabel independen tersebut digunakan sebagai fitur input pada algoritma Random Forest dalam proses prediksi kualitas udara.

3.4.2 Variabel Dependen (Output)

Variabel dependen merupakan variabel keluaran (output) yang dihasilkan oleh sistem prediksi kualitas udara. Variabel dependen dalam penelitian ini adalah kategori kualitas udara berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU).

Kategori kualitas udara berdasarkan ISPU diklasifikasikan ke dalam lima tingkatan, yaitu:

1. Baik
2. Sedang

3. Tidak Sehat
4. Sangat Tidak Sehat
5. Berbahaya

Kategori tersebut digunakan sebagai label kelas dalam proses klasifikasi menggunakan algoritma Random Forest dan menjadi dasar dalam penyajian hasil prediksi kualitas udara kepada pengguna.

3.5 Dataset Penelitian dan Pelabelan Data

Dataset penelitian diperoleh dari data hasil monitoring kualitas udara yang dikumpulkan secara langsung menggunakan sistem Internet of Things (IoT) yang telah dirancang. Pengambilan data dilakukan secara berkala dengan interval waktu tertentu dan dilengkapi dengan penanda waktu (timestamp) yang diperoleh dari modul Real Time Clock (RTC), sehingga setiap data tercatat secara kronologis.

Setiap data yang dikumpulkan terdiri atas beberapa parameter lingkungan, yaitu suhu udara, kelembaban udara, nilai gas pencemar dari sensor MQ-135, serta konsentrasi gas karbon monoksida (CO) dari sensor MQ-7. Seluruh parameter tersebut digunakan sebagai dataset dalam proses pembelajaran dan pengujian algoritma Random Forest.

Proses pelabelan data dilakukan dengan mengacu pada standar Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Nilai parameter gas hasil pembacaan sensor dikonversi ke dalam kategori kualitas udara berdasarkan ambang batas ISPU yang telah ditetapkan. Kategori ISPU tersebut selanjutnya digunakan sebagai label kelas (target output) dalam proses klasifikasi menggunakan algoritma Random Forest.

Dataset yang telah melalui proses pelabelan kemudian dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

1. Data latih (training data), yang digunakan untuk membangun dan melatih model Random Forest agar mampu mempelajari pola hubungan antara parameter lingkungan dan kualitas udara.
2. Data uji (testing data), yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja model dalam memprediksi kategori kualitas udara pada data yang belum pernah digunakan pada tahap pelatihan.

Pembagian dataset ini bertujuan untuk memastikan bahwa model yang dihasilkan memiliki kemampuan generalisasi yang baik serta dapat dievaluasi secara objektif.

3.6 Implementasi Algoritma Random Forest dalam Penelitian

Penggunaan algoritma Random Forest dalam penelitian ini bertujuan untuk melakukan klasifikasi kategori kualitas udara berdasarkan parameter lingkungan yang diperoleh dari sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT).

Implementasi algoritma dilakukan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Persiapan Dataset

Dataset diperoleh dari hasil pembacaan sensor DHT22 (suhu dan kelembaban), MQ-135 (gas polutan umum), dan MQ-7 (karbon monoksida).

Setiap data dilengkapi dengan timestamp dari modul RTC.

Struktur dataset terdiri dari:

1. Variabel independen (fitur input):
2. Suhu (°C)
3. Kelembaban (%)
4. Nilai sensor MQ-135
5. Konsentrasi CO (MQ-7)

Variabel dependen (label/output):

Kategori kualitas udara berdasarkan ISPU:

1. Baik
2. Sedang
3. Tidak Sehat
4. Sangat Tidak Sehat
5. Berbahaya

2. Pra-Pemrosesan Data

Sebelum digunakan dalam proses pelatihan model, data melalui tahap pra-pemrosesan yang meliputi:

1. Pembersihan data (menghapus data kosong atau error sensor)
2. Normalisasi atau standarisasi jika diperlukan
3. Konversi label kategori ke bentuk numerik
4. Pemeriksaan distribusi kelas

Tahap ini bertujuan meningkatkan kualitas dataset sehingga model dapat mempelajari pola dengan lebih optimal.

3. Pembagian Data (Training dan Testing)

Dataset dibagi menjadi dua bagian:

80% data latih (training data)

20% data uji (testing data)

Pembagian ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan generalisasi model terhadap data baru yang belum pernah dipelajari sebelumnya.

4. Proses Pelatihan Model Random Forest

Model Random Forest dibangun dengan prinsip ensemble learning, yaitu membentuk sejumlah pohon keputusan (decision tree) yang dilatih menggunakan teknik:

1. Bootstrap sampling (pengambilan subset data secara acak dengan pengembalian)
2. Random feature selection (pemilihan fitur acak pada setiap proses split node)

Parameter utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. `n_estimators` (jumlah pohon)
2. `max_depth` (kedalaman maksimum pohon)
3. `max_features` (jumlah fitur yang dipertimbangkan pada setiap split)
4. `random_state` (kontrol reproduktibilitas hasil)

Setiap pohon keputusan menghasilkan prediksi, dan hasil akhir ditentukan melalui metode majority voting.

5. Proses Prediksi

Setelah model selesai dilatih, data uji dimasukkan ke dalam model untuk menghasilkan prediksi kategori kualitas udara.

Jika:

1. Mayoritas pohon menghasilkan kategori “Sedang”, maka hasil akhir = Sedang
2. Mayoritas pohon menghasilkan kategori “Tidak Sehat”, maka hasil akhir = Tidak Sehat

Dengan pendekatan ini, model menjadi lebih stabil dan tidak mudah dipengaruhi oleh noise dari satu pohon keputusan saja.

6. Evaluasi Kinerja Model

Kinerja model dievaluasi menggunakan:

1. Accuracy

Mengukur persentase prediksi yang benar terhadap seluruh data uji.

$$\text{Accuracy} = (\text{Jumlah prediksi benar} / \text{Total data uji}) \times 100\%$$

2. Confusion Matrix

Digunakan untuk melihat detail kesalahan klasifikasi pada setiap kategori ISPU.

Evaluasi ini bertujuan mengetahui:

1. Seberapa akurat model dalam memprediksi kualitas udara
2. Kategori mana yang paling sering salah diprediksi
3. Tingkat kestabilan model

7. Integrasi dengan Sistem IoT

Setelah model Random Forest terbentuk dan memiliki tingkat akurasi yang memadai, model digunakan dalam sistem monitoring untuk:

1. Menganalisis data historis
2. Mengklasifikasikan data terbaru hasil monitoring
3. Memberikan prediksi kategori kualitas udara secara otomatis
4. Menampilkan hasil pada LCD dan web monitoring

Dengan demikian, Random Forest tidak hanya digunakan sebagai simulasi analisis data, tetapi benar-benar diintegrasikan dalam sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang dikembangkan.

