

**PENGEMBANGAN PERANGKAT PENGUKURAN INDIKATOR CUACA
MOBILE DENGAN STUDI KASUS KARAKTERISTIK KOTA BANDAR
LAMPUNG**

(Skripsi)

Oleh

**LEON PAMUNGKAS HADI
1915031050**



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGEMBANGAN PERANGKAT PENGUKURAN INDIKATOR CUACA *MOBILE* DENGAN STUDI KASUS KARAKTERISTIK KOTA BANDAR LAMPUNG

Oleh

Leon Pamungkas Hadi

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan perangkat pengukuran cuaca bergerak (*mobile sensing*) berbasis mikrokontroler ESP32 yang mampu mengukur suhu, kelembapan, tekanan udara, dan konsentrasi karbon monoksida (CO) secara *real-time*. Perangkat ini dirancang untuk digunakan dalam kondisi bergerak menggunakan sepeda dan dilengkapi dengan modul GPS, SD card untuk pencatatan data lokal, serta konektivitas MQTT ke ThingSpeak. Evaluasi dilakukan melalui uji fungsionalitas, akurasi, reliabilitas, serta analisis variabilitas data menggunakan metode statistik, yaitu perhitungan standar deviasi dan koefisien variasi (CV). Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai koefisien variasi meningkat secara signifikan dalam kondisi spasial: suhu meningkat sebesar 836,23%, kelembapan 775,89%, tekanan udara 3100%, dan CO sebesar 80,29% dibanding kondisi statis. Akurasi pengukuran tekanan udara terhadap nilai teoritis mencapai 99,87%, dengan tingkat reliabilitas pencatatan data sebesar 98,51% untuk data logger lokal dan 94,28% untuk transmisi ke ThingSpeak. Dengan demikian, perangkat dinilai mampu mengukur dinamika indikator cuaca mikro secara efektif dan layak untuk dikembangkan lebih lanjut dalam konteks pemantauan lingkungan perkotaan.

Kata kunci: *mobile sensing*, cuaca mikro, *data logger*, pengukuran spasial

ABSTRACT

DEVELOPMENT OF A MOBILE WEATHER INDICATOR MEASUREMENT DEVICE: A CASE STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF BANDAR LAMPUNG

By

Leon Pamungkas Hadi

This research aims to design and implement a mobile weather sensing device based on the ESP32 microcontroller, capable of measuring temperature, humidity, air pressure, and carbon monoxide (CO) concentration in real-time. The device was tested experimentally in Bandar Lampung using two measurement methods: static and spatial, by mounting the device on a bicycle. Data was recorded automatically every five seconds via an SD card module and transmitted to the ThingSpeak platform using the MQTT protocol. The evaluation included functionality, accuracy, reliability, and data variability analysis using statistical methods, namely standard deviation and coefficient of variation (CV). The results showed that the coefficient of variation increased significantly under spatial conditions: temperature by 836.23%, humidity by 775.89%, air pressure by 3100%, and CO by 80.29%, compared to static conditions. The accuracy of air pressure measurements reached 99.87%, with data logging reliability of 98.51% and cloud transmission reliability of 94.28%. These findings demonstrate the device's effectiveness in capturing microclimate dynamics and its feasibility for further development in urban environmental monitoring.

Keywords: mobile sensing, coefficient of variation, ESP32, microclimate, spatial

**PENGEMBANGAN PERANGKAT PENGUKURAN INDIKATOR CUACA
MOBILE DENGAN STUDI KASUS KARAKTERISTIK KOTA BANDAR
LAMPUNG**

Oleh

Leon Pamungkas Hadi

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul : **PENGEMBANGAN PERANGKAT
PENGUKURAN INDIKATOR CUACA
MOBILE DENGAN STUDI KASUS
KARAKTERISTIK KOTA BANDAR
LAMPUNG**

Nama Mahasiswa : **Leon Pamungkas Hadi**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1915031050**

Jurusan : **Teknik Elektro**

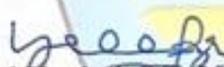
Fakultas : **Teknik**

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping

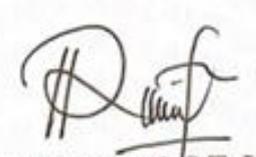

Yetti Yuniati, S.T., M.T.
NIP. 1980011 3200912 2 002

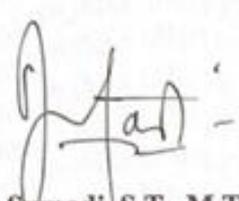

Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.
NIP. 19731128 199903 1 005

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ketua Program studi Teknik Elektro

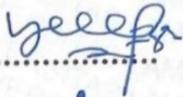

Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 19710314 199903 2 001


Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 19731104 200003 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Yetti Yuniati, S.T.,M.T.**


.....

Sekretaris : **Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.**


.....

Penguji : **Ing. Melvi, S.T., M.T., Ph.D.**


.....

2. Dekan Fakultas Teknik




Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)

NIP. 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **03 Juni 2025**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi yang saya buat dengan judul “PENGEMBANGAN PERANGKAT PENGUKURAN INDIKATOR CUACA *MOBILE* DENGAN STUDI KASUS KARAKTERISTIK KOTA BANDAR LAMPUNG” dibuat tidak berdasarkan karya yang pernah dilakukan oleh orang lain. Bahwa karya ini tidak terdapat karya lain atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan di dalam Daftar Pustaka. Selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 06 Juni 2025



Leon Pamungkas Hadi

NPM. 1915031050

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Pringsewu, Lampung, pada tanggal 24 Januari 2001 sebagai anak kedua dari 3 bersaudara, anak dari bapak Gunung Pranyoto Hadi dan ibu Syofni Rozalina. Pendidikan Sekolah Dasar penulis diselesaikan di SDN Fransiskus Pringsewu pada tahun 2013, Sekolah Menengah Pertama di SMP Xaverius Pringsewu pada tahun 2016 dan Sekolah Menengah Atas di SMAS Xaverius Pringsewu pada tahun 2019. Pada tahun 2019, penulis diterima di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN. Pada saat perkuliahan, penulis mengambil konsentrasi Teknik Telekomunikasi dan selama menjadi mahasiswa, penulis mengikuti organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro sebagai anggota Divisi Sosial dan Kewirausahaan pada periode 2019. Pada tahun 2022, penulis menjadi pelaksana program PPK Ormawa di Desa Canti, Lampung Selatan, sebagai bentuk pengabdian masyarakat yang berfokus pada pengembangan desa wisata pesisir berbasis mitigasi bencana. Selama enam bulan, penulis turut merancang sistem deteksi dini tsunami berbasis sensor dan memberikan edukasi tanggap darurat kepada warga. Kegiatan ini memperkaya wawasan penulis dalam manajemen proyek, komunikasi masyarakat, dan penerapan teknologi tepat guna di wilayah rawan bencana.

PERSEMBAHAN

**Damai dan ketenangan yang melampaui segala pengertian, kiranya
senantiasa menjaga hati dan pikiran kita dalam kebaikan dan kasih yang
sejati.**

Ku persembahkan karya ini kepada

Ayah dan Ibu Tercinta

Gunung Pranyoto dan Syofni Rosalina

Saudara-saudaraku serta Kerabat Tercinta

Alden Tristan

Sylva Rozaline

Elzio

Terima kasih untuk dukungan dan doa selama ini sehingga saya dapat
menyelesaikan tugas akhir ini

MOTTO

“We are born alone, we live alone, we die alone. Only through our love and friendship can we create the illusion for the moment that we’re not alone.”

—*Orson Welles*

“To survive is not to be weak, but to carry silent strength through invisible wars.”

—*Morgan Harper Nichols*

“The world’s full of lonely people afraid to make the first move.”

—*Tony Lip (Viggo Mortensen)*

“One more fucking love song, I’ll be sick.”

—*Maroon 5, "Payphone"*

“You either die a hero, or you live long enough to see yourself become the villain.”

—*Harvey Dent, "The Dark Knight"*

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas nikmat, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “Pengembangan Perangkat Pengukuran Indikator Cuaca *Mobile* Dengan Studi Kasus Karakteristik Kota Bandar Lampung” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan, bimbingan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Mama Sofie dan Papa, terima kasih tak terhingga atas cinta, doa, dan dukungan yang tak pernah putus.
2. Sylva, Alden, dan Zio, serta seluruh keluarga besar yang selalu hadir memberikan semangat dan kasih sayang
3. Etek Geby dan Mamok Nopem, terima kasih atas motivasi dan semangat yang tak pernah surut selama perjalanan kuliah hingga tugas akhir ini.
4. Pak Wo, terima kasih telah menjadi mentor dan penyemangat dalam perjalanan karier penulis.
5. Ibu Yetti Yuniati, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama yang selalu memberikan motivasi dan pandangan hidup, serta membimbing dengan tulus dan penuh kesabaran selama proses penelitian dan penulisan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., selaku dosen penguji yang telah meluangkan waktu untuk memberikan arahan, kritik, dan motivasi yang membangun sehingga proses perkuliahan, penelitian, dan penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

7. Ibu Melvi, S.T., M.T., selaku dosen penguji dan pembimbing akademik yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk mengikuti riset, serta atas segala bimbingan, nasihat, dan saran yang sangat berharga selama proses penyusunan skripsi ini.
8. Bapak Syaiful Alam, S.T., M.T., selaku dosen Pembimbing Akademik (PA) yang telah memberikan arahan, nasihat, dan bimbingan dengan tulus selama masa perkuliahan.
9. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.
10. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung, khususnya keluarga besar Konsentrasi Telekomunikasi, yang telah memberikan ilmu, arahan, dan inspirasi selama masa studi.
11. SIC Fams teman masa kecil, yang telah menjadi *support system* dalam hidup dan dalam karir serta dalam masa sulit.
12. Rekan-rekan UKM-PG, yang telah menjadi teman seperjuangan dan sumber semangat selama menjalani kehidupan kampus.
13. Denta Satya Prayoga, selaku *brother from another mother*, yang mengajarkan penulis arti sebuah *closure*.
14. Seluruh civitas akademik Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah mendukung proses akademik penulis selama ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang.

Akhir kata, semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya

Bandar Lampung, 12 Juni 2025

Penulis,

Leon Pamungkas Hadi
NPM. 1915031050

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR TABEL	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Rumusan Masalah	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terkait	6
2.2 Cuaca	11
2.2.1 Suhu	11
2.2.2 Kelembapan	11
2.2.3 Tekanan Udara	12
2.3 <i>Automatic Weather Station (AWS)</i>	12
2.4 Perangkat Keras	13
2.4.1 Mikrokontroler FireBeetle ESP32-E	13
2.4.2 <i>Environmental Sensor</i>	14
2.4.3 <i>Barometric Sensor</i>	15
2.4.4 Sensor Gas MQ-7	16
2.4.5 Gravity BME280 Sensor	17
2.4.6 Baterai Lithium-Ion	18
2.4.7 Modul GPS	19
2.4.8 I2C Multiplexer	19
2.4.9 Modul <i>SD Card</i>	20
2.4.10 Modul <i>Real-Time Clock (RTC)</i>	20
2.5 Arduino IDE	21
2.6 <i>Internet Of Things</i>	22
2.7 MQTT	22
2.8 ThinkSpeak	23
2.9 Metode Evaluasi	24
2.9.1 Kalibrasi	24
2.9.2 Reliabilitas	25
2.9.3 Durabilitas	25
2.9.4 Variabilitas Data	26

2.9.5	Estimasi Daya.....	27
III.	METODE PENELITIAN.....	28
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	28
3.2	Alat dan Bahan.....	28
3.3	Prosedur Penelitian.....	29
3.3.1	Tahapan Penelitian.....	31
3.3.2	Perancangan Alat.....	31
3.3.3	Implementasi Alat.....	31
3.3.4	Analisis dan Kesimpulan.....	32
3.4	Diagram Pengujian Alat.....	32
3.5	Perancangan Sistem.....	33
3.5.1	Rancangan Sistem Komunikasi.....	33
3.5.2	Perancangan Daya Sistem.....	37
3.5.3	Skenario Pengukuran Data.....	40
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	42
4.1	Realisasi Perangkat Keras.....	42
4.2	Realisasi Perangkat Lunak.....	43
4.3	Pengujian Sistem.....	48
4.2.1	Pengujian Fungsionalitas.....	48
4.2.2	Pengujian Reliabilitas.....	54
4.2.3	Pengujian Durabilitas.....	61
4.4	Data Hasil.....	62
4.5	Kendala Penelitian.....	88
4.5.1	Kendala Pada Proses Implementasi Perangkat.....	88
4.5.2	Kendala Pada Proses Pengujian Perangkat.....	90
4.5.3	Kendala Pada Proses Pengukuran.....	91
V.	PENUTUP.....	93
5.1	Kesimpulan.....	93
5.2	Saran.....	94
	DAFTAR PUSTAKA.....	95
	LAMPIRAN.....	98

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Penelitian Terdahulu.....	10
Gambar 2.2 <i>Automatic Weather Station(AWS)</i>	12
Gambar 2.3 Struktur FireBeetle ESP32-E	14
Gambar 2.4 <i>Environmental Sensor</i>	15
Gambar 2.5 <i>Barometric Sensor</i>	16
Gambar 2.6 Sensor MQ-7	17
Gambar 2.7 Gravity BME280 Sensor	18
Gambar 2.8 Modul GPS	19
Gambar 2.9 I2C Multiplexer	19
Gambar 2.10 Modul SD <i>Card</i>	20
Gambar 2.11 Modul RTC	20
Gambar 2.12 Tampilan Desktop Arduino IDE.....	21
Gambar 2.13 Cara Kerja Protokol MQTT	22
Gambar 2.14 <i>Dashboard</i> dari ThingSpeak.....	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan).....	30
Gambar 3.3 Diagram Pengujian Alat	32
Gambar 3.4 Diagram Perancangan Sistem Komnukasi	33
Gambar 3.5 Skema Komunikasi Sistem.....	35
Gambar 3.6 Skema Daya Perangkat.....	38
Gambar 3.7 Peta Skema Pengukuran	40
Gambar 4.1 Komponen Pengukuran Cuaca	42
Gambar 4.2 Perangkat Pengukuran Cuaca Pada Sepeda	43
Gambar 4.3 Konfigurasi WiFi dan MQTT.....	44
Gambar 4.4 Payload Data ThingSpeak	45
Gambar 4.5 Alamat API ThingSpeak.....	46
Gambar 4.6 Pengambilan Data JSON Pada Visual Studio Code	46
Gambar 4.7 <i>Payload Data Logger</i>	47
Gambar 4.8 Grafik Perbandingan Suhu Sensor	51
Gambar 4.9 Grafik Perbandingan Kelembapan Sensor	53
Gambar 4.10 Konsentrasi Data Hilang	56
Gambar 4.11 Grafik Tren Data <i>Commissioning</i> Suhu.....	57
Gambar 4.12 Grafik Tren Data <i>Commissioning</i> Kelembapan	58
Gambar 4.13 Grafik Tren Data <i>Commissioning</i> Tekanan Udara	59
Gambar 4.14 Grafik Tren Data <i>Commissioning</i> Kadar CO	60
Gambar 4.15 Grafik Tren Data <i>Commissioning</i> Intensitas Cahaya	61
Gambar 4.16 Tren Data Suhu Tanggal 3 Sampai 7 Maret 2025	62