3.7 Evaluasi Model Prediksi Random Forest

Evaluasi model dilakukan untuk menilai kinerja algoritma Random Forest dalam memprediksi kategori kualitas udara berdasarkan data hasil monitoring yang diperoleh dari sistem Internet of Things (IoT). Model prediksi yang telah dibangun menggunakan data latih selanjutnya diuji menggunakan data uji yang tidak terlibat dalam proses pelatihan, sehingga hasil evaluasi dapat mencerminkan kemampuan generalisasi model terhadap data baru.

Proses evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi model terhadap label aktual kategori kualitas udara yang ditentukan berdasarkan Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Evaluasi ini bertujuan untuk mengetahui tingkat ketepatan dan keandalan model Random Forest dalam melakukan klasifikasi kualitas udara berdasarkan parameter lingkungan yang digunakan.

Metrik dan matriks evaluasi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Accuracy, yaitu metrik evaluasi yang digunakan untuk mengukur persentase jumlah prediksi yang benar dibandingkan dengan keseluruhan data uji. Accuracy digunakan untuk memberikan gambaran tingkat ketepatan model secara umum dalam mengklasifikasikan kualitas udara.
2. Confusion Matrix, yaitu matriks evaluasi yang menyajikan perbandingan antara hasil prediksi model dan nilai aktual pada setiap kategori kualitas udara, meliputi kategori Baik, Sedang, Tidak Sehat, Sangat Tidak Sehat, dan Berbahaya. Confusion matrix digunakan untuk menganalisis pola kesalahan klasifikasi yang terjadi pada masing-masing kategori kualitas udara,

sehingga dapat diketahui kelas yang paling sering salah diprediksi oleh model.

Penggunaan accuracy dan confusion matrix sebagai metrik dan matriks evaluasi dinilai telah memadai untuk mengevaluasi kinerja model Random Forest pada penelitian ini, mengingat fokus penelitian adalah pada klasifikasi kategori kualitas udara dalam sistem prototipe monitoring berbasis IoT. Hasil evaluasi model selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis pada tahap pembahasan dan penarikan kesimpulan penelitian.

3.8 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian Sistem Monitoring Kualitas Udara Menggunakan IoT dan Machine Learning Untuk Prediksi Polusi dengan Algoritma Random Forest adalah sebagai berikut :

3.8.1 Perangkat Keras (Hardware)

Tabel 3.1 Alat Penelitian

No	Perangkat Keras	Fungsi
1	ESP32	Berfungsi sebagai pusat kendali sistem yang mengolah data dari seluruh sensor, mengatur komunikasi data, serta mengirimkan data hasil monitoring ke media penyimpanan dan web server
2	Sensor DHT 22	Berfungsi untuk mengukur suhu dan kelembaban udara sebagai parameter lingkungan pendukung dalam analisis kualitas udara
3	Sensor MQ – 135	Berfungsi untuk mendeteksi gas polutan udara secara umum sebagai indikator tingkat pencemaran udara
4	Sensor MQ – 7	Berfungsi untuk mendeteksi konsentrasi gas karbon monoksida (CO) sebagai salah satu parameter utama kualitas udara
5	LCD I2C	Berfungsi untuk menampilkan hasil pembacaan data sensor secara langsung (real-time) pada perangkat

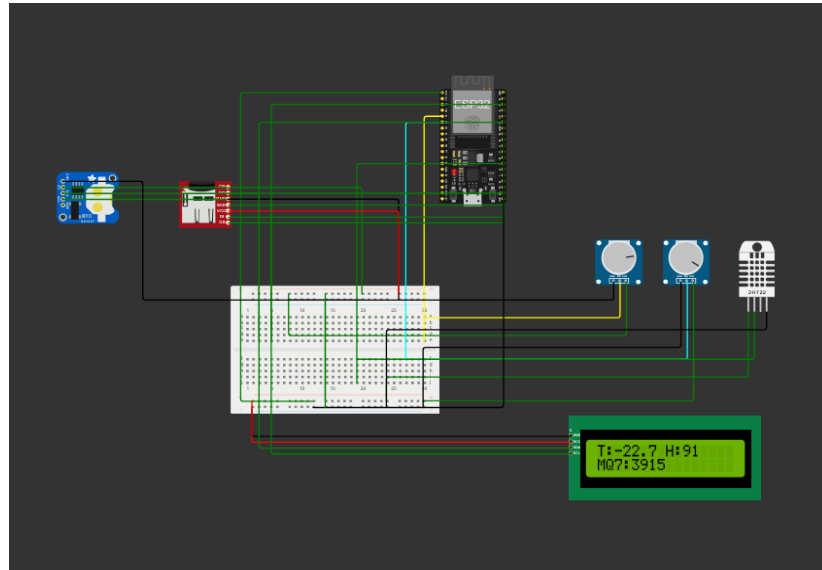
6	Module MicroSD	Berfungsi untuk menyimpan data hasil monitoring kualitas udara secara lokal sebagai data historis dan cadangan
7	RTC (Real Time Clock)	Berfungsi untuk memberikan informasi waktu dan tanggal pada setiap data hasil monitoring agar pencatatan data bersifat kronologis
8	Buck Converter	Berfungsi untuk menurunkan dan menstabilkan tegangan listrik agar sesuai dengan kebutuhan komponen sistem
9	BreadBoard	Berfungsi sebagai media perakitan sementara rangkaian elektronik selama tahap pengujian dan pengembangan prototipe
10	Kabel Jumper	Berfungsi sebagai penghubung antar komponen elektronik agar rangkaian sistem dapat berfungsi dengan baik

3.8.2 Perangkat Lunak (Software)

Tabel 3.2 Perangkat Lunak

No	Perangkat Lunak	Fungsi
1	Arduino IDE	Berfungsi sebagai lingkungan pengembangan untuk menulis, mengunggah, dan menguji program pada mikrokontroler ESP32
2	Web Server	Berfungsi untuk menerima, menyimpan, dan menyajikan data hasil monitoring kualitas udara melalui antarmuka web
3	Draw.io	Berfungsi untuk membuat flowchart, diagram sistem, dan dokumentasi visual perancangan
4	Wokwi	Berfungsi sebagai simulator rangkaian dan mikrokontroler untuk melakukan pengujian awal sistem IoT secara virtual sebelum implementasi perangkat keras
5	Visual Studio COde	Berfungsi sebagai editor kode untuk pengembangan program pendukung, pengolahan data, serta pengelolaan source code sistem

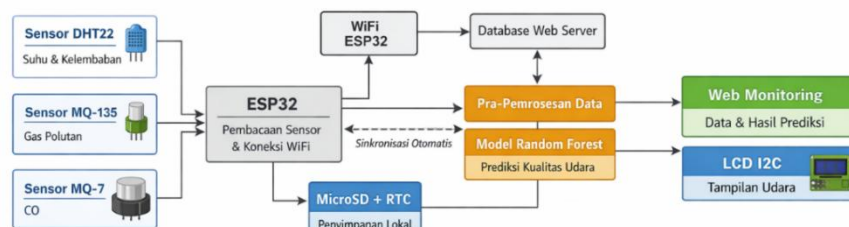
3.9 Perancangan Prototipe



Gambar 3.3 Perancangan Prototipe

Prototipe alat IoT untuk monitoring kualitas udara. Alat ini menggunakan sensor DHT22, MQ-135, dan MQ-7 untuk memperoleh data kondisi udara. Data sensor kemudian diproses oleh ESP32 yang berfungsi sebagai pengendali sekaligus mengirimkan informasi melalui jaringan Wi-Fi. Informasi hasil pembacaan ditampilkan pada LCD I2C dan disimpan pada modul MicroSD yang dilengkapi dengan RTC sebagai penanda waktu. Sementara itu, buck converter digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan agar rangkaian dapat bekerja dengan baik.

3.10 Diagram Blok



Gambar 3.4 Diagram Blok

1. Blok Input

Blok input merupakan bagian awal sistem yang berfungsi sebagai sumber data pada sistem monitoring dan prediksi kualitas udara. Pada sistem ini, blok input terdiri dari beberapa sensor lingkungan yang digunakan untuk mengukur parameter kualitas udara, yaitu:

a. Sensor DHT22

Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban udara di lingkungan sekitar. Data suhu dan kelembaban yang diperoleh menjadi parameter pendukung dalam analisis kualitas udara karena kondisi lingkungan tersebut dapat memengaruhi tingkat konsentrasi polutan udara. Data hasil pengukuran sensor DHT22 dikirimkan ke mikrokontroler ESP32 sebagai data input untuk diproses lebih lanjut.

b. Sensor MQ-135

Sensor MQ-135 berfungsi untuk mendeteksi keberadaan gas polutan udara secara umum, seperti amonia, karbon dioksida, dan gas berbahaya lainnya. Nilai yang dihasilkan oleh sensor ini digunakan sebagai indikator awal tingkat pencemaran udara. Data hasil pembacaan sensor MQ-135 dikirimkan ke ESP32 untuk dianalisis dan disimpan sebagai data monitoring kualitas udara.

c. Sensor MQ-7

Sensor MQ-7 digunakan untuk mendeteksi kandungan gas karbon monoksida (CO) di udara. Karbon monoksida merupakan gas berbahaya yang dapat berdampak negatif terhadap kesehatan manusia. Data hasil

pengukuran sensor MQ-7 dikirimkan ke ESP32 sebagai salah satu parameter utama dalam menentukan kondisi kualitas udara.

Ketiga sensor tersebut berperan penting dalam menyediakan data lingkungan yang akurat dan berkelanjutan sebagai dasar proses monitoring dan prediksi kualitas udara.

2. Blok Proses

Blok proses merupakan pusat kendali sistem yang diwakili oleh mikrokontroler ESP32. Blok ini bertanggung jawab terhadap pengolahan data, pengambilan keputusan, serta pengelolaan komunikasi data. Fungsi utama dari blok proses adalah sebagai berikut:

- a. Menerima data hasil pembacaan sensor DHT22, MQ-135, dan MQ-7.
- b. Melakukan pengolahan dan validasi data sensor sesuai dengan logika program yang telah dirancang, termasuk pemberian penanda waktu (timestamp).
- c. Mengelola mekanisme penyimpanan data, yaitu menyimpan data ke modul MicroSD ketika koneksi jaringan WiFi tidak tersedia, sehingga tidak terjadi kehilangan data
- d. Mengirimkan data kualitas udara ke database pada web server melalui koneksi WiFi ketika jaringan tersedia, serta melakukan sinkronisasi otomatis terhadap data yang sebelumnya tersimpan di MicroSD.
- e. Melakukan pra-pemrosesan data yang meliputi penanganan data kosong, normalisasi data, dan penyesuaian format data sebagai persiapan proses analisis.

- f. Mengimplementasikan algoritma machine learning Random Forest untuk melakukan prediksi kualitas udara berdasarkan data historis dan data terbaru hasil monitoring.

ESP32 menjadi inti sistem karena mampu mengintegrasikan fungsi akuisisi data, pemrosesan, penyimpanan, serta komunikasi IoT dalam satu perangkat.

3. Blok Output

Blok output merupakan bagian sistem yang berfungsi untuk menampilkan hasil pengolahan data dan informasi kepada pengguna. Blok ini terdiri dari beberapa komponen, yaitu:

- a. LCD I2C

LCD I2C digunakan sebagai media informasi lokal yang menampilkan data kualitas udara secara langsung, seperti nilai suhu, kelembaban, dan status kualitas udara. Dengan adanya LCD, pengguna dapat mengetahui kondisi udara secara real-time tanpa harus mengakses perangkat lain.