Gambar 4.17 Grafik Suhu 3 Maret 2025.....	64
Gambar 4.18 Tren Data Kelembapan Tanggal 3 Sampai 7 Maret 2025	67
Gambar 4.19 Grafik Kelembapan 3 Maret 2025.....	68
Gambar 4.20 Tren Data Tekanan Udara Tanggal 3 Sampai 7 Maret 2025	72
Gambar 4.21 Grafik Tekanan Udara 3 Maret 2025.....	73
Gambar 4.22 Tren Data Karbon Monoksida Tanggal 3 Sampai 7 Maret 2025.....	76
Gambar 4.23 Grafik Karbon Monoksida 3 Maret 2025	77
Gambar 4.24 Tren Data Intensitas Cahaya Tanggal 3 Sampai 7 Maret 2025	81
Gambar 4.25 Grafik Elevasi Terhadap Koodinat (<i>Latitude Dan Longitude</i>)	82
Gambar 4.26 Grafik Perbandingan Ketinggian.....	83
Gambar 4.27 Visualisasi Data GPS Pada 3 Maret 2025	84
Gambar 4.28 Visualisasi Data GPS Pada 4 Maret 2025	85
Gambar 4.29 Visualisasi Data GPS Pada 5 Maret 2025	86
Gambar 4.30 Visualisasi Data GPS Pada 6 Maret 2025	87
Gambar 4.31 Visualisasi Data GPS Pada 7 Maret 2025	88
Gambar 4.32 Pengubahan Inisiasi Kode Dari <i>Enivronmental Sensor</i>	89
Gambar 4.33 Potongan kode inisialisasi SD <i>Card</i> pada FireBeetle ESP32-E	89
Gambar 4.34 Hasil Data GPS Pengujian <i>Commisioning</i>	90

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terkait.....	8
Tabel 2.2 Spesifikasi <i>Environmental Sensor</i>	15
Tabel 2.3 Spesifikasi <i>Barometric Sensor</i>	16
Tabel 2.4 Sensor Gas MQ-7	17
Tabel 2.5 Spesifikasi Gravity BME280	18
Tabel 3.1 Komponen dan Perangkat Lunak	28
Tabel 3.2 Kebutuhan Daya Setiap Komponen	37
Tabel 4.1 Library Pada Perangkat Pengukuran Cuaca	44
Tabel 4.2 Data Suhu Sensor dengan Suhu Alat Terkalibrasi.....	50
Tabel 4.3 Data Kelembapan Sensor Dengan Kelembapan Alat Terkalibrasi	52
Tabel 4.4 Perbandingan Data ThingSpeak dan <i>Data Logger</i>	55
Tabel 4.5 Ketidaksesaian Baris Data Dan <i>Delay</i>	91
Tabel 4.6 Data Loss Dan <i>Missing Value</i>	92

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengukuran indikator cuaca seperti suhu, kelembapan, dan tekanan udara memiliki peran penting dalam memahami karakteristik sebuah lingkungan. Dalam skala mikro, fluktuasi indikator cuaca dapat terjadi secara signifikan akibat berbagai faktor lingkungan, seperti perbedaan tata ruang kota, kepadatan bangunan, vegetasi, dan elevasi. Oleh karena itu, diperlukan metode pengukuran yang lebih fleksibel dan dinamis untuk menangkap variabilitas indikator cuaca dalam berbagai kondisi spasial dan temporal.

Metode pengukuran yang selama ini digunakan masih banyak bergantung pada pengukuran statis, yang umumnya ditempatkan di area terbuka atau di atas bangunan. Meskipun metode ini mampu memberikan data akurat pada titik tertentu, keterbatasan cakupan geografis dan mobilitas membuatnya kurang optimal dalam menangkap perubahan indikator cuaca dalam skala mikro. Studi yang dilakukan oleh Kousis dkk pada tahun 2021 menunjukkan bahwa pengukuran statis tidak dapat merepresentasikan dinamika suhu, dan kelembapan lingkungan yang kompleks, terutama di area perkotaan dengan variasi morfologi yang signifikan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa fluktuasi suhu dan kelembapan sangat dipengaruhi oleh karakteristik lingkungan, seperti keberadaan bangunan tinggi, area hijau, dan tata guna lahan [1].

Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang lebih fleksibel dan mampu menangkap variasi indikator cuaca dengan cakupan lebih luas serta mobilitas yang lebih tinggi. Pendekatan *mobile sensing* menjadi solusi inovatif dalam pengukuran indikator cuaca dalam skala mikro. Studi oleh Chafer dkk pada tahun 2022

menyoroti bahwa pengukuran berbasis kendaraan atau *wearable sensing* dapat mengumpulkan data indikator cuaca secara *real-time* dengan resolusi spasial yang lebih tinggi, memungkinkan analisis karakteristik data di berbagai lokasi. Keunggulan dari sistem *mobile sensing* dibandingkan metode statis antara lain:

- Fleksibilitas cakupan geografis, memungkinkan pengukuran di area yang sulit dijangkau oleh sistem statis.
- Resolusi data yang lebih tinggi, dengan pengambilan data secara berkelanjutan di sepanjang jalur pemantauan, sehingga memberikan gambaran yang lebih detail terhadap variasi indikator data dalam skala mikro.
- Kemampuan menangkap lonjakan perubahan suhu dan kelembapan, terutama di daerah dengan kepadatan bangunan tinggi atau di ruang terbuka yang lebih rentan terhadap radiasi matahari langsung [2].

Dengan mempertimbangkan situasi yang telah diuraikan sebelumnya, muncul ide untuk melakukan penelitian lebih lanjut yang bertujuan untuk mengembangkan suatu perangkat baru yang lebih ekonomis serta mampu melakukan pengambilan data dalam bergerak atau spasial, Perangkat ini dirancang untuk mengumpulkan indikator suhu, kelembapan serta tekanan udara, dilengkapi dengan sensor yang mampu mengukur parameter penting seperti sensor gas untuk mengukur kadar gas karbon monoksida di daerah padat kendaraan dan perkotaan serta sensor *Global Positioning System* (GPS) berfungsi sebagai sensor yang memberikan titik koordinat sehingga memungkinkan analisis perubahan indikator cuaca dalam skala mikro .

Penelitian ini akan berfokus pada pengambilan data secara bergerak serta analisis *timestamps* untuk memahami pola fluktuasi indikator cuaca di lingkungan perkotaan. Dengan pengembangan perangkat ini, diharapkan dapat ditemukan solusi yang lebih efektif dan terjangkau untuk pengukuran indikator cuaca dalam skala mikro. Data yang dihasilkan juga diharapkan dapat memperluas pemahaman tentang perangkat *mobile sensing* dan digunakan dalam penelitian lebih lanjut untuk analisis tren cuaca di lingkungan perkotaan.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan perangkat mobile sensing yang mampu melakukan pengukuran indikator cuaca mikro secara *real-time* dengan sensor barometrik, sensor lingkungan dengan tambahan sensor gas.
2. Menganalisis karakteristik data berdasarkan *timestamp* yang dihasilkan untuk memahami pola fluktuasi suhu, kelembapan, dan tekanan udara dalam skala mikro dan berbagai kondisi lingkungan.
3. Mengevaluasi performa dan keandalan sistem melalui pengujian fungsionalitas, durabilitas, dan akurasi data yang dikumpulkan.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara merancang perangkat *mobile sensing* yang dapat mengukur suhu, kelembapan, dan tekanan udara secara *real-time* dalam kondisi bergerak?
2. Bagaimana pengaruh pergerakan perangkat terhadap akurasi dan keandalan data yang dikumpulkan dalam skala mikro?
3. Bagaimana cara menganalisis data temporal dari hasil pengukuran indikator cuaca menggunakan *timestamps* untuk memahami pola variasi indikator cuaca dalam skala mikro?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Indikator yang digunakan pada penelitian adalah konsentrasi gas karbon monoksida (CO), temperatur udara, kelembapan udara, intensitas ultraviolet, dan tekanan udara. Tanpa mencakup parameter lain seperti curah hujan, kecepatan angin, atau polutan udara lain.

2. Penelitian ini tidak berfokus pada prediksi cuaca (*forecasting*), tetapi hanya pada pengukuran karakteristik indikator cuaca dalam skala mikro dan analisis pola variabilitasnya.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan perangkat *mobile sensing* yang mampu mengambil data dalam keadaan bergerak secara *real-time*.
2. Data yang dihasilkan dapat dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti studi urban mikroklimat, pengelolaan lingkungan perkotaan, dan pengembangan sistem pemantauan cuaca berbasis mobile.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut

I. PENDAHULUAN

Pada pendahuluan memuat latar belakang, tujuan, manfaat, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

II. TINJAUAN MASALAH

Pada tinjauan masalah memaparkan tentang teori-teori yang mendukung mengenai perancangan perangkat pengukuran cuaca serta penjelasan umum mengenai perangkat keras dan perangkat lunak yang akan digunakan.

III. METODE PENELITIAN

Pada metode penelitian memuat tentang waktu, tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan, garis besar pada metode yang diusulkan serta diagram alir penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada hasil dan pembahasan memuat tentang hasil penelitian, pembahasan dan perhitungan terhadap kinerja yang diusulkan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada kesimpulan dan saran memuat kesimpulan dari penelitian yang dilakukan dan saran yang didasarkan pada hasil yang telah didapatkan untuk pengembangan penelitian lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Dalam konteks penelitian, merujuk kepada kajian terdahulu menjadi suatu hal yang sangat krusial untuk menghindari plagiarisme atau duplikasi penelitian sebelumnya. Selain itu, merujuk kepada penelitian sebelumnya juga memiliki tujuan penting dalam mendorong perkembangan penelitian secara berkelanjutan. Oleh karena itu, berikut ini kami sertakan beberapa studi terdahulu yang relevan.

Pada penelitian yang berjudul “*Investigation of CO₂ Variation and Mapping Through Wearable Sensing Techniques for Measuring Pedestrians’ Exposure in Urban Areas*” yang dilakukan oleh Ilaria Pigliautile, G. Marseglia, dan Anna Laura Pisello (2020). Dalam penelitian ini dilengkapi sensor CO₂, suhu udara, kelembapan, kecepatan dan arah angin, serta radiasi matahari. Sistem ini dirancang untuk dipasang pada helm sepeda dan mengukur data di area dengan lalu lintas padat di Roma selama jam sibuk. Hasil menunjukkan konsentrasi CO₂ rata-rata 450 ppm, dengan akurasi $\pm 2\%$ peningkatan signifikan di area kemacetan. Hasil spesifik tentang konsentrasi CO₂ tidak disebutkan, sistem ini menunjukkan kemampuan untuk memantau level CO₂ dari perspektif pejalan kaki di area perkotaan [3].

Selanjutnya penelitian berjudul “*A Mobile Vehicle-Based Methodology for Dynamic Microclimate Analysis*” yang dilakukan oleh I. Kousis, I. Pigliautile, dan A. L. Pisello (2021). Penelitian ini menggunakan sensor yang dipasang pada kendaraan untuk mengukur suhu udara, kelembapan, tekanan udara, dan kecepatan angin di lingkungan perkotaan. Hasil menunjukkan bahwa suhu udara bervariasi secara signifikan antar wilayah, dengan perbedaan suhu 1,6°C di pusat kota Perugia dibandingkan dengan daerah pinggiran kota. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan metode *mobile sensing* dapat menangkap fluktuasi suhu dan

kelembapan lebih akurat dibandingkan metode statis [1].

Penelitian berjudul “*Mobile measurements of microclimatic variables through the central area of Singapore: An analysis from the pedestrian perspective*” penelitian yang dilakukan oleh M. Chàfer dkk (2022). Pada penelitian ini perangkat dilengkapi dengan sensor suhu udara, kelembapan relatif, suhu bola global, dan kecepatan angin, yang dipasang pada tripod setinggi 1,6 meter. Data dikumpulkan setiap menit di sepanjang jalur berjalan yang telah ditentukan di pusat kota Singapura, dengan fokus pada empat tata letak perkotaan: taman kota, dua zona bangunan padat, dan area terbuka dengan badan air. Analisis data menunjukkan bahwa bayangan dari bangunan dan vegetasi menurunkan suhu udara siang hari hingga 4,5°C, dan efek pendinginan dari vegetasi mencapai 4°C pada siang hari dan 1°C pada malam hari [2].

Penelitian oleh I. Requena-Ruiz, T. Leduc, dan D. Siret pada tahun 2023 yang berjudul “*Une méthodologie d’analyse des dispositifs de rafraîchissement estival basée sur la métrologie climatique mobile*”. Penelitian ini menggunakan sensor bergerak yang mengukur suhu, kelembapan, radiasi matahari, dan kecepatan angin di sekitar perangkat pendingin di ruang publik. Tujuannya adalah untuk menguji efektivitas perangkat pendingin dalam menurunkan suhu selama periode panas di kota. Pengukuran menunjukkan bahwa perangkat pendingin yang diuji hanya mampu menurunkan suhu sebesar 1-3°C, Data yang terkumpul dianalisis menggunakan *platform* berbasis *cloud*, memberikan pemahaman tentang efektivitas alat pendingin ini dalam mengatasi panas kota [4].

Tabel 2.1 Penelitian Terkait menyajikan beragam hasil penelitian dari rentang tahun 2020-2023, memberikan wawasan terhadap sistem monitoring yang telah dilakukan dengan metode-metode yang ada. Sebagai sumber acuan utama, tabel ini tidak hanya menyediakan data terkini, melainkan juga menggambarkan secara lebih mendalam tentang aspek-aspek terkait di dalam monitoring indikator cuaca.