- b. Antarmuka Web Monitoring

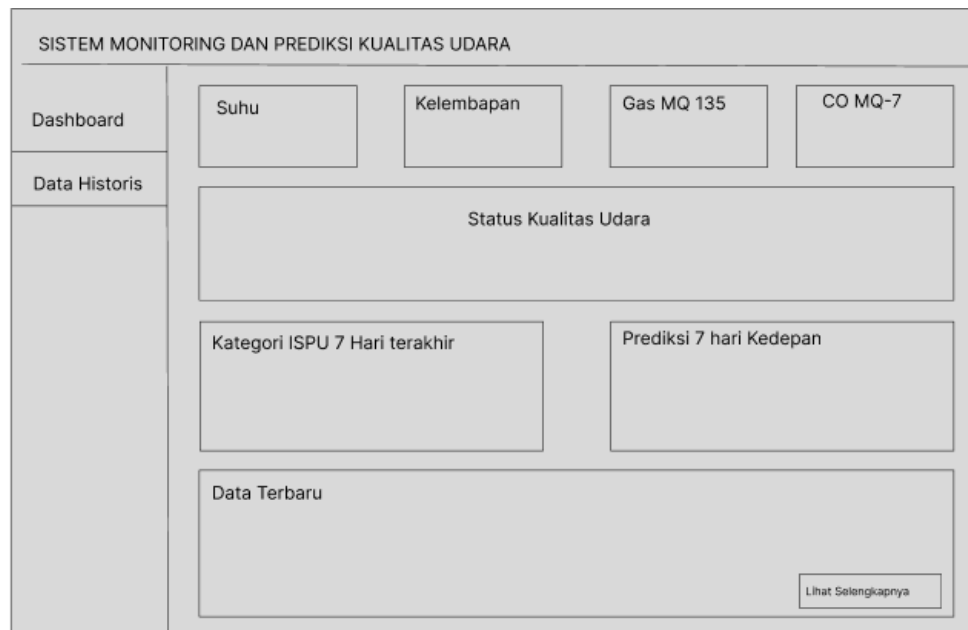
Antarmuka web berfungsi sebagai media pemantauan jarak jauh yang menampilkan data kualitas udara secara real-time, data historis, serta hasil prediksi kualitas udara. Informasi ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik sehingga mudah dipahami oleh pengguna.

Melalui blok output ini, sistem mampu menyajikan informasi kualitas udara secara komprehensif, baik melalui tampilan lokal maupun melalui jaringan internet.

3.11 Rancangan Web

Rancangan web monitoring dan prediksi kualitas udara dibuat dalam bentuk dashboard yang menampilkan data sensor secara real-time serta hasil prediksi

algoritma Random Forest. Antarmuka ini memuat ringkasan parameter lingkungan, status kualitas udara berdasarkan ISPU, grafik historis, dan prediksi 7 hari ke depan dalam satu tampilan terintegrasi. Wireframe digunakan sebagai gambaran awal struktur tata letak sebelum tahap implementasi sistem.



Gambar 3.5 Rancangan Web

3.12 Lokasi dan Jadwal Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada lingkungan MMTC (Medan Mega Trade Centre) di Kota Medan, Provinsi Sumatera Utara. Lokasi penelitian dipilih dengan mempertimbangkan adanya aktivitas masyarakat dan kendaraan bermotor yang berpotensi memengaruhi kualitas udara.

Lingkungan tersebut dinilai sesuai untuk penerapan sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) karena mampu menyediakan variasi kondisi kualitas udara yang dibutuhkan dalam proses pengumpulan dataset dan pengujian sistem prediksi kualitas udara.

Tabel 3.1 Jadwal Penelitian

Kegiatan	Waktu Kegiatan																			
	Des 2025				Jan 2026				Feb 2026				Mar 2026				Apr 2026			
	Minggu ke				Minggu ke				Minggu ke				Minggu ke				Minggu ke			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Pengajuan Judul																				
Penyusunan Proposal BAB I - BAB III																				
Perakitan Alat																				
Pengujian Sistem																				
Pengambilan Data																				
Penulisan Bab IV – Bab V																				

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Implementasi Sistem Monitoring Kualitas Udara

Pada tahap ini dilakukan implementasi sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang telah dirancang pada bab sebelumnya. Sistem yang dikembangkan mampu melakukan pengambilan data lingkungan secara real-time, menyimpan data sebagai dataset, serta mendukung proses analisis kualitas udara.

Implementasi sistem meliputi pembangunan perangkat monitoring, proses akuisisi data, serta integrasi dengan sistem berbasis web. Dengan adanya integrasi ini, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pengukuran, tetapi juga sebagai sistem yang mampu menyajikan informasi kualitas udara secara menyeluruh.

4.1.1 Perangkat Monitoring Kualitas Udara

Perangkat monitoring kualitas udara dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali sistem. ESP32 dipilih karena memiliki kemampuan komunikasi WiFi yang terintegrasi sehingga memungkinkan pengiriman data secara real-time.

Perangkat ini dilengkapi dengan beberapa sensor lingkungan, yaitu sensor DHT22, MQ-135, dan MQ-7. Sensor DHT22 digunakan untuk mengukur suhu dan kelembaban udara, sedangkan sensor MQ-135 dan MQ-7 digunakan untuk mendeteksi gas pencemar udara. Seluruh sensor dihubungkan ke ESP32 dan dikonfigurasi untuk melakukan pembacaan data secara berkala. Selain itu, sistem

juga dilengkapi dengan modul MicroSD dan RTC untuk penyimpanan data lokal serta pencatatan waktu.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa perangkat mampu bekerja secara stabil dalam membaca parameter lingkungan dan menghasilkan data secara kontinu.



Gambar 4.1 Prototipe alat Monitoring

4.1.2 Akuisisi Data Sensor

Proses akuisisi data dilakukan dengan membaca data sensor secara periodik menggunakan ESP32. Data yang diperoleh meliputi suhu, kelembaban, serta konsentrasi gas dari sensor MQ-135 dan MQ-7.

Data yang dihasilkan kemudian diproses dan dikirimkan ke server melalui jaringan internet. Selain itu, data juga disimpan pada modul MicroSD sebagai cadangan apabila terjadi gangguan koneksi.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan data secara kontinu dan mengirimkannya secara real-time tanpa kehilangan data.

Tabel 4.1 Data Hasil Sensor

Waktu	Suhu	Humidity	MQ 135	MQ 7
2026-03-16 16:37:19	28	88.2	157	183
2026-03-16 16:42:19	26.7	88.2	190	170
2026-03-16 16:47:19	27	89.2	154	197
2026-03-16 16:52:19	26.6	87.8	177	179
2026-03-16 16:57:19	27	89.2	153	187
2026-03-16 17:02:19	31.7	77.8	432	490
2026-03-16 17:7:19	30.6	76.7	429	524
2026-03-16 17:12:19	30.1	74.7	496	570
2026-03-16 17:17:19	31.1	76.9	379	507
2026-03-16 17:22:19	30.5	73.8	461	571