Tabel 2.1 Penelitian Terkait

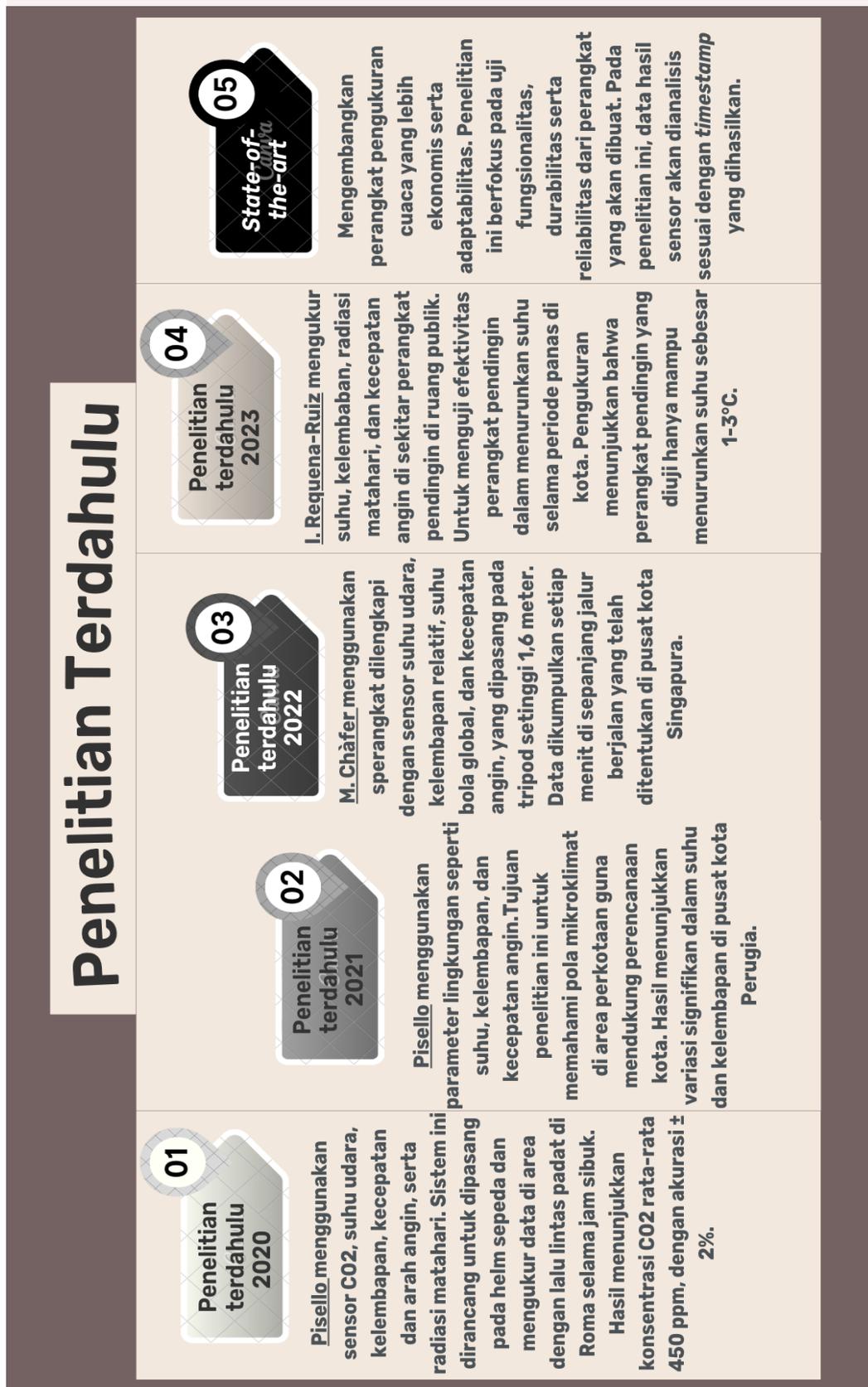
No	Judul Jurnal	Penulis/Tahun	Metode	Hasil
1	<i>Investigation of CO2 Variation and Mapping Through Wearable Sensing Techniques for Measuring Pedestrians' Exposure in Urban Areas</i>	Ilaria Pigliautile, G. Marseglia, dan A. L. Pisello (2020)	Perancangan perangkat keras dan lunak serta pengumpulan data hasil.	Hasil konsentrasi CO2 rata-rata 450 ppm, dengan akurasi $\pm 2\%$ peningkatan signifikan di area kemacetan.
2	<i>A Mobile Vehicle-Based Methodology for Dynamic Microclimate Analysis.</i>	I. Kousis, I. Pigliautile, dan A. L. Pisello (2021)	Perancangan perangkat keras dan lunak serta pengumpulan data hasil	Hasil menunjukkan variasi signifikan dalam suhu dan kelembapan antar wilayah, seperti penurunan suhu 1,6°C di pusat kota Perugia.
3	<i>Mobile measurements of microclimatic variables through the central area of Singapore: An analysis from the pedestrian perspective</i>	M. Chàfer dkk (2022)	Perancangan perangkat keras dan lunak serta pengumpulan data hasil	Hasil menunjukkan bangunan dan vegetasi menurunkan suhu udara siang hari hingga 4,5°C, dan efek pendinginan dari vegetasi mencapai 4°C pada siang hari dan 1°C pada malam hari.
4	<i>Une méthodologie d'analyse des dispositifs de rafraîchissement estival basée sur la métrologie climatique mobile</i>	I. Requena-Ruiz, T. Leduc, dan D. Siret (2023)	Perancangan perangkat keras dan lunak serta pengumpulan data hasil	Hasil menunjukkan pengukuran menunjukkan bahwa perangkat pendingin yang diuji hanya mampu menurunkan suhu sebesar 1-3°C,

Dari hasil penelitian terdahulu, teridentifikasi kelemahan utama terkait aspek ekonomis dan cakupan pengukuran indikator cuaca dalam skala mikro. Penggunaan *embedded sensor* dalam metode mobile sensing berbasis kendaraan, seperti pada studi "*A Mobile Vehicle-Based Methodology for Dynamic Microclimate Analysis*"

oleh Kousis et al. (2021), memerlukan biaya yang cukup tinggi dalam implementasi dan perawatannya. Selain itu, metode ini memiliki keterbatasan dalam menjangkau area dengan akses terbatas, seperti gang sempit, jalur pejalan kaki, dan ruang terbuka dengan infrastruktur terbatas. Keterbatasan ini menunjukkan bahwa solusi yang lebih ekonomis, ringan, dan fleksibel dibutuhkan untuk mendukung pemantauan indikator cuaca dalam berbagai kondisi lingkungan, terutama di kota-kota kecil dan daerah dengan keterbatasan infrastruktur.

Selain itu, penelitian Chàfer et al. (2022) menunjukkan bahwa metode *mobile sensing* berbasis *wearable* dapat menangkap variabilitas suhu dan kelembapan dengan lebih baik dibandingkan metode statis. Namun, cakupan pengukuran pada penelitian tersebut masih terbatas, karena tidak mencakup tekanan udara sebagai indikator cuaca utama yang penting dalam memahami dinamika di lingkungan perkotaan.

State-of-the-art dalam penelitian ini adalah pengembangan perangkat *mobile sensing* yang lebih ekonomis dan adaptif untuk pengukuran indikator cuaca dalam skala mikro. Penelitian ini berfokus pada uji fungsionalitas, durabilitas, serta reliabilitas perangkat. Selain itu, penelitian ini menambahkan karakteristik baru pada perangkat bergerak yang lebih portabel dan fleksibel, memungkinkan pengukuran di berbagai medan, termasuk jalur sempit dan ruang terbuka yang sulit dijangkau oleh metode berbasis kendaraan. Data yang dihasilkan oleh sensor akan dianalisis berdasarkan *timestamp*, sehingga memungkinkan pemahaman lebih mendalam mengenai pola variabilitas suhu, kelembapan, dan tekanan udara dalam skala mikro.



Gambar 2.1 Penelitian Terdahulu

2.2 Cuaca

Menurut C. D. Ahrens, cuaca adalah kondisi atmosfer pada suatu waktu dan tempat tertentu, termasuk suhu, kelembapan, tekanan udara, dan angin, yang dapat berubah-ubah dari hari ke hari atau bahkan dari jam ke jam [5]. Indikator cuaca meliputi berbagai faktor seperti suhu udara, tekanan udara, angin, kelembapan udara, curah hujan, sudut datang matahari, tinggi permukaan daratan, dan sifat permukaan. Semua faktor ini berperan dalam membentuk kondisi atmosfer, termasuk suhu, kelembapan, dan kondisi cuaca secara keseluruhan di suatu tempat.

2.2.1 Suhu

Suhu memiliki berbagai macam pengertian. Dalam Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), suhu diartikan sebagai ukuran kuantitatif dari temperatur, panas atau dingin, dan diukur menggunakan termometer [6]. Suhu juga bisa diartikan sebagai panas atau dinginnya udara yang dinyatakan dengan satuan derajat tertentu. Suhu nilai yang mencerminkan sejauh mana suatu objek atau lingkungan terasa panas atau dingin, dan dapat diukur dengan skala tertentu [5]. Untuk menyatakan suhu udara dipakai berbagai skala. Untuk mengukur suhu, dua skala yang paling umum digunakan adalah skala *Fahrenheit*, yang digunakan di Inggris Raya, dan skala *Celcius*, juga dikenal sebagai skala perseratusan, atau centigrade, yang digunakan oleh sebagian besar orang di seluruh dunia.

2.2.2 Kelembapan

Kelembapan adalah konsentrasi uap air di udara. Uap air di atmosfer dapat berubah menjadi cair atau padat, dan kemudian jatuh ke bumi. Kelembapan absolut, kelembapan spesifik, atau kelembapan relatif adalah tiga cara yang dapat digunakan untuk menggambarkan angka konsentrasi ini. Secara matematis kelembapan relatif (RH) didefinisikan sebagai persentase perbandingan antara tekanan uap air parsial dengan tekanan uap air jenuh [7]. Kelembapan relatif menggambarkan seberapa dekat udara dengan mencapai kondisi jenuh (100% kelembapan relatif) di mana uap air mulai mengondensasi menjadi bentuk cairan. Kelembapan relatif dihitung

dengan membandingkan tekanan parsial uap air aktual dalam udara e , dengan tekanan parsial uap air jenuh pada suhu yang sama (e_s), dan kemudian hasilnya dikalikan dengan 100%.

2.2.3 Tekanan Udara

Tekanan udara merupakan massa udara dari permukaan bumi yang bergerak sangat cepat atau lambat dari suatu tekanan permukaan tinggi ke tekanan permukaan rendah [5]. Suhu, lintang bumi, pergeseran posisi matahari setiap tahun, dan persebaran daratan dan lautan adalah beberapa faktor yang mempengaruhi tekanan udara, yang merupakan indikator penting dalam proses pengamatan cuaca. Tempat dan waktu juga mempengaruhi tekanan udara. Besar akan berbeda di berbagai tempat dan waktu. Tekanan udara di suatu tempat menjadi lebih tidak terkendali ketika suhunya meningkat, tetapi ketika suhunya tetap stabil, tekanan udara cenderung lebih stabil [8].

2.3 *Automatic Weather Station (AWS)*

Automatic Weather Station (AWS) merupakan inovasi teknologi yang signifikan dalam bidang meteorologi. AWS memungkinkan pengumpulan, pengukuran, dan analisis data cuaca secara otomatis dan *real-time* [9][10]. Gambar 2.2 memperlihatkan gambar dari AWS



Gambar 2.2 *Automatic Weather Station (AWS)* [10]

Komponen utama AWS biasanya meliputi, sensor lingkungan (suhu, kelembapan, tekanan udara, angin dan hujan, catu daya, dan *data logger* serta modul komunikasi. AWS memiliki aplikasi luas dalam berbagai bidang. Dalam pertanian, AWS membantu petani dalam memantau kondisi cuaca untuk pengambilan keputusan yang lebih baik terkait penanaman dan irigasi. Dalam penelitian ilmiah, AWS menyediakan data yang akurat untuk studi iklim dan lingkungan. Selain itu, AWS juga digunakan dalam pemantauan bencana alam, seperti badai dan banjir, yang dapat membantu dalam mitigasi risiko dan perencanaan darurat.

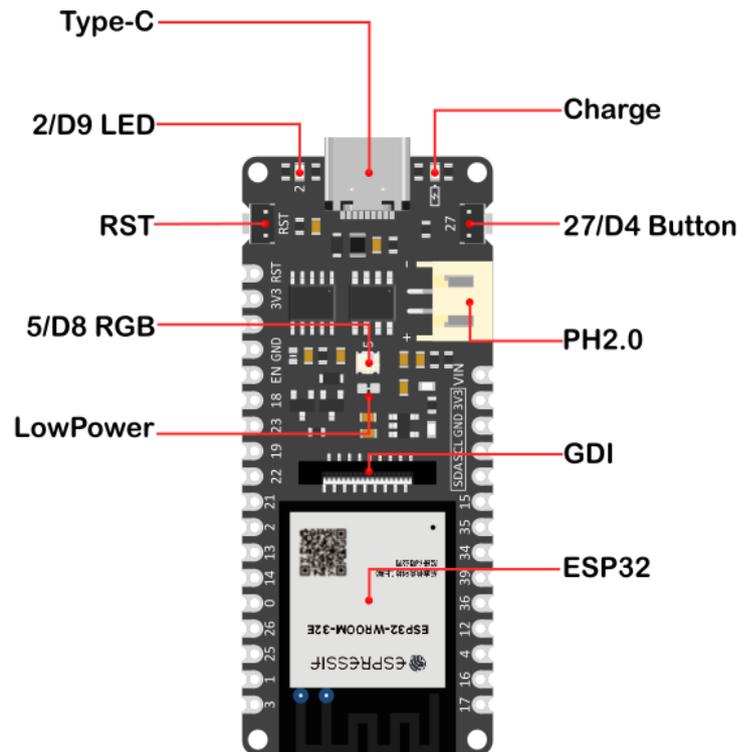
2.4 Perangkat Keras

Perangkat keras adalah perangkat atau sensor yang digunakan untuk mendapatkan data terkait fenomena tertentu. Sensor ini merespon perubahan dalam variabel fisik atau lingkungan yang kemudian diubah menjadi data tertentu. Sensor dapat mengukur berbagai parameter seperti suhu, tekanan, gerakan dan lainnya.

2.4.1 Mikrokontroler FireBeetle ESP32-E

FireBeetle ESP32-E mendukung teknologi *Wi-Fi* dengan *sistem-on-a-chip* (SoC) yang cukup murah dan tidak membutuhkan banyak daya. Selain itu, perangkat ini dapat mengirim data jarak jauh, yang memungkinkan data disimpan dan diakses dari mana saja [11]. ESP32-E mendukung banyak perangkat keras tambahan dan memiliki banyak *port I/O*. Arsitektur *dual-core* yang kuat, dukungan untuk jaringan nirkabel, dan kemampuan pemrosesan *real-time* adalah beberapa keuntungan ESP32-E.

Dukungan terhadap *Wi-Fi* 802.11 b/g/n dan *Bluetooth* 4.2 memungkinkan FireBeetle ESP32-E untuk berfungsi dalam skenario *real-time* seperti sistem monitoring. Selain itu, FireBeetle ESP32-E dirancang dengan konsumsi daya rendah melalui beberapa mode hemat energi seperti *deep-sleep* dan *light-sleep*, yang sangat berguna untuk aplikasi monitoring berbasis baterai dalam jangka waktu panjang. Gambar dari FireBeetle ESP32-E yang dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Struktur FireBeetle ESP32-E [11]

Mengacu pada Gambar 2.3, FireBeetle ESP32-E adalah suatu mikrokontroler yang dilengkapi dengan sebuah prosesor *dual-core* IC Tensilica LX6. Modul ini menyediakan 29 pin, terdiri dari 18 pin digital dan 11 pin analog, serta memiliki kapasitas *Flash* sebesar 32Mbit. FireBeetle ESP32-E memiliki *port-port* yang tersedia seperti *USB-Type C* sebagai media untuk mentransfer data serta daya dan PH2.0 digunakan sebagai konektor dengan *pitch* dalam koneksi internal dan terdapat lampu *RGB WS2812 LED*. RST yang merujuk pada pin reset [11].

2.4.2 *Environmental Sensor*

Environmental Sensor adalah sensor yang dirancang untuk mendeteksi dan mengukur berbagai parameter atau kondisi dalam lingkungan sekitarnya. Sensor ini mengintegrasikan beberapa sensor lingkungan, termasuk sensor suhu dan kelembapan SHT C3, sensor tekanan atmosfer BMP280, sensor cahaya VEML7700, dan sensor ultraviolet (V1.0: ML8511, V2.0: LTR390-UV-01) [12]. Gambar 2.4 memperlihatkan gambar dari *environmental sensor* dari DFRobot yaitu jenis SEN0501.



Gambar 2.4 *Environmental Sensor* [12]

Merujuk pada Gambar 2.4, *environmental sensor* yang digunakan memiliki ketahanan yang cukup baik dimana sensor ini dapat bekerja -20°C to 70°C . Sensor ini mendukung mode keluaran I2C dan UART, yang dapat diubah dengan menggunakan saklar. Berikut pada Tabel 2.2 spesifikasi dari sensor secara lebih lanjut.

Tabel 2.2 Spesifikasi *Environmental Sensor* [12]

Nama	Spesifikasi
Tegangan Input	3.3÷5VDC
Jenis <i>Interface</i>	I2C, UART
Dimensi	12.5mm x 12.5mm x 5.5mm
Rentang Pengukuran Tekanan	3000~1100 hpa
Rentang Pengukuran Kelembapan	0~100% RH
Rentang Pengukuran Suhu	$-40\sim 125^{\circ}\text{C}$
Rentang Gelombang Sinar (UV)	280-430 nm
Resolusi	12-bit

2.4.3 *Barometric Sensor*

Sensor tekanan barometrik adalah jenis sensor yang dirancang khusus untuk mengukur tekanan atmosfer pada suatu lokasi tertentu. Cara kerja sensor tekanan barometrik didasarkan pada perubahan tekanan udara dengan ketinggian. Pada Gambar 2.5, terlihat dengan jelas representasi dari *barometric sensor* dari Dfrobot BMP388 dimana sensor ini memiliki resolusi yang lebih tinggi, kecepatan

pengambilan data yang lebih tinggi, dan konsumsi daya yang lebih rendah dibandingkan dengan versi sebelumnya dari BMP180 dan BMP280.



Gambar 2.5 *Barometric Sensor* [13]

Gambar 2.5 di atas merupakan bentuk dari *barometric sensor*, sensor ini dilengkapi dengan *interface* data I2C dengan tegangan operasional modul ini berkisar antara 3,3V hingga 5V. *Barometric sensor* dapat mengukur tekanan atmosfer dengan rentang 30 hingga 125 kPa [13]. Detail spesifikasi dari *barometric sensor* dari Dfrobot BMP388 dijabarkan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifikasi *Barometric Sensor* [13]

Nama	Spesifikasi
Tegangan Suplai	3,3V hingga 5V
Komunikasi Antarmuka	I2C (SCL, SDA)
Akurasi Relatif	± 8 Pa ($\pm 0.50\%$ @700-900hPa, 25oC-40oC)
Akurasi Absolut	± 50 Pa (0 oC-65 @300-1100 hPa)
Offset Koefisien Suhu	± 0.75 Pa/K (-20 oC-65 oC @700-1100 hPa)
Dimensi	5,0mm x 5,0mm x 0,8mm
Frekuensi Operasi	400 kHz (I2C)

2.4.4 Sensor Gas MQ-7

Sensor gas MQ-7 adalah sensor gas yang terkenal digunakan untuk mendeteksi gas karbon monoksida. Sensor ini sangat cocok digunakan dalam proyek-proyek yang memerlukan pemantauan kualitas udara, deteksi gas, dan aplikasi IoT yang melibatkan pengukuran karbon monoksida [14]. Sensor ini menggunakan komunikasi analog untuk mengirimkan data serta keunggulan yaitu konsumsi daya

rendah, dan kemampuan untuk memberikan pembacaan gas secara akurat. Gambar 2.6 memperlihatkan gambar dari sensor gas MQ-7. Tabel 2.4 spesifikasi dari sensor gas MQ-7 secara lebih lanjut.



Gambar 2.6 Sensor MQ-7 [14]

Tabel 2.4 Sensor Gas MQ-7 [14]

Nama	Spesifikasi
Tegangan Input	3.3÷5VDC
Konsentrasi yang Dideteksi	20 ppm hingga 2000 ppm
Waktu Pemanasan	60 detik
Rentang Suhu Operasi	-20°C hingga +50°C
Kelembapan Operasi	≤ 95% RH
Sinyal Output	Analog
Dimensi	Diameter: 16 mm, Tinggi: 9 mm

2.4.5 Gravity BME280 Sensor

BME280 adalah sensor lingkungan yang terintegrasi dengan sensor suhu, humiditas, dan barometer. Sensor memiliki ketepatan tinggi, berbagai fungsi, dan faktor bentuk yang kecil. Dengan menyediakan *interface* SPI dan I2C, membuat pembuatan prototipe yang cepat menjadi mudah. Pada Gambar 2.7, terlihat dengan jelas representasi dari sensor lingkungan Gravity I2C BME280 didasarkan pada sistem MEMS terbaru BoSCH (*Micro-Electro-Mechanical System*) [15].



Gambar 2.7 Gravity BME280 Sensor [15]

Pada Gambar 2.7 di atas, dapat dilihat bentuk sensor Gravity BME280, sensor ini memiliki koefisien suhu offset ± 1.5 Pa/K, yang sama dengan $\pm 12,6$ cm pada perubahan suhu 1°C . Akibatnya, bentuk yang stabil dan multifungsi BME280 dapat digunakan dalam banyak situasi. Sensor ini memiliki tegangan operasional modul ini berkisar antara 3,3V hingga 5V. Detail spesifikasi Gravity BME280 sensor dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Spesifikasi Gravity BME280 [15]

Nama	Spesifikasi
Tegangan Input	3.3÷5VDC
Jenis <i>Interface</i>	I2C dan SPI
Dimensi	22mm x 25mm
Rentang Pengukuran Tekanan	3000~1100 hpa.
Rentang Pengukuran Kelembapan	0~100% RH resolusi 0,1%RH, deviasi $\pm 2\%$ RH
Waktu Sampling Kelembapan	1 detik
Rentang Pengukuran Suhu	-40~80°C, resolusi 0,1°C, deviasi $\pm 0,5^\circ\text{C}$

2.4.6 Baterai Lithium-Ion

Baterai lithium-ion (Li-ion) adalah jenis baterai yang menggunakan teknologi lithium-ion untuk menyimpan dan melepaskan energi melalui reaksi kimia. Secara spesifik, baterai ini terdiri dari sel galvanik yang mengandung elektroda positif (katoda) yang terbuat dari senyawa lithium dan elektroda negatif (anoda) [16]. Saat baterai di-*cycled*, lithium-ion bertukar antara elektroda positif dan negatif, menghasilkan arus listrik.

2.4.7 Modul GPS

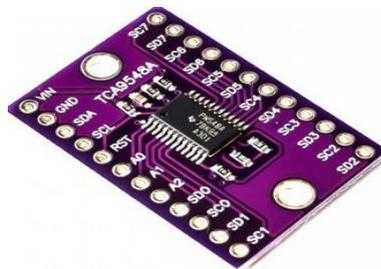
Modul GPS adalah sebuah perangkat elektronik yang digunakan untuk menerima sinyal dari satelit GPS guna menentukan lokasi, kecepatan, arah, dan waktu [17]. Modul GPS yang dapat dilihat pada Gambar 2.8 umumnya digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk navigasi kendaraan, pelacakan, pemetaan, dan perangkat elektronik konsumen.



Gambar 2.8 Modul GPS [17]

2.4.8 I2C Multiplexer

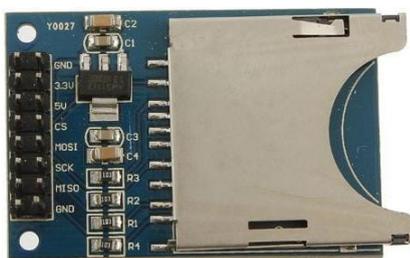
I2C Multiplexer adalah komponen digunakan untuk mengatasi keterbatasan alamat pada protokol komunikasi I2C, sehingga memungkinkan beberapa perangkat dengan alamat I2C yang sama untuk dihubungkan ke satu mikrokontroler. I2C Multiplexer yang dilihat pada Gambar 2.9 digunakan agar beberapa sensor yang memiliki alamat komunikasi serupa dapat bekerja secara bersamaan tanpa konflik data, sehingga mendukung pengambilan data secara efisien.



Gambar 2.9 I2C Multiplexer [18]

2.4.9 Modul SD Card

Modul SD Card adalah sebuah perangkat yang dirancang untuk membaca dan menulis serta menyimpan data pada kartu SD dengan bantuan mikrokontroler. Modul ini bekerja dengan protocol pengiriman SPI (*Serial Peripheral Interface*) yang terdiri dari beberapa pin utama, yaitu MOSI, MISO, SCK, dan CS. Modul SD Card yang ditunjukkan pada Gambar 2.10 bekerja dengan tegangan masukan yang umumnya berkisar pada tegangan 3.3v sampai 5v.



Gambar 2.10 Modul SD Card [19]

2.4.10 Modul Real-Time Clock (RTC)

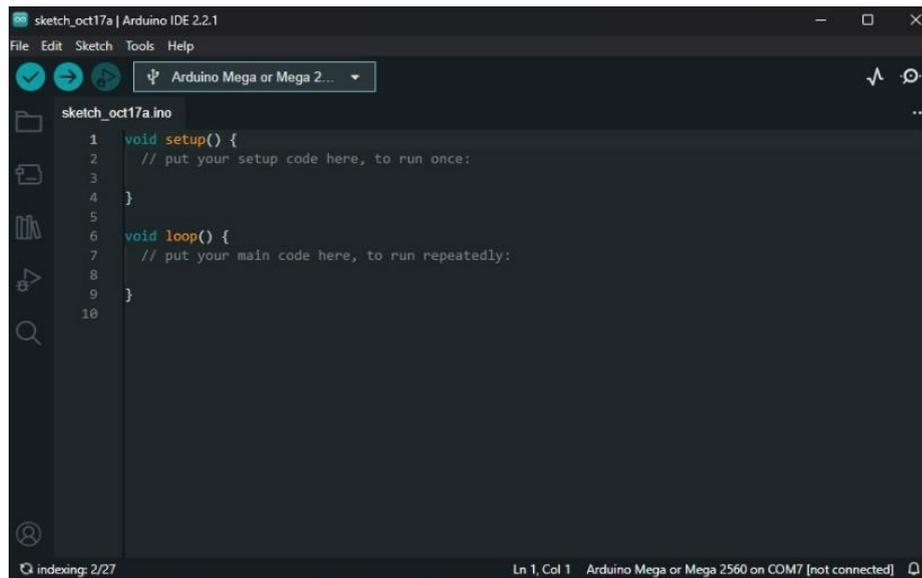
Modul RTC merupakan sebuah perangkat yang dirancang untuk menyediakan fungsi penghitungan waktu secara *real-time* menggunakan osilator kristal sebagai pengatur frekuensi, sehingga dapat menjaga akurasi waktu dalam jangka panjang. RTC bekerja secara independen dari sistem utama karena memiliki sumber daya terpisah, seperti baterai koin, yang memungkinkan modul ini untuk tetap beroperasi bahkan ketika perangkat utama dimatikan atau tidak mendapatkan daya. Modul RTC bekerja dengan protokol pengiriman I2C pada tegangan 3.3v sampai 5v yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 sebagai berikut.



Gambar 2.11 Modul RTC [20]

2.5 Arduino IDE

Arduino IDE yang merupakan singkatan dari *Integrated Development Environment* (IDE), adalah perangkat lunak yang berperan sebagai perantara antara *compiler* Arduino dan mikrokontroler [21]. Desktop Arduino IDE, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.12, menyediakan antarmuka yang memungkinkan para pengembang untuk menulis, mengedit, dan mengunggah kode ke papan Arduino dengan mudah.



Gambar 2.12 Tampilan Desktop Arduino IDE

Gambar 2.12 yaitu bentuk *dashboard* dari Arduino IDE, fungsinya mencakup pemrograman dan pengembangan perangkat keras, memastikan integrasi yang efisien antara kode yang ditulis dan eksekusi pada mikrokontroler Arduino. Bahasa pemrograman yang digunakan dalam Arduino IDE berbasis bahasa C/C++, dan sintaksis yang digunakan pada kode Arduino sebagian besar mengikuti standar bahasa C/C++.

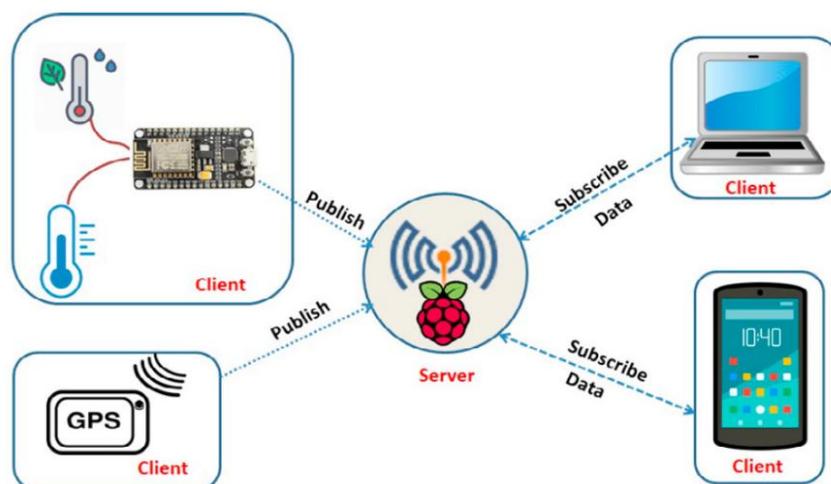
Meskipun demikian, terdapat fungsi dan pustaka (*library*) yang telah diatur khusus untuk mempermudah pengembangan perangkat keras menggunakan papan mikrokontroler Arduino [22]. Dalam penulisan kode Arduino, umumnya Anda akan menentukan dua fungsi utama, yaitu *setup()* dan *loop()*. Fungsi *setup()* digunakan untuk inisialisasi perangkat keras dan perangkat lunak saat papan Arduino pertama kali dihidupkan. Di sisi lain, fungsi *loop()* merupakan inti dari program yang akan dieksekusi berulang sesuai dengan prinsip *loop* atau pengulangan.

2.6 Internet Of Things

Internet of Things (IoT) adalah ketika objek fisik dapat terhubung ke internet dan berbagi data satu sama lain. *Internet of Things* (IoT) merujuk pada jaringan yang terdiri dari perangkat fisik, kendaraan, peralatan, dan objek fisik lainnya yang memiliki sensor, perangkat lunak, dan koneksi jaringan yang memungkinkan mereka untuk mengumpulkan dan berbagi data. Cara kerja IoT dimulai dengan sensor yang menangkap data tertentu, seperti suhu, kelembapan, atau posisi. Data tersebut kemudian dikirim ke mikrokontroler. Setelah diproses, data dikirimkan ke server melalui jaringan internet. Di server, data dapat disimpan, dianalisis, atau digunakan untuk mengontrol perangkat lain. Intinya, IoT bekerja dengan mengintegrasikan perangkat fisik, mikrokontroler, jaringan internet, dan server, sehingga perangkat-perangkat ini dapat saling berkomunikasi secara otomatis.