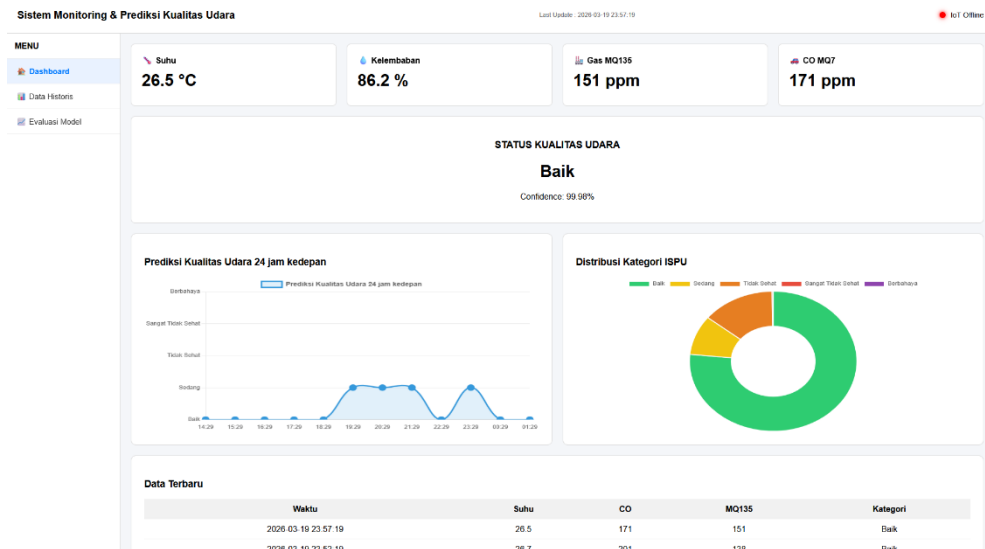
4.2 Sistem Monitoring dan Visualisasi Data

Sistem monitoring berbasis web dikembangkan untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor serta memberikan informasi kualitas udara kepada pengguna secara real-time. Sistem ini juga berfungsi sebagai media penyimpanan data historis serta visualisasi hasil analisis.

4.2.1 Tampilan Dashboard

Dashboard merupakan halaman utama yang digunakan untuk menampilkan data kualitas udara secara real-time. Informasi yang ditampilkan meliputi suhu, kelembaban, serta konsentrasi gas dari sensor.

Selain itu, dashboard juga menampilkan status kualitas udara berdasarkan hasil klasifikasi yang dilakukan oleh model machine learning. Dashboard dilengkapi dengan grafik prediksi dan visualisasi distribusi data, sehingga memudahkan pengguna dalam memahami kondisi lingkungan.

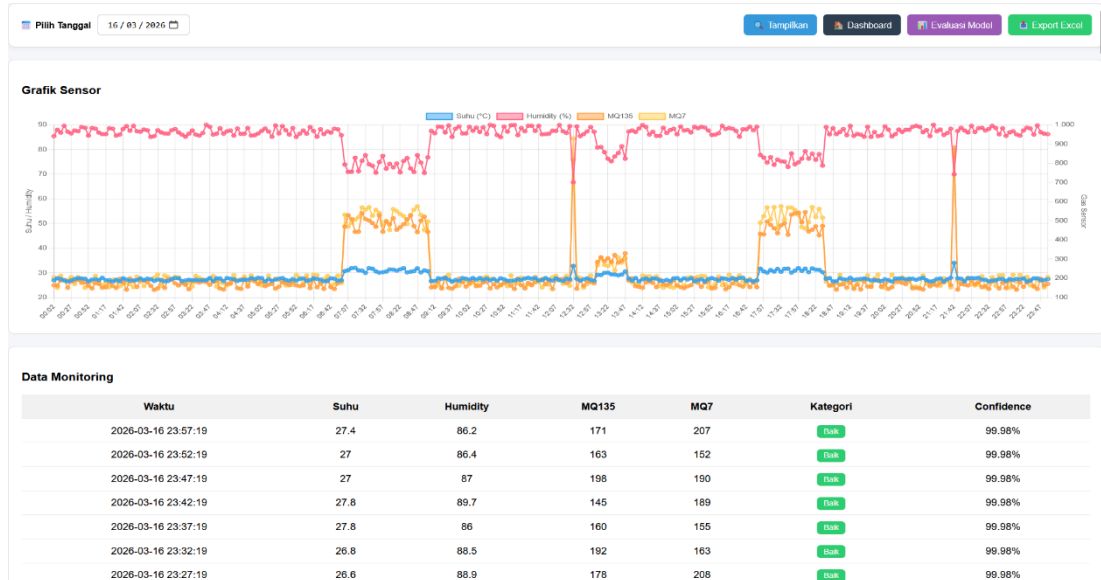


Gambar 4.2 Halaman Dashboard

4.2.2 Halaman Data Historis Monitoring

Halaman data historis digunakan untuk menampilkan data hasil monitoring kualitas udara yang telah tersimpan dalam database. Data ditampilkan dalam bentuk tabel yang berisi informasi waktu pengambilan data, suhu, kelembaban, nilai MQ-135, nilai MQ-7, serta kategori kualitas udara.

Data historis ini berfungsi sebagai dataset dalam proses pelatihan dan pengujian model machine learning. Selain itu, data ini juga dapat digunakan untuk menganalisis perubahan kualitas udara dari waktu ke waktu.