2.7 MQTT

MQTT adalah singkatan dari *Message Queuing Telemetry Transport*, protokol komunikasi yang dirancang untuk koneksi mesin-ke-mesin (M2M). Protokol ini ringan dan efisien, memungkinkan pengiriman pesan dalam jaringan dengan *bandwidth* rendah dan keterlambatan yang rendah. Protokol ini menggunakan TCP sebagai protokol lapisan *transport* yang membuatnya lebih handal, dengan *header* yang kecil sehingga cocok untuk ekosistem IoT [23]. Berikut pada Gambar 2.13 memperlihatkan konsep dari protokol MQTT.



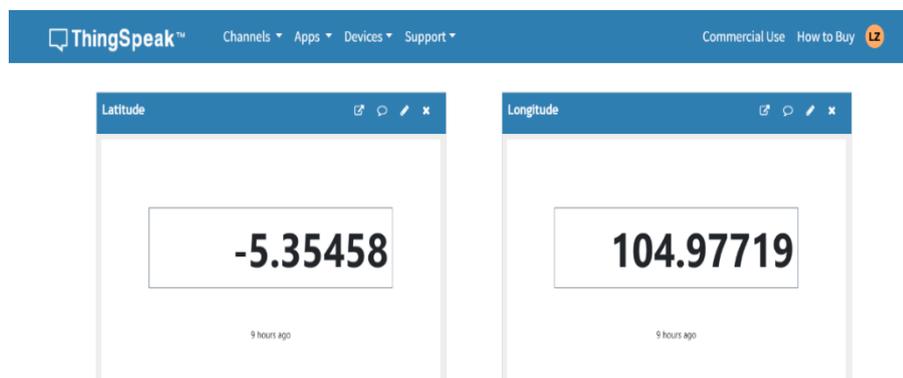
Gambar 2.13 Cara Kerja Protokol MQTT [23]

Tiga entitas utama, *publisher*, *subscriber*, dan *broker*, membentuk protokol MQTT sebagai jaringan komunikasi. Data dikumpulkan oleh penerbit dari berbagai sumber, seperti sensor dan perangkat lainnya, dan kemudian diterbitkan tentang topik tertentu. Misalnya, sensor suhu di kamar tidur dapat menerbitkan data pada topik "rumah/kamar/sensor suhu".

Menurut D. Silva, L. I. Carvalho, J. Soares, dan R. C. Sofia, protokol MQTT memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan protokol pengiriman data lainnya seperti HTTP dan CoAP. MQTT dirancang untuk penggunaan *bandwidth* yang rendah dengan header pesan yang kecil, membuatnya sangat efisien untuk lingkungan dengan keterbatasan koneksi internet. Model publish/subscribe yang digunakan oleh MQTT memungkinkan komunikasi asinkron, yang sangat berguna untuk aplikasi *real-time*. MQTT juga cocok untuk perangkat dengan sumber daya terbatas [24].

2.8 ThinkSpeak

ThingSpeak adalah *platform* berbasis *cloud* yang digunakan untuk menyimpan, menganalisis, dan memvisualisasikan data dari perangkat IoT secara *real-time*. Dalam penelitian ini, ThingSpeak digunakan sebagai media untuk menyimpan data yang dikirimkan oleh sensor melalui internet, sekaligus untuk menampilkan data tersebut dalam bentuk grafik atau visualisasi lainnya. Berikut pada Gambar 2.14 merupakan contoh *dashboard* dari ThingSpeak.



Gambar 2.14 *Dashboard* dari ThingSpeak

2.9 Metode Evaluasi

Metode evaluasi adalah proses yang digunakan untuk menilai kinerja, keandalan, dan efektivitas suatu alat atau *system*. Dalam proses penelitian dan pengembangan perangkat pengukuran cuaca, metode evaluasi sangat penting untuk memastikan bahwa perangkat tersebut berfungsi sesuai dengan spesifikasi dan memberikan data yang akurat dan dapat diandalkan. Berikut adalah beberapa metode evaluasi yang digunakan pada penelitian ini:

2.9.1 Kalibrasi

Kalibrasi adalah proses membandingkan keluaran sensor dengan standar referensi yang diketahui dan, jika diperlukan, melakukan penyesuaian terhadap alat tersebut. Proses ini membantu memastikan bahwa sensor memberikan hasil yang sesuai dengan nilai standar. Pada penelitian ini terdapat dua metode kalibrasi:

1. Membandingkan dengan Alat Standar

Kalibrasi dengan alat standar melibatkan pengukuran nilai dari alat yang sedang diuji dan membandingkannya dengan nilai dari alat referensi. Rumus yang digunakan adalah:

$$\text{Akurasi} = \frac{[\text{Nilai Terukur} - \text{Nilai Referensi}]}{\text{Nilai Referensi}} \times 100 \dots \dots \dots (2.1)$$

Menurut *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook* oleh John G. Webster, perhitungan akurasi dapat dikatakan berhasil jika hasil pengukuran mendekati nilai sebenarnya (mendekati 100%) dari yang diukur, dan ini dapat diekspresikan dalam batas kesalahan maksimum. Tetapi tidak ada menyatakan batasan spesifik mengenai nilai akurasi yang dianggap baik dan buruk [25].

2. Membandingkan dengan Nilai Teoritis

Kalibrasi dengan nilai teoritis melibatkan perbandingan hasil pengukuran sensor dengan nilai teoritis yang dihitung menggunakan model matematis. Pada penelitian ini kalibrasi dengan membandingkan nilai teoritis dengan nilai dari sensor menggunakan persamaan eksponensial tekanan udara [26]:

$$P(h) = P_0 \times e^{\frac{-h}{H}} \dots\dots\dots(2.2)$$

di mana:

$P(h)$: Tekanan udara pada ketinggian h .

P_0 : Tekanan udara standar di permukaan laut sebesar 101.325 Pa

h : Ketinggian lokasi (meter)

g : 9.80665 m/s² (Percepatan gravitasi),

R : 287.05 J/(kg·K) (Konstanta gas spesifik udara kering),

T : 288.15 K (Suhu dalam Kelvin standar permukaan laut),

H : $\frac{R \times T}{g}$ adalah skala tinggi atmosfer.

2.9.2 Reliabilitas

Reliabilitas penelitian adalah persentase data valid yang berhasil direkam oleh perangkat terhadap total data yang diharapkan selama proses pengukuran. Meskipun reliabilitas secara teori tidak sama dengan akurasi atau validitas data, ketersediaan data yang konsisten dan lengkap dalam jangka waktu tertentu dapat dianggap sebagai indikator reliabilitas operasional perangkat dalam sistem pemantauan berbasis sensor. Ini karena pendekatan ini berfokus pada kemampuan sistem sensor untuk beroperasi secara konsisten dan mencatat data tanpa gangguan. Reliabilitas dapat dihitung dengan rumus *data availability* sebagai berikut:

$$data\ availability = \frac{Data\ Valid}{Total\ Data\ yang\ Diharapkan} \times 100 \dots\dots\dots(2.3)$$

2.9.3 Durabilitas

Durabilitas merupakan ukuran ketahanan suatu perangkat terhadap faktor lingkungan dalam periode tertentu, umumnya diuji selama tiga hari hingga satu minggu. Untuk menguji durabilitas, dilakukan uji *commissioning*, yaitu pengujian awal suatu sistem atau perangkat sebelum digunakan secara penuh. Uji ini bertujuan untuk memastikan bahwa semua komponen bekerja sesuai spesifikasi yang dirancang serta mampu beroperasi secara stabil dalam kondisi lingkungan yang telah ditentukan.

2.9.4 Variabilitas Data

Untuk mengevaluasi akurasi dan konsistensi data yang diperoleh dari sensor, diperlukan analisis statistik terhadap variabilitas data. Metode ini menggunakan teknik statistik untuk menganalisis data yang dikumpulkan. Analisis data membantu dalam mengidentifikasi kesalahan, bias, dan tren dalam data yang dihasilkan oleh alat. Variabilitas akurasi dapat dihitung dengan rumus standar deviasi sebagai berikut:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots(2.4)$$

di mana:

- σ : nilai standar deviasi
- N : jumlah data
- x_i : nilai pengukuran individu
- \bar{x} : rata-rata nilai pengukuran

Nilai standar deviasi menyatakan bahwa seberapa besar variasi atau penyebaran dari sekumpulan data terhadap rata-ratanya, jadi semakin rendah nilai standar deviasi akan dianggap baik sedangkan jika nilai standar deviasi tinggi maka menunjukkan variabilitas yang cukup besar dan ketidakpastian dalam pengukuran. Selain standar deviasi, digunakan juga koefisien variasi (CV) sebagai ukuran relatif variabilitas data. Koefisien variasi memberikan perspektif tentang seberapa besar penyimpangan relatif terhadap rata-rata, dan dihitung menggunakan rumus:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.5)$$

di mana:

- σ : nilai standar deviasi
- \bar{x} : rata-rata nilai pengukuran

Koefisien variasi sangat berguna dalam membandingkan performa sensor antar hari atau antar metode pengukuran (misalnya antara metode statis dan bergerak). Nilai

CV yang rendah menunjukkan bahwa alat bekerja dengan presisi yang tinggi, sedangkan nilai CV yang tinggi bisa menjadi indikator adanya *drift sensor*, *noise*, atau ketidakstabilan lingkungan selama proses pengukuran berlangsung.

2.9.5 Estimasi Daya

Dalam penelitian ini, efisiensi konsumsi daya menentukan keberlangsungan operasional perangkat di lapangan. Perangkat ini bergantung pada sumber energi terbatas yaitu baterai, maka perlu dilakukan perhitungan estimasi daya total dan waktu operasional untuk menilai performa dan durabilitas perangkat. Estimasi daya dari baterai dapat dihitung dengan rumus arus sebagai berikut:

$$I = \frac{p}{V} \dots \dots \dots (2.6)$$

di mana:

p : daya total komponen sistem (W)

V : tegangan output

Untuk menghitung estimasi waktu penggunaan perangkat dalam satu siklus pengisian baterai, digunakan pendekatan berikut:

$$t = \frac{C_{battery}}{I} \dots \dots \dots (2.7)$$

di mana:

I : arus yang dibutuhkan perangkat (A)

$C_{battery}$: kapasitas baterai (Ah)

t : waktu operasional (jam)

Dengan menggunakan pendekatan ini, pengembang dapat menentukan seberapa lama perangkat mampu beroperasi secara kontinu di lapangan, serta menyesuaikan strategi pengambilan data berdasarkan durasi penggunaan yang tersedia.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian akan dilaksanakan di Laboratorium Pengukuran Besaran Listrik, Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung dan Kota Bandar Lampung. Waktu penelitian berlangsung dari bulan Agustus 2024 hingga Desember 2024.

3.2 Alat dan Bahan

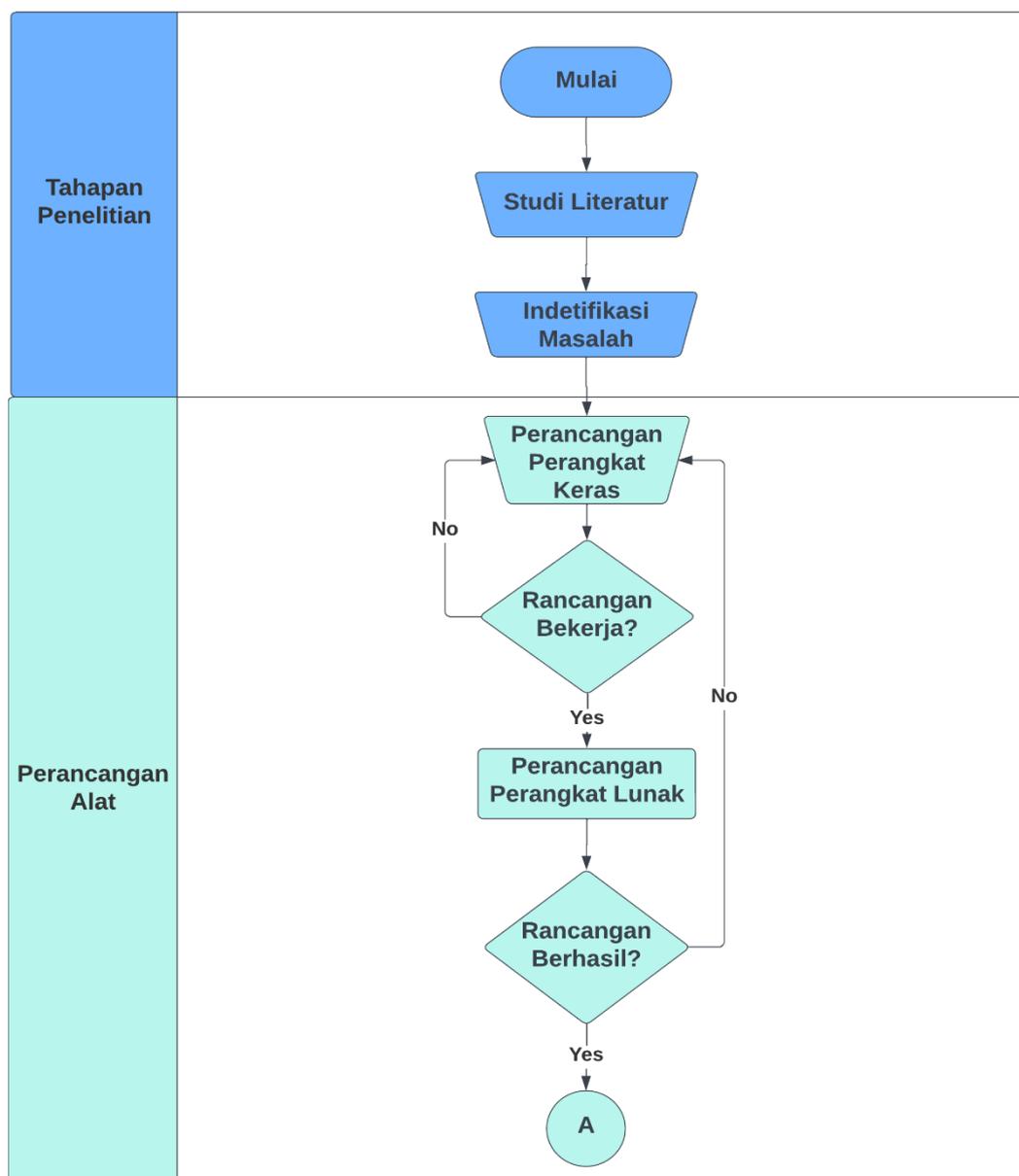
Pada penelitian ini menggunakan alat dan bahan yang berupa perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yakni pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Komponen dan Perangkat Lunak

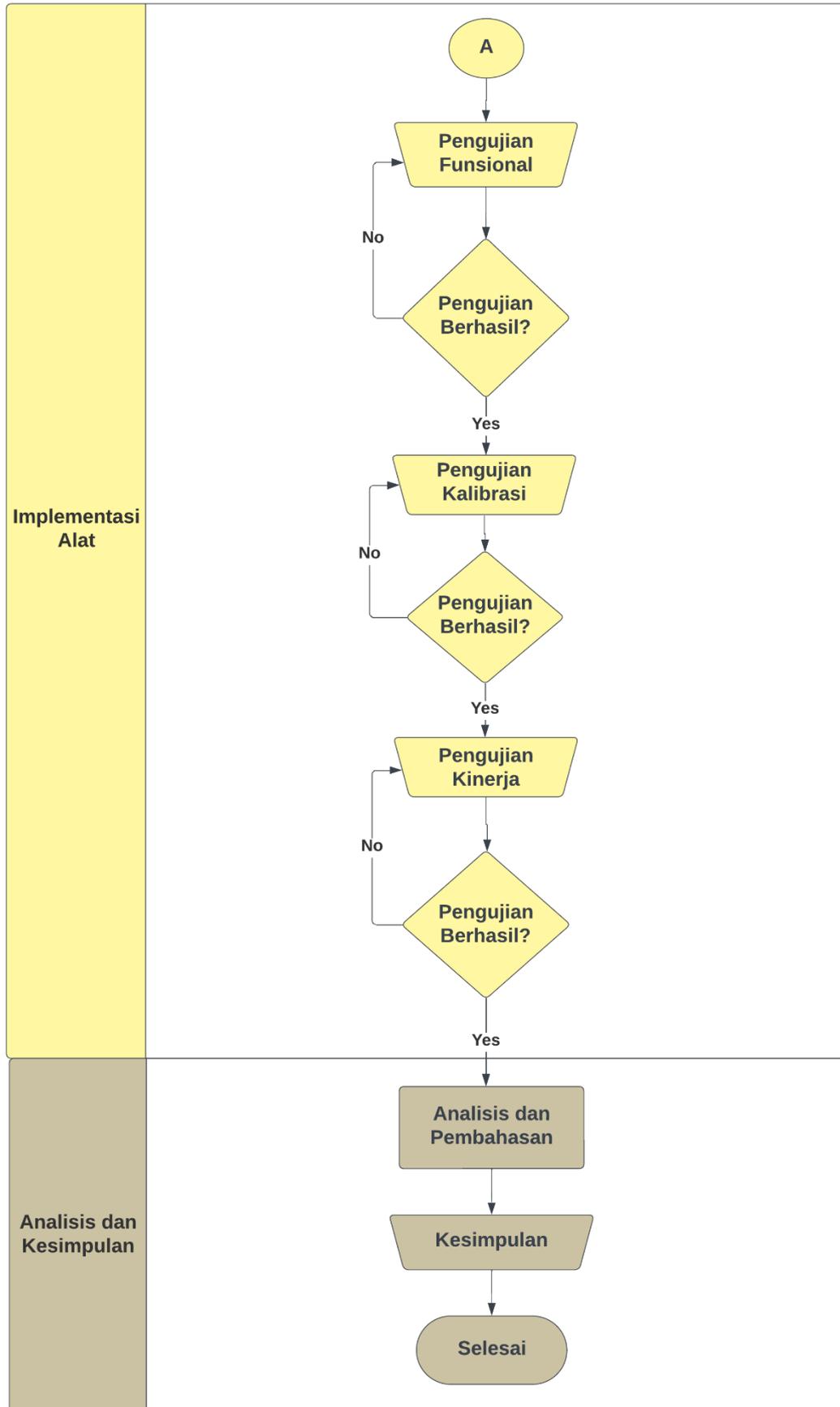
No	Nama	Keterangan Penggunaan
1.	FireBeetle ESP32-E	Sebagai mikrokontroler dan pengolahan data
2.	<i>Environmental Sensor</i>	Sebagai pengukur suhu, kelembapan, dan intensitas cahaya
3.	<i>Barometric Sensor</i>	Komponen untuk mengukur tekanan udara
4.	Gravity BME280	Komponen untuk mengukur tekanan udara
5.	Sensor Gas MQ-7	Sebagai pengukur gas karbon monoksida
6.	Modul GPS	Komponen untuk memberi tahu posisi data
7.	I2C Multiplexer	Mengatasi keterbatasan komunikasi I2C
8.	Baterai	Sebagai menyuplai daya
9.	Modul SD Card	berfungsi sebagai <i>data logger</i>
10.	Modul RTC	Berfungsi untuk penghitungan waktu <i>real-time</i>
11.	ThingSpeak	<i>Platform IoT</i> berbasis <i>web</i>
12.	Arduino IDE	<i>Software</i> pemrograman untuk mengkonfigurasi sensor yang akan digunakan
13.	Visual Studio Code	<i>Software</i> pemrograman <i>map</i> dengan <i>web</i>

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian adalah langkah-langkah terstruktur untuk mengumpulkan data, menganalisis informasi, dan menjawab pertanyaan penelitian. Fungsinya adalah menyediakan kerangka kerja yang jelas agar proses penelitian konsisten dan efisien, serta mengurangi kesalahan dan bias. Prosedur yang baik meningkatkan kredibilitas dan akurasi hasil penelitian, serta memudahkan dokumentasi dan replikasi studi. Langkah-langkah ini dapat direpresentasikan dalam diagram alir seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian (Lanjutan)

Gambar 3.1 dan 3.2 di atas menggambarkan serangkaian tahapan yang melibatkan tahapan penelitian, perancangan alat, implementasi alat serta analisis dan kesimpulan. Oleh karena itu, langkah-langkah ini secara sistematis membimbing peneliti dalam menjalankan setiap fase penelitian dengan cermat dan terorganisir. Dengan merinci setiap proses dalam bentuk diagram alir ini, peneliti dapat memastikan bahwa setiap langkah dilakukan dengan teliti dan sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan sebelumnya sehingga memudahkan pemahaman terhadap penelitian mengenai langkah yang harus diambil selama proses penelitian.

3.3.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian merupakan serangkaian langkah yang sistematis untuk melakukan pengumpulan, pemahaman, dan analisis sumber-sumber tertulis atau literatur yang relevan dengan penelitian ini. Referensi-referensi tersebut berperan dalam membangun dasar pengetahuan dan mendalami teori-teori pendukung yang berkaitan dengan penelitian ini. Langkah ini mencegah duplikasi riset sebelumnya dan memastikan penelitian memberikan kontribusi pada literatur yang ada.

3.3.2 Perancangan Alat

Perancangan alat adalah sebuah proses atau langkah-langkah yang dilakukan untuk merencanakan dan mengembangkan suatu perangkat atau sistem. Dalam perancangan alat terdapat dua aspek utama yang melibatkan perancangan perangkat keras dan perangkat lunak dengan dukungan komputer. Tujuan dari langkah ini adalah untuk memberikan gambaran mengenai pembuatan alat agar sesuai dengan kebutuhan yang diinginkan. Perancangan tersebut juga dipengaruhi oleh teori-teori pendukung yang berasal dari studi literatur yang telah dilakukan sebelumnya. Selain itu, perancangan alat juga mencakup tahapan identifikasi alat dan bahan yang diperlukan untuk menghasilkan suatu perangkat.

3.3.3 Implementasi Alat

Implementasi alat merupakan tahapan perancangan dan desain yang kemudian direalisasikan menjadi produk fisik. Proses ini melibatkan konstruksi, perakitan, dan pengujian alat yang telah dirancang sebelumnya. Alat tersebut diuji dengan

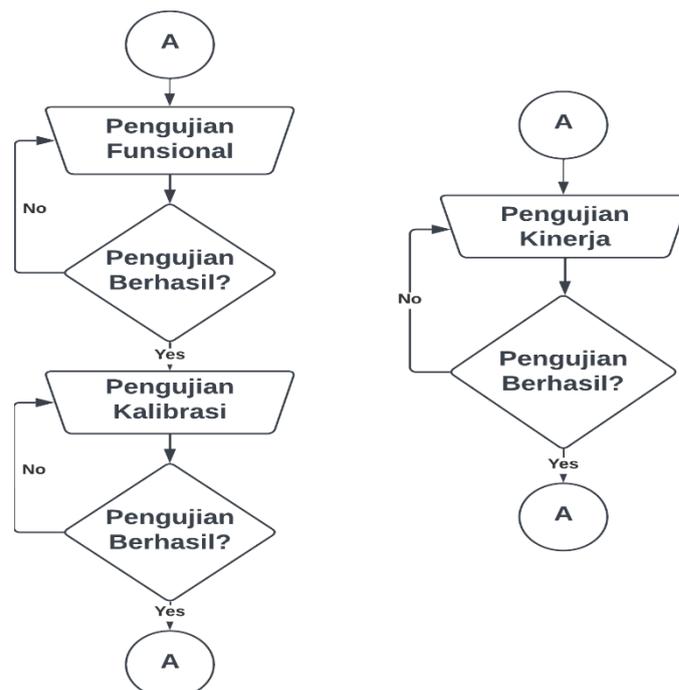
beberapa tahapan yang dibagi menjadi tiga bagian yaitu pengujian fungsional, pengujian kalibrasi dan pengujian kinerja. Pada pengujian fungsional alat diuji apakah alat tersebut dapat berfungsi. Kemudian pengujian kalibrasi yang mana alat diuji dengan membandingkan alat ukur standar. Pengujian kinerja yaitu pengujian alat sesuai dengan fungsi yang seharusnya.

3.3.4 Analisis dan Kesimpulan

Analisis dan kesimpulan merupakan proses untuk menganalisa data yang berasal dari pengujian alat, seperti nilai suhu, kelembapan, ketinggian, dan tekanan udara. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menilai tingkat keberhasilan dan kesesuaian alat yang sedang diselidiki. Hasil analisis data akan dibahas sesuai dengan tujuan penelitian.

3.4 Diagram Pengujian Alat

Diagram pengujian alat adalah diagram yang menampilkan langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengujian alat. Diagram ini membantu dalam mengorganisasi prosedur pengujian, memudahkan analisis dan interpretasi hasil pengujian. Diagram pengujian alat ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram Pengujian Alat

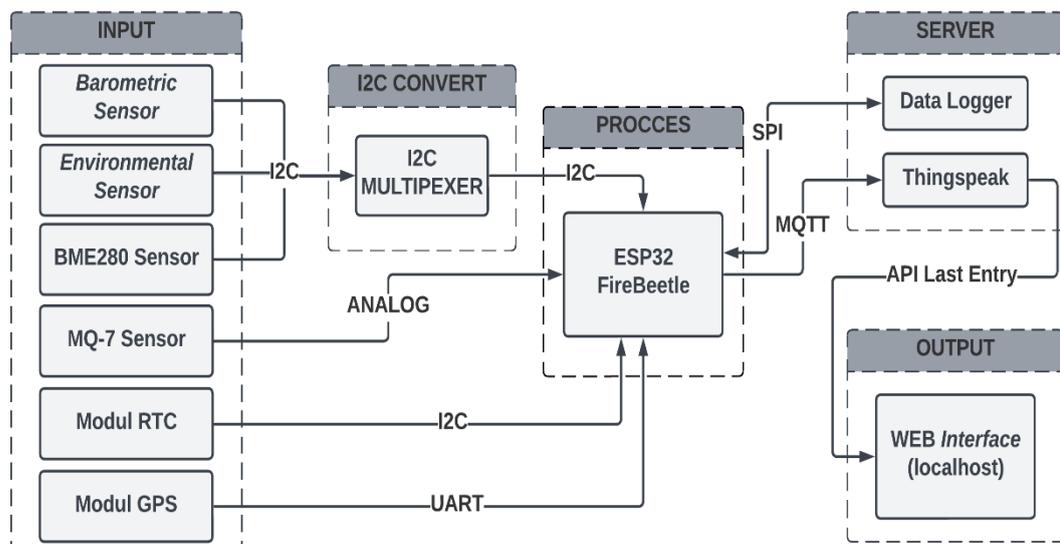
Mengacu pada Gambar 3.3 diagram pengujian alat di atas, proses pengujian dibagi menjadi tiga tahap utama: pengujian fungsional, pengujian kalibrasi, dan pengujian kinerja. Tahap pertama memastikan semua sensor beroperasi sesuai spesifikasi yang telah ditetapkan. Selanjutnya, proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan hasil sensor terhadap alat ukur standar untuk menjamin akurasi pengukuran. Tahap akhir melibatkan pengujian kinerja perangkat secara komprehensif, mencakup analisis respon, stabilitas, dan karakteristik sensor.

3.5 Perancangan Sistem

Penelitian skripsi ini merupakan bagian dari pengembangan perangkat pengukuran cuaca *mobile* berbasis IoT yang dirancang untuk mendukung pengambilan data secara *real-time*. Dalam perancangannya, terdapat rancangan sistem komunikasi, dan sistem daya.

3.5.1 Rancangan Sistem Komunikasi

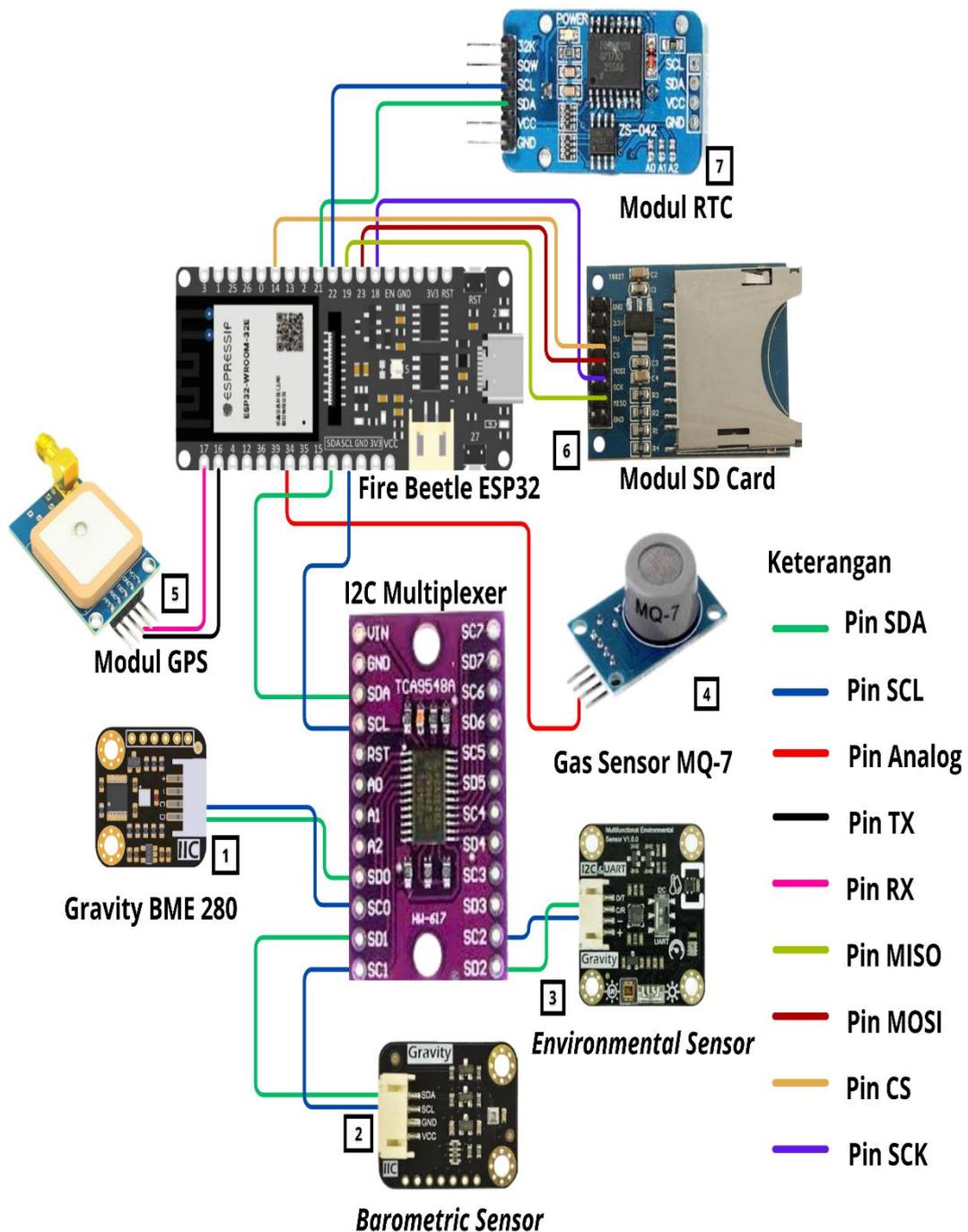
Rancangan sistem komunikasi pada penelitian ini adalah dengan menggabungkan komponen yang dibutuhkan pada penelitian. Komponen-komponen yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan variabel pada perangkat pengukuran cuaca telah dirangkum dalam Tabel 3.1. Sementara itu, diagram rancangan sistem komunikasi disajikan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Diagram Perancangan Sistem Komnukasi