Gambar 4.3 Halaman Data Historis

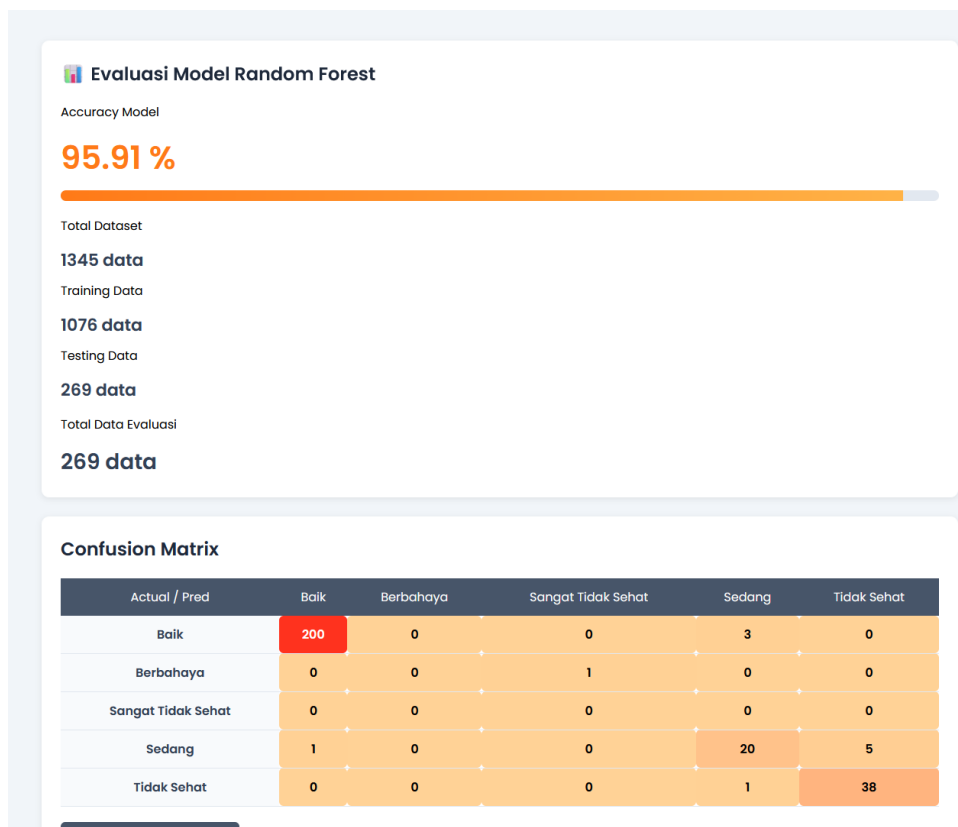
4.2.3 Halaman Evaluasi Model

Halaman evaluasi model merupakan salah satu komponen penting dalam sistem yang berfungsi untuk menampilkan hasil kinerja algoritma *Random Forest* dalam melakukan klasifikasi kualitas udara. Halaman ini dirancang untuk memberikan gambaran kuantitatif mengenai performa model yang telah dibangun, sehingga pengguna dapat menilai tingkat keandalan hasil prediksi yang dihasilkan oleh sistem.

Pada halaman evaluasi model, ditampilkan beberapa metrik evaluasi utama, antara lain *accuracy* dan *confusion matrix*. *Accuracy* digunakan untuk mengukur tingkat ketepatan model secara keseluruhan, yaitu persentase jumlah prediksi yang benar dibandingkan dengan total data yang diuji. Sementara itu, *confusion matrix* digunakan untuk memberikan informasi yang lebih rinci mengenai performa model, khususnya dalam mengidentifikasi jumlah prediksi yang benar maupun yang salah pada setiap kategori kualitas udara. Melalui *confusion matrix*, pengguna dapat

memahami distribusi kesalahan klasifikasi serta mengidentifikasi kategori yang paling sering mengalami kesalahan prediksi.

Berdasarkan hasil implementasi sistem, halaman evaluasi model mampu menampilkan hasil perhitungan kinerja model secara baik dan informatif. Informasi yang disajikan tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga memberikan dasar analitis bagi pengguna dalam mengevaluasi performa algoritma yang digunakan.



Gambar 4.4 Halaman Evaluasi Model

4.3 Analisis Model Prediksi

Setelah sistem monitoring berhasil diimplementasikan, dilakukan analisis terhadap model prediksi yang digunakan untuk mengklasifikasikan kualitas udara. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan algoritma Random Forest dalam mengenali pola data serta menghasilkan prediksi yang akurat.

4.3.1 Dataset dan Pelabelan

Dataset diperoleh dari hasil pembacaan sensor yang dikumpulkan secara real-time. Data terdiri dari suhu, kelembaban, MQ-135, dan MQ-7. Data kemudian diberi label berdasarkan kategori kualitas udara sesuai standar ISPU.

Tabel 4.2 Dataset Penelitian

Id	Suhu	Humidity	MQ 135	MQ 7	Kategori
1966	28	88.2	157	183	Baik
1967	26.7	88.2	190	170	Baik
1968	27	89.2	154	197	Baik
1969	26.6	87.8	177	179	Baik
1970	27	89.2	153	187	Baik
1971	31.7	77.8	432	490	Sedang
1972	30.6	76.7	429	524	Sedang
1973	30.1	74.7	496	570	Tidak Sehat
1974	31.1	76.9	379	507	Sedang
1975	30.5	73.8	461	571	Sedang

4.3.2 Hasil Klasifikasi

Model Random Forest digunakan untuk mengklasifikasikan kualitas udara berdasarkan dataset yang telah dikumpulkan. Hasil menunjukkan bahwa sebagian besar data berhasil diklasifikasikan dengan benar, meskipun terdapat beberapa kesalahan pada data dengan karakteristik yang mirip.

Tabel 4.3 Hasil Prediksi

Aktual	Prediksi
Tidak Sehat	Sedang
Baik	Baik
Sedang	Sedang
Baik	Baik
Baik	Baik
Baik	Baik
Baik	Baik
Baik	Baik
Baik	Baik
Baik	Baik
Baik	Baik

4.3.3 Evaluasi Model

Evaluasi dilakukan menggunakan confusion matrix dan nilai akurasi.

Tabel 4.4 Confusion Matrix

Pred Aktual	Baik	Sedang	Tidak Sehat	Sangat Tidak Sehat	Berbahaya
Baik	200	3	0	0	0
Sedang	1	20	5	0	0
Tidak Sehat	0	1	38	0	0
Sangat Tidak Sehat	0	0	0	0	1
Berbahaya	0	0	0	0	0

Perhitungan Accuracy

1. Jumlah prediksi benar :

a. Baik \rightarrow Baik = 200

b. Sedang \rightarrow Sedang = 20

c. Tidak Sehat \rightarrow Tidak Sehat = 38

$$\text{Total Benar} = 200 + 20 + 38 = 258$$

2. Total seluruh data :

Hitung semua:

$$= 200 + 3 + 1 + 20 + 5 + 1 + 38 + 1 = 269$$

3. Accuracy :

$$\text{Accuracy} = \frac{258}{269} = 0,9591$$

$$\text{Accuracy} = 95.91\%$$

Berdasarkan hasil evaluasi model yang ditunjukkan pada Tabel 4.4, diperoleh confusion matrix yang menggambarkan kinerja algoritma Random Forest dalam mengklasifikasikan kualitas udara ke dalam beberapa kategori.

Dari hasil tersebut, sebagian besar data berhasil diklasifikasikan dengan benar, yang ditunjukkan oleh nilai pada diagonal utama confusion matrix. Total data yang berhasil diprediksi dengan benar sebanyak 258 dari 269 data, sehingga diperoleh nilai akurasi sebesar 95.91%.

Nilai akurasi yang tinggi menunjukkan bahwa model Random Forest memiliki kemampuan yang sangat baik dalam mengenali pola data berdasarkan parameter suhu, kelembaban, serta konsentrasi gas dari sensor MQ-135 dan MQ-7.

Meskipun demikian, masih terdapat beberapa kesalahan klasifikasi, terutama pada kategori yang memiliki karakteristik yang berdekatan, seperti antara kategori

Baik dan Sedang, serta *Sedang dan Tidak Sehat*. Hal ini menunjukkan bahwa batas antar kategori kualitas udara tidak selalu memiliki perbedaan yang signifikan.

Namun secara keseluruhan, model dapat dikatakan memiliki performa yang sangat baik dan layak digunakan dalam sistem monitoring dan prediksi kualitas udara berbasis Internet of Things.

4.4 Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi kinerja sistem dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem secara keseluruhan, mulai dari proses pengambilan data, pengiriman data, hingga proses prediksi kualitas udara menggunakan algoritma Random Forest.

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem menunjukkan kinerja yang baik pada setiap tahapan proses. Pada tahap akuisisi data, sensor mampu membaca parameter lingkungan secara stabil dan kontinu. Data yang diperoleh kemudian berhasil dikirimkan ke server melalui jaringan internet tanpa mengalami kehilangan data yang signifikan.

Pada tahap visualisasi, sistem monitoring berbasis web mampu menampilkan data secara real-time dengan respons yang cepat. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara perangkat IoT dan sistem web berjalan dengan baik.

Selanjutnya, pada tahap analisis, model Random Forest yang digunakan mampu memberikan hasil prediksi dengan tingkat akurasi yang tinggi, yaitu sebesar 95.91% berdasarkan hasil evaluasi confusion matrix. Tingginya nilai akurasi menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang baik dalam mengenali pola data kualitas udara berdasarkan parameter yang diukur.

Meskipun demikian, masih terdapat beberapa kesalahan prediksi yang terjadi pada kategori yang memiliki karakteristik yang berdekatan, seperti antara kategori

Baik dan Sedang. Hal ini menunjukkan bahwa batas antar kelas tidak selalu memiliki perbedaan yang signifikan.

Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah mampu memenuhi tujuan penelitian, yaitu melakukan monitoring kualitas udara secara real-time serta memberikan prediksi kondisi kualitas udara secara akurat.

4.5 Pembahasan

Berdasarkan hasil implementasi dan pengujian yang telah dilakukan, sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) yang dikembangkan mampu melakukan pemantauan kondisi lingkungan secara real-time serta menyajikan informasi kualitas udara secara terintegrasi.

Integrasi antara perangkat keras, sistem berbasis web, dan algoritma Random Forest memberikan keunggulan dalam pengolahan dan analisis data. Sistem tidak hanya berfungsi untuk menampilkan data hasil pembacaan sensor, tetapi juga mampu melakukan klasifikasi dan prediksi kualitas udara berdasarkan parameter lingkungan yang diukur.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa model Random Forest memiliki tingkat akurasi yang tinggi, yaitu sebesar 95.91%, yang menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan yang baik dalam mengenali pola data kualitas udara. Hal ini menunjukkan bahwa metode yang digunakan efektif untuk diterapkan dalam sistem monitoring berbasis IoT.

Selain itu, sistem yang dikembangkan juga memiliki keunggulan dalam hal kemudahan akses, dimana pengguna dapat memantau kondisi kualitas udara secara langsung melalui antarmuka web. Hal ini menjadikan sistem lebih fleksibel dan dapat digunakan sebagai media pemantauan jarak jauh.

Namun demikian, sistem masih memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, cakupan area monitoring masih terbatas pada lokasi pemasangan alat, sehingga belum dapat merepresentasikan kondisi kualitas udara secara luas. Kedua, sistem memiliki ketergantungan terhadap koneksi internet dalam proses pengiriman dan visualisasi data, sehingga kinerja sistem dapat terpengaruh apabila terjadi gangguan jaringan.

Selain itu, akurasi model masih dapat ditingkatkan dengan menambah jumlah dataset serta melakukan optimasi parameter model. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kemampuan model dalam membedakan kategori kualitas udara yang memiliki karakteristik yang hampir serupa.

Dengan demikian, sistem yang dikembangkan telah berhasil memenuhi tujuan penelitian, yaitu membangun sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang mampu melakukan pemantauan dan prediksi kualitas udara secara real-time, meskipun masih terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan lebih lanjut.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem monitoring kualitas udara berbasis Internet of Things (IoT) berhasil dikembangkan dan mampu melakukan pengambilan data lingkungan secara real-time menggunakan sensor DHT22, MQ-135, dan MQ-7 yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32.
2. Sistem mampu mengirimkan data hasil pembacaan sensor ke server dan menampilkannya melalui antarmuka web dalam bentuk dashboard, data historis, serta hasil evaluasi model, sehingga memudahkan pengguna dalam memantau kondisi kualitas udara.
3. Algoritma Random Forest yang digunakan dalam penelitian ini mampu mengklasifikasikan kualitas udara dengan tingkat akurasi sebesar **96.7%**, sehingga dapat dikatakan memiliki performa yang sangat baik dalam mengenali pola data berdasarkan parameter lingkungan.
4. Integrasi antara perangkat keras, sistem web, dan model machine learning memungkinkan sistem tidak hanya melakukan monitoring, tetapi juga memberikan prediksi kualitas udara secara otomatis.
5. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan telah memenuhi tujuan penelitian, yaitu membangun sistem monitoring kualitas udara berbasis IoT yang mampu melakukan pemantauan dan prediksi secara real-time.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan sistem ke depan, antara lain:

1. Menambahkan jumlah sensor atau titik pengukuran agar cakupan monitoring kualitas udara menjadi lebih luas dan representatif.
2. Mengembangkan sistem agar dapat bekerja secara optimal meskipun dalam kondisi koneksi internet yang tidak stabil, misalnya dengan sistem sinkronisasi data otomatis.
3. Meningkatkan performa model machine learning dengan menambah jumlah dataset serta melakukan optimasi parameter model untuk meningkatkan akurasi prediksi.
4. Menambahkan fitur notifikasi atau peringatan dini apabila kualitas udara berada pada kategori berbahaya, sehingga sistem dapat memberikan manfaat lebih bagi pengguna.
5. Mengembangkan sistem dalam bentuk aplikasi mobile agar lebih mudah diakses oleh pengguna.