Gambar 3.4 menunjukkan rancangan sistem komunikasi pada perangkat pengukuran lingkungan yang terdiri dari beberapa sensor input, mikrokontroler FireBeetle ESP32-E sebagai pusat pemrosesan, media penyimpanan lokal, serta koneksi ke server dan antarmuka *web*. Sensor yang digunakan antara lain BME280, BMP388, SEN0251, MQ-7, modul GPS, dan modul RTC. Setiap sensor berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui protokol yang berbeda sesuai kebutuhan. Sensor BME280, BMP388, dan SEN0251 menggunakan protokol I2C (Inter-Integrated Circuit) untuk komunikasi data. Namun karena beberapa sensor memiliki alamat I2C yang sama (misalnya 0x77), maka digunakan modul I2C Multiplexer TCA9548A dengan alamat default 0x70 (`#define TCA9548A_ADDR 0x70`) sebagai jembatan pengatur kanal. Multiplexer ini memungkinkan mikrokontroler memilih salah satu channel aktif (0–7) sehingga setiap sensor tetap dapat diakses tanpa konflik alamat. Pemilihan kanal dilakukan melalui fungsi `tcaSelect(i)` dalam program.

Sensor MQ-7 menghasilkan sinyal analog yang dibaca langsung oleh ADC (*Analog-to-Digital Converter*) pada ESP32 dan dikonversi menjadi nilai konsentrasi CO dalam satuan ppm. Modul GPS digunakan untuk memperoleh data lokasi dan waktu UTC dengan protokol komunikasi UART. Sedangkan modul RTC berfungsi memberikan waktu nyata (*timestamp*) untuk setiap data, juga melalui jalur I2C, namun karena memiliki alamat berbeda, tidak perlu melewati multiplexer. Data dari semua sensor diproses oleh ESP32, lalu dikirim ke *platform* ThingSpeak menggunakan protokol MQTT melalui koneksi WiFi. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan penyimpanan lokal berupa modul SD Card yang terhubung melalui protokol SPI. Data disimpan dalam format CSV agar mudah diakses dan dianalisis secara *offline*. Sebagai tambahan, data terakhir yang dikirim ke ThingSpeak dapat diakses dan divisualisasikan secara lokal melalui *Web Interface* menggunakan API *Last Entry*. Penjelasan lebih lanjut mengenai konfigurasi jalur komunikasi dan hubungan antar-komponen dapat dilihat pada Gambar 3.5. pin serta alur komunikasi setiap komponen dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Skema Komunikasi Sistem

Gambar 3.5 di atas memperlihatkan skema sistem komunikasi antara mikrokontroler FireBeetle ESP32-E dengan berbagai modul sensor dan perangkat pendukung yang terhubung melalui protokol komunikasi yang berbeda, yaitu I2C, SPI, UART, dan analog. Untuk mendukung konektivitas yang kompleks ini, digunakan kombinasi *wiring* dengan pemetaan pin yang jelas, sebagaimana

ditunjukkan melalui kode warna pada diagram. Tiga sensor utama yang menggunakan protokol I2C, yaitu Gravity BME280, *barometric sensor* (BMP388), dan *environmental sensor* (SEN0251), dihubungkan melalui modul I2C Multiplexer TCA9548A.

Multiplexer ini bertugas mengatasi konflik alamat I2C di antara sensor yang memiliki address serupa. Sensor BME280 terhubung ke kanal SC0, *barometric sensor* ke kanal SC1, dan *environmental sensor* ke kanal SC2. Jalur komunikasi I2C menggunakan pin SDA (hijau) dan SCL (biru), yang kemudian dikoneksikan ke pin GPIO21 dan GPIO22 pada ESP32. Sensor gas MQ-7 menggunakan jalur analog (merah) dan terhubung langsung ke pin A2 atau GPIO34 pada ESP32. Karena bersifat analog, sensor ini tidak memerlukan protokol khusus dan dapat langsung dibaca melalui ADC internal pada mikrokontroler.

Modul GPS menggunakan komunikasi UART, dengan pin TX (hitam) dan RX (magenta). Pin TX dari modul GPS terhubung ke RX (GPIO17) pada ESP32, sedangkan pin RX dari GPS terhubung ke TX (GPIO16) pada ESP32, sesuai konfigurasi standar komunikasi UART dua arah. Untuk menyimpan data, sistem ini menggunakan modul SD *Card* yang terhubung melalui protokol SPI. Empat pin utama pada SPI yaitu MISO (hijau kekuningan), MOSI (merah tua), SCK (ungu), dan CS (oranye) dihubungkan masing-masing ke pin GPIO19, GPIO23, GPIO18, dan GPIO14 pada ESP32.

Selanjutnya, modul RTC (*Real Time Clock*) juga menggunakan komunikasi I2C namun tidak mengalami konflik alamat dengan sensor lain, sehingga dapat langsung dihubungkan ke pin SDA (GPIO21) dan SCL (GPIO22) tanpa melalui multiplexer. Modul ini berfungsi untuk memberikan acuan waktu *real-time* yang penting dalam proses penandaan waktu (*timestamp*) setiap data pengukuran. Dengan konfigurasi wiring seperti ini, seluruh perangkat dapat terhubung secara efisien dan komunikatif. Warna *wiring* yang ditampilkan dalam diagram juga memberikan panduan visual yang jelas untuk memudahkan perakitan sistem, yakni: hijau untuk SDA, biru untuk SCL, merah untuk jalur analog, hitam dan magenta untuk TX dan RX (UART), serta kombinasi warna kuning, oranye, ungu, dan merah tua untuk komunikasi SPI (MISO, CS, SCK, dan MOSI).

3.5.2 Perancangan Daya Sistem

Pada penelitian ini, penulis menggunakan data dari datasheet setiap komponen untuk menghitung daya maksimal yang diperlukan oleh perangkat. Tabel 3.2 berikut merangkum daya maksimal dari setiap komponen, termasuk mikrokontroler, sensor, dan modul.

Tabel 3.2 Kebutuhan Daya Setiap Komponen

Komponen	Daya (mW)
Sensor MQ-7	750 mW
Modul GPS	250 mW
Sensor BME280	10 mW
<i>Barometric Sensor</i>	2.5 mW
<i>Environmental Sensor</i>	20 mW
ESP32 (WiFi aktif)	1200 mW
Modul RTC	20 mW
I2C Multiplexer	10 mW
Modul SD Card	225 mW
Total Daya Maksimal	2477 mW

Pada tabel di atas dapat diketahui estimasi daya yang dibutuhkan setiap komponen, diketahui juga jumlah daya keseluruhan sebesar 2477 mW. Setiap komponen dioperasikan pada tegangan keluaran 5V, yang diperoleh melalui *step-up converter* dari baterai 3.7V. Dikarenakan semua komponen bekerja pada tegangan 5V, maka arus total yang digunakan oleh sistem dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar daya listrik persamaan 2.6 berikut:

$$P(5V) = 2477\text{mW} = 2,47 \text{ W}$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{2477}{5V} = 0,4954 \text{ A}$$

Dengan demikian, arus total yang dibutuhkan untuk mengoperasikan seluruh sistem adalah sekitar 495 mA.

Setelah didapatkan estimasi daya dan arus yang dibutuhkan perangkat, selanjutnya menghitung estimasi waktu penggunaan baterai seperti pada persamaan 2.7 sebagai berikut:

Kapasitas Baterai = 2600mAh = 2,6 Ah

Daya Sistem = 2,47 W

Tegangan Baterai = 3,7 V

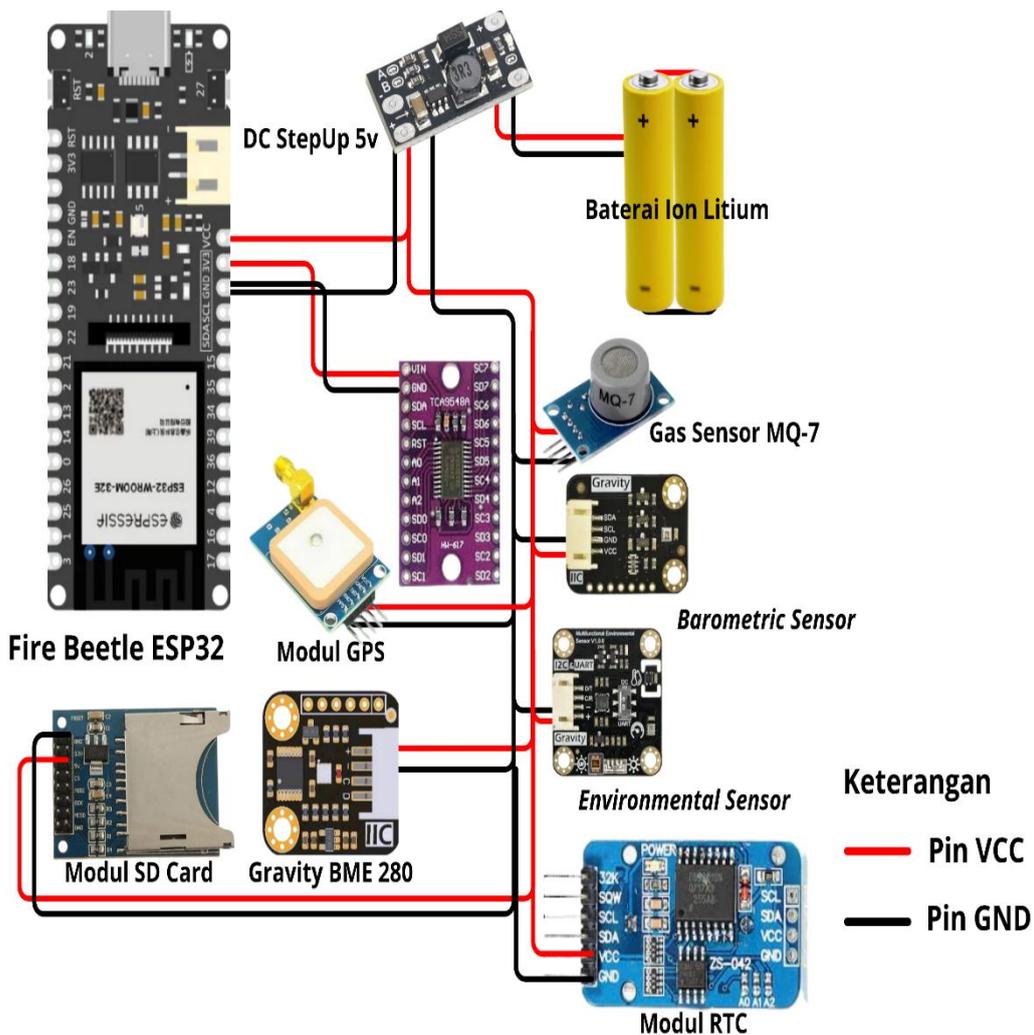
Diketahui bahwa tegangan sumber sebelum dinaikkan adalah 3,7V, maka arus dari baterai dapat dihitung berdasarkan daya sistem:

$$I = \frac{\text{Daya Sistem}}{3,7} = \frac{2,47}{3,7} = 0,669 \text{ A}$$

Waktu operasional:

$$t = \frac{\text{Kapasitas Baterai}}{I} = \frac{2,6}{0,669} = 3,88 \text{ jam}$$

Dengan demikian, perangkat diperkirakan dapat beroperasi secara terus-menerus selama sekitar 3 jam 53 menit dalam kondisi penuh menggunakan baterai lithium-ion. Berdasarkan estimasi daya perangkat, maka skenario daya pada perangkat pengukuran cuaca ada pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Skema Daya Perangkat

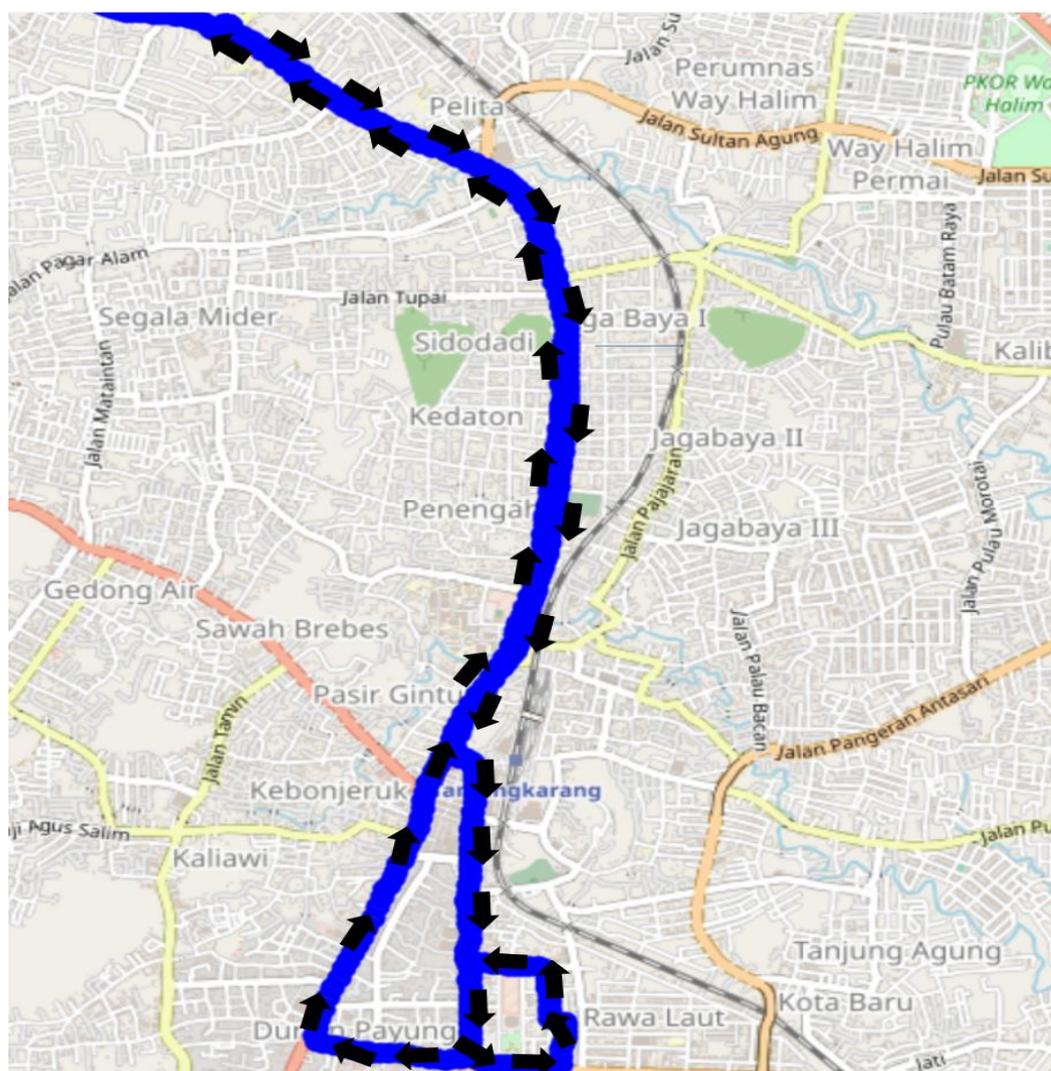
Pada Gambar 3.6 Skema rangkaian di atas, seluruh komponen memperoleh suplai daya utama dari dua buah baterai lithium-ion bertegangan 3,7V yang disusun secara paralel, kemudian dinaikkan tegangannya menjadi 5V menggunakan modul DC *Step-Up*. Tegangan 5V ini berperan sebagai sumber daya utama yang didistribusikan secara paralel ke berbagai sensor dan modul yang membutuhkan tegangan kerja 5V untuk beroperasi secara optimal. FireBeetle ESP32-E menerima tegangan ini melalui pin Vin, dan dari sana regulator internalnya mengkonversi tegangan menjadi 3,3V yang digunakan untuk mendukung operasi mikrokontroler itu sendiri, serta memberi suplai daya ke beberapa komponen eksternal yang bekerja pada level logika 3,3V.