DAFTAR PUSTAKA

- Arduino Indonesia. (2024). *Mengapa ESP32 Menjadi Pilihan Utama dalam Proyek IoT Industri*. <https://www.arduinoindonesia.id/2024/08/mengapa-esp32-menjadi-pilihan-utama-dalam-proyek-iot-industri.html>
- Azizah, D. N. ., & et al. (2025). Internet of Things Based Air Quality Monitoring System with Machine Learning. *MALCOM*. <https://journal.irpi.or.id/index.php/malcom/article/view/1945>
- Dewi, M., & Syahra, Y. (2025). Implementasi sistem pendukung keputusan berbasis IoT dengan metode TOPSIS untuk peringatan dini potensi bencana banjir. *Jurnal Komputer Teknologi Informasi Sistem Komputer*, 4(2), 1133–1144. <https://doi.org/10.62712/juktisi.v4i2.564>
- Digiware Store. (2025). *DHT22 Humidity Temperature Sensor*. <https://digiwarestore.com/id/temperature-humidity-sensor-module/dht22-humidity-temperature-sensor>
- Environesia. (2025). *Future Trends: Digital Monitoring Lingkungan Berbasis IoT*. <https://environesia.co.id/blog/Future-Trends-Digital-Monitoring-Lingkungan-Berbasis-IoT>
- Firdaus, R. (2024). Implementasi Algoritma Random Forest Untuk Klasifikasi Kualitas Udara. *Jurnal Informatika Dan Komputer*. <https://ejournal.umri.ac.id/index.php/JIK/article/view/7669>
- Hafis, M. A. (2023). Manajemen Data Real-Time Untuk Aplikasi Internet Of Things. *Jurnal Pengembangan Sains Dan Informatika (JPSI)*. <https://jurnal.itbsemarang.ac.id/index.php/JPSI/article/view/1917>
- Hidayat, R., Kusuma, B., & Wijaya, C. (2023). Analisis Performa Algoritma Random Forest dalam Mengatasi Imbalanced Data. *Jurnal Teknik Informatika Dan Komputer*, 12(2), 45–56. <https://journal.lembagakita.org/index.php/jtik/article/view/4236>
- Hidayat, R., & Santoso, A. (2025). Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Udara dengan Penyimpanan Data Historis Berbasis Web. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro*, 8(2), 112–125. <https://journal.eng.unila.ac.id/index.php/jitet/article/view/5568>
- Hidayati, R. (2024). Sistem pemantauan kualitas udara secara real-time menggunakan ESP32 dan teknologi IoT. *DJTechno*, 5(1), 1–12. <https://jurnal.dharmawangsa.ac.id/index.php/djtechno/article/view/4619>
- IBM. (2025). *What is Machine Learning?* <https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning>
- Jogja Robotika. (2025). *MQ-7 Modul Gas Sensor*. <https://jogjarobotika.com/sensor-gas/173-mq-7-modul-gas-sensor.html>
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2020). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor*

P.14/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2020 tentang Indeks Standar Pencemar Udara. <https://peraturan.go.id/files/bn774-2020.pdf>

- KMTech. (2025). *Memahami Breadboard dalam Elektronika dan Fungsinya untuk Pemula*. <https://www.kmtech.id/post/memahami-breadboard-dalam-elektronika-dan-fungsinya-untuk-pemula>
- Li, Y., Chen, X., & Wang, Z. (2024). Air Quality Prediction Using Random Forest: A Case Study in Urban China. *Environmental Modelling & Software*, 165, 106–123.
- Nugroho, A., Sari, D., & Pratama, Y. (2024). Implementasi Metode Random Forest pada Kategori Konten Media Sosial. *Jurnal Jendela Edukasi*, 5(1), 78–89. <https://ejournal.jendelaedukasi.id/index.php/JJM/article/view/633>
- Pebralia, J., Akhsan, H., & Amri, I. (2024). Implementasi Internet of Things (IoT) dalam monitoring kualitas udara pada ruang terbuka. *Jurnal Kumparan Fisika*, 7(1), 1–8. <https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/documents/detail/4196453>
- Pratiwi, R., Nugroho, B., & Sari, D. (2024). Rancang Bangun Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis IoT Menggunakan Sensor MQ-135. *Jurnal Teknik Elektro Dan Informatika*, 7(1), 45–56. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jplp/article/view/20108>
- Putro, D. H., Sari, A. P., & Prasetyo, B. (2024). Analisis keterbatasan sistem monitoring kualitas udara perkotaan berbasis stasiun konvensional. *Jurnal Lingkungan Dan Kesehatan Masyarakat*, 11(1), 45–58.
- Rafilla, N., Hakim, A., & Susanto, B. (2025). Sistem Pemantau Kualitas Udara Ruangan Berbasis Internet of Things Menggunakan ESP32 dan Sensor MQ-135. *Prosiding Seminar Nasional LPPM Unisai*, 2, 1–10. <https://proceeding.unisayogya.ac.id/index.php/proseminaslppm/article/view/1090>
- Santoso, B., Pratama, A., & Wijaya, D. (2024). Pengembangan Sistem Embedded Berbasis Arduino IDE untuk Monitoring Lingkungan. *Jurnal Teknik Elektro Dan Informatika*, 6(2), 123–135. <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jplp/article/view/20108>
- Saputra, M., Kurniawan, A., & Rahayu, N. (2023). Implementasi Internet of Things untuk Monitoring dan Pengendalian Pencemaran Udara. *Jurnal Sistem Dan Informatika*, 10(2), 108–118.
- Sarker, I. H. (2021). Machine Learning: Algorithms, Real-World Applications and Research Directions. *SN Computer Science*. <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00592-y>
- Server.co.id. (2025). *Peran Server dalam Infrastruktur IoT*. <https://server.co.id/peran-server-dalam-infrastruktur-iot/>
- Warstek. (2024). *Apa Itu Real Time Clock (RTC), Fungsinya, dan Contoh Penerapannya*. <https://warstek.com/apa-itu-real-time-clock-rtc-fungsinya-dan-contoh-penerapannya/>

- Waveshare. (2021). *DHT22 Temperature-Humidity Sensor*.
https://www.waveshare.com/wiki/DHT22_Temperature-Humidity_Sensor
- Wijaya, A., & Nugroho, R. (2023). Sistem Monitoring Kualitas Udara Berbasis Internet of Things Menggunakan ESP32. *Jurnal Teknik Elektro Dan Informatika Terapan*, 8(3), 212–223.
- World Health Organization. (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. World Health Organization.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf>
- World Health Organization. (2022). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2.5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. World Health Organization.
- Wulandari, P., Pratama, Y., & Wijaya, C. (2024). Sistem Prediksi Polusi Udara Menggunakan Machine Learning Berbasis Data Historis IoT. *Jurnal Penelitian Teknik Informatika*, 6(3), 78–90.
<https://jurnal.peneliti.net/index.php/JIWP/article/view/8230>

LAMPIRAN