Salah satunya adalah modul I2C Multiplexer TCA9548A, yang mendapatkan suplai daya langsung dari pin 3.3V ESP32, karena multiplexer ini tidak kompatibel dengan tegangan 5V. Sensor MQ-7, yang merupakan sensor gas, memerlukan suplai daya 5V untuk mengaktifkan elemen pemanasnya, agar dapat secara akurat mendeteksi keberadaan gas karbon monoksida (CO). Karena sifatnya yang membutuhkan daya relatif besar, MQ-7 dihubungkan langsung ke jalur daya 5V dari DC *Step-Up* agar tetap stabil. Modul GPS juga memperoleh daya dari jalur 5V dan membutuhkan suplai ini secara stabil untuk memastikan akurasi dalam penentuan posisi berbasis satelit.

Begitu pula dengan sensor BME280, *barometric sensor*, dan *environmental sensor*, semuanya menerima daya dari jalur 5V yang sama, karena seluruh sensor tersebut memiliki antarmuka I2C namun tetap membutuhkan tegangan input sebesar 5V agar semua fungsi pengukuran dapat bekerja secara optimal. Modul SD card, yang berfungsi sebagai media penyimpanan data, serta modul RTC (*Real-Time Clock*) yang menyediakan informasi waktu absolut, juga tersuplai oleh tegangan 5V.

3.5.3 Skenario Pengukuran Data

Sesuai dengan tujuan penelitian, bahwa skripsi ini bertujuan untuk membangun sebuah perangkat pengukuran cuaca yang dapat mengukur secara spasial di kota Bandar Lampung. Dalam pengukuran indikator cuaca, terdapat beberapa variabel yang diukur, yaitu suhu, kelembapan, dan tekanan udara. Modul GPS digunakan untuk menunjang proses pengambilan data secara spasial ini, ditambah dengan sensor yang mampu mengukur kadar karbon monoksida (CO), mengingat area yang akan diukur merupakan pusat lalu lintas kendaraan bermotor. Pengukuran dilakukan di beberapa rute utama di Kota Bandar Lampung yang mencerminkan area dengan aktivitas kendaraan bermotor yang tinggi, terutama selama jam sibuk. Rute pengukuran dijelaskan dalam Gambar 3.7



Gambar 3.7 Peta Skema Pengukuran

Gambar 3.7 menggambarkan rute ini secara spasial dengan marker biru yang menunjukkan setiap lokasi pengukuran. yang meliputi jalan-jalan utama berikut:

- Stadion Pahoman, yang merupakan titik awal pengukuran dan area yang sering digunakan untuk aktivitas olahraga.
- Tugu Adipura, sebagai ikon Kota Bandar Lampung dengan lalu lintas tinggi dan interaksi sosial.
- Jalan Kartini, area perkantoran yang mencerminkan kepadatan aktivitas bisnis di kota.
- Lungsir (Taman Kota), area hijau yang menjadi lokasi transit kendaraan dan rekreasi masyarakat.

Pengukuran dilakukan dengan kecepatan rata-rata 20 km/jam, dengan total jarak tempuh rute mencapai sekitar 16,4 km. Data dikumpulkan secara kontinu dengan interval 5 detik untuk memastikan resolusi spasial dan temporal yang optimal. Pengukuran ini bertujuan untuk menganalisis pola perubahan suhu, kelembapan, dan tekanan udara di berbagai segmen rute berdasarkan *timestamp* yang dihasilkan. Pengambilan data dilakukan pada jam-jam sibuk yaitu dari jam 16.00 sampai 18.00 dengan periode pengukuran dilakukan selama 5 hari pada jam yang sama. Pemilihan waktu ini diharapkan memberikan gambaran mengenai fluktuasi suhu, kelembapan, dan tekanan udara dalam skala mikro, khususnya di area dengan tingkat kepadatan kendaraan yang tinggi. Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi apakah lokasi-lokasi tertentu, seperti Jalan Kartini, atau Tugu Adipura, menunjukkan pola data yang lebih fluktuatif dibandingkan dengan area lainnya.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian “Pengembangan Perangkat Pengukuran Indikator Cuaca *Mobile* Dengan Studi Kasus Karakteristik Kota Bandar Lampung”, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Perangkat berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor lingkungan yang mampu mengukur suhu, kelembapan, tekanan udara, dan karbon monoksida (CO) secara *real-time* selama bergerak. Data berhasil dikirim melalui protokol MQTT dan disimpan lokal secara paralel, dengan interval pembacaan 5 detik dan total 720 titik data per sesi selama lima hari pengamatan.
2. Pada pengukuran statis, standar deviasi suhu tercatat sebesar $0,20^{\circ}\text{C}$ dengan koefisien variasi 0,69%, sedangkan pada pengukuran spasial meningkat menjadi $2,15^{\circ}\text{C}$ dengan koefisien variasi sebesar 6,46%. Hal ini menunjukkan bahwa fluktuasi suhu dalam pengukuran spasial meningkat sebesar 836,23% dibandingkan kondisi statis.
3. Pengukuran kelembapan udara menunjukkan perbedaan yang signifikan antara kondisi statis dan spasial. Standar deviasi kelembapan dalam kondisi statis sebesar 0,80% dengan koefisien variasi 1,12%, sedangkan dalam kondisi spasial meningkat menjadi 6,05% dengan koefisien variasi sebesar 9,81%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa variabilitas kelembapan secara spasial lebih tinggi sebesar 775,89% dibandingkan dengan pengukuran statis.
4. Variabilitas tekanan udara dalam pengukuran statis memiliki koefisien variasi sebesar 0,005%, sedangkan dalam pengukuran spasial meningkat menjadi 0,16%, atau mengalami kenaikan sebesar 3100%. Hal ini menunjukkan bahwa

sensor mampu menangkap dinamika tekanan akibat elevasi mikro atau perbedaan ketinggian sepanjang rute. Sementara itu, variabilitas konsentrasi karbon monoksida (CO) mengalami peningkatan dari 7,51% pada kondisi statis menjadi 13,54% dalam kondisi spasial, atau naik sebesar 80,29%.

5. Evaluasi kinerja perangkat menunjukkan hasil yang baik. Akurasi pengukuran tekanan udara terhadap nilai teoritis mencapai 99,87%. Tingkat reliabilitas pengumpulan data melalui sistem data logger mencapai 98,51%, dan melalui pengiriman data ke *platform* ThingSpeak mencapai 94,28%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian “Pengembangan Perangkat Pengukuran Indikator Cuaca Mobile Dengan Studi Kasus Karakteristik Kota Bandar Lampung”, maka saran yang dapat diberikan penulis adalah sebagai berikut:

1. Perangkat sebaiknya dikembangkan agar dapat menggunakan sumber daya terbarukan seperti tenaga pedal sepeda atau panel surya, sehingga lebih mandiri dan efisien dalam pengoperasian di lapangan tanpa ketergantungan pada pengisian daya eksternal. Integrasi sistem manajemen daya yang adaptif juga dapat membantu mempertahankan stabilitas tegangan saat alat digunakan secara mobile.
2. Untuk meningkatkan akurasi dan reliabilitas data spasial, disarankan penambahan sensor arah dan kecepatan angin serta penggunaan modul GPS dengan resolusi tinggi. Sensor angin akan memberikan informasi kontekstual terhadap dinamika lingkungan mikro, sementara GPS yang lebih presisi akan memperbaiki ketepatan pemetaan spasial, terutama untuk pengukuran di area padat atau bertopografi kompleks.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Kousis, I. Pigliautile, and A. L. Pisello, "A Mobile Vehicle-Based Methodology for Dynamic Microclimate Analysis," *International Journal of Environmental Research*, vol. 15, pp. 893-901, 2021
- [2] M. Chàfer, C. L. Tan, R. J. Cureau, W. N. Hien, A. L. Pisello, and L. F. Cabeza, "Mobile measurements of microclimatic variables through the central area of Singapore: An analysis from the pedestrian perspective," *Sustainable Cities and Society*, vol. 83, p. 103986, Aug. 2022.
- [3] I. Pigliautile, G. Marseglia, and A. L. Pisello, "Investigation of CO₂ Variation and Mapping Through Wearable Sensing Techniques for Measuring Pedestrians' Exposure in Urban Areas," *Sustainability*, vol. 12, no. 9, pp. 3936–3936, May 2020.
- [4] I. Requena-Ruiz, T. Leduc, and D. Siret, "Une méthodologie d'analyse des dispositifs de rafraîchissement estival basée sur la métrologie climatique mobile," *Climatologie*, vol. 20, pp. 8–8, Jan. 2023.
- [5] C. D. Ahrens, *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*, 10th ed. Belmont, CA: Brooks/Cole, 2013.
- [6]. Badan Pengembangan dan Pembinaan Bahasa, *Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI)*, 5th ed. Jakarta, Indonesia: Gramedia, 2016
- [7] B. Hidayati, Baharuddin, and R. Wahyudi, "Analisis Kelembapan Udara Pada Proses Dehumidifikasi Kentang Menggunakan Sistem Refrigerasi," *JURNAL AUSTENIT*, vol. 12, no. 1, 2020.
- [8] K. Abidin, "Analisis Tingkat Intensitas Curah Hujan, Tekanan Udara Serta Suhu Udara Di Wilayah Paotere Makassar Selama Periode Tahun 2022," *SAINFIS: Jurnal Sains Fisika*, vol. 4, no. 1, pp. 27–36, Feb. 2024.
- [9] I. Wahyuni, F. L. Wibowo, and F. Rahman, "Design and Implementation of Automatic Weather Station Using MQTT Protocol," *Advances in intelligent systems and computing*, pp. 181–195, Jan. 2021, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-33-4062-6_16.
- [10] K. Ioannou, D. Karampatzakis, P. Amanatidis, V. Aggelopoulos, and I. Karmiris, "Low-Cost Automatic Weather Stations in the *Internet of Things*," *Information*, vol. 12, no. 4, p. 146, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/info12040146>.

- [11] DFRobot Electronics, "FireBeetle ESP32-E IoT Microcontroller - DFR0654" Accessed: Aug. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com>
- [12] DFRobot Electronics "Gravity Multifunctional Environmental Sensor." Accessed: Aug. 24, 2023. [Online]. Available: <https://wiki.dfrobot.com>.
- [13] DFRobot Electronics, "Gravity BMP280 Barometric Pressure Sensors" Accessed: Aug. 24, 2023. [Online]. Available: <https://wiki.dfrobot.com>.
- [14] D. P. Dwi Prasetyo, I. L. Ibrahim Lamada, and W. N. A. Wilma Nurrul Adzillah, "Implementasi Monitoring Kualitas Udara menggunakan Sensor MQ-7 dan MQ-131 berbasis Internet of Things", *ELC*, vol. 15, no. 3, pp. 239-245, Sep. 2021.
- [15] DFRobot Electronics, "Gravity_I2C BME280 Environmental Sensor." Accessed: Aug. 24, 2023. [Online]. Available: <https://wiki.dfrobot.com>.
- [16] D. Linden, Handbook of Batteries, 3rd ed., vol. 17, no. 4. Hamburg: McGraw-Hill Companies, 1986, p. 1454.
- [17]. Y. D. Wibowo, "Implementasi Modul GPS Ublox 6M Dalam Rancang Bangun Sistem Keamanan Motor Berbasis Internet of Things," *Electrician*, vol. 15, no. 2, pp. 107–115, May 2021.
- [18] T. Tronics, "I2C Multiplexer - TCA9548A," *Tinytronics.nl*, 2023. <https://www.tinytronics.nl> (accessed Dec. 16, 2024).
- [19] C. Component, "SD CARD READER MODULE," *Campus*, 2019. <https://www.campuscomponent.com> (accessed Jan. 11, 2025).
- [20]. Lab Elektronika, "PROGRAM RTC DS3231," LAB ELEKTRONIKA, Oct. 10, 2016. <https://www.labelektronika.com> (accessed Jan. 14, 2025).
- [21] A. Amsar, K. Khairuman, and M. Marlina, "Perancangan Alat Pendeteksi Co2 Menggunakan Sensor Mq-2 Berbasis Internet of Thing," *METHOMIKA Jurnal Manajemen Informatika dan Komputerisasi Akuntansi*, vol. 4, no. 1, pp. 73–79, Apr. 2020.
- [22] D. Chioran and H. Valean, "Arduino based Smart Home Automation System," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 4, 2020.
- [23] C. Patel and N. Doshi, "A Novel MQTT Security Framework In Generic IoT Model," *Procedia Computer Science*, vol. 171, pp. 1399–1408, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.150>.
- [24] D. Silva, L. I. Carvalho, J. Soares, and R. C. Sofia, "A Performance Analysis of Internet of Things Networking Protocols: Evaluating MQTT, CoAP, OPC UA," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 11, pp. 4879, 2020. DOI: 10.3390/app11114879.
- [25] J. G. Webster, *The measurement, instrumentation, and sensors handbook*. Boca Raton, Fla.: Crc Press, 1999.

- [26] G. Lente and K. Ósz, “Barometric formulas: various derivations and comparisons to environmentally relevant observations,” *ChemTexts*, vol. 6, no. 2, Apr. 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s40828-020-0111-6>.