

**PENINGKATAN SISTEM KOMUNIKASI DAN INTEGRASI SENSOR
BAROMETRIK PADA *MICROCLIMATE STATION* DI HUTAN
MANGROVE PETENGORAN MENGGUNAKAN RASPBERRY PI DAN
*I2C EXTENDER***

(Skripsi)

Oleh

Akmal Dwiki Wijaya

2155031007



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENINGKATAN SISTEM KOMUNIKASI DAN INTEGRASI SENSOR BAROMETRIK PADA *MICROCLIMATE STATION* DI HUTAN MANGROVE PETENGORAN MENGGUNAKAN RASPBERRY PI DAN *I2C EXTENDER*

Oleh

AKMAL DWIKI WIJAYA

Hutan mangrove merupakan ekosistem pesisir yang vital dalam mitigasi perubahan iklim, penahan erosi pantai, dan penunjang produktivitas perikanan. Namun, ekosistem ini sangat rentan terhadap perubahan lingkungan sehingga pemantauan mikroklimatologi secara *real-time* menjadi penting untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi kelestariannya. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan sistem komunikasi data dan mengintegrasikan sensor barometrik pada *Microclimate Station* di hutan mangrove Petengoran berbasis Raspberry Pi 4. Sistem pemantauan terdiri dari 2 set *microclimate station* yang ditempatkan pada sebuah menara meteorologi dengan ketinggian yang berbeda, Stasiun 1 di tempatkan pada ketinggian 4 meter dari dasar laut pada saat pasang tertinggi, sedangkan Stasiun 2 ditempatkan diatas kanopi pohon pada ketinggian 20 meter dari dasar. Peningkatan dilakukan melalui perancangan ulang arsitektur komunikasi antarsensor menggunakan protokol I2C yang diperluas dengan I2C extender hingga jarak 20 meter, sehingga memungkinkan penempatan sensor pada beberapa titik pengamatan tanpa mengorbankan integritas sinyal. Sistem mengakuisisi dan mengirimkan data lingkungan secara *real-time* dari berbagai sensor, meliputi suhu, kelembapan, tekanan udara barometrik, kecepatan dan arah angin, curah hujan, serta iradiasi matahari. Metode yang digunakan meliputi perancangan perangkat keras dan lunak, pembuatan papan sirkuit cetak khusus, integrasi sensor tekanan *barometric* pada jalur antarmuka I2C jarak jauh serta konfigurasi Node-RED untuk manajemen dan visualisasi data. Data lingkungan dikumpulkan setiap menit dan dikirimkan ke *broker* MQTT untuk ditampilkan pada *dashboard* secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan tingkat kelengkapan data sensor I2C berkisar antara 99,3% hingga 99,9%, sedangkan sensor RS485 Stasiun 1 mencapai 99,8% dan Stasiun 2 94,2%. Seluruh data yang terekam berada dalam rentang operasional sensor sehingga validitasnya terjamin. Peningkatan sistem komunikasi dan integrasi sensor barometrik ini menghasilkan *Microclimate Station* yang lebih andal dan efektif untuk mendukung analisis ekologi dan upaya konservasi mangrove secara berkelanjutan.

Kata Kunci: *Microclimate Station*, Raspberry Pi, *I2C Extender*, Hutan Mangrove Petengoran, Sensor Tekanan Barometrik.

ABSTRACT

ENHANCEMENT OF THE COMMUNICATION SYSTEM AND BAROMETRIC SENSORS INTEGRAION FORA MICROCLIMATE STATION IN THE PETENGORAN MANGROVE FOREST USING RASPBERRY PI AND I2C EXTENDER

By

AKMAL DWIKI WIJAYA

The Petengoran mangrove forest is a vital coastal ecosystem that contributes to climate change mitigation, shoreline protection, and supporting fisheries productivity. However, these ecosystems are highly vulnerable to environmental changes, making real-time microclimate monitoring essential to understand the factors that influence their sustainability. This study aims to enhance the data communication system and integrate a barometric sensor into an existing microclimate station deployed in the Petengoran mangrove forest, based on a Raspberry Pi 4 platform. The monitoring system consists of two microclimate station sets installed on a meteorological tower at different heights: Station 1 is placed 4 meters above the seabed, while Station 2 is mounted above the tree canopy at a height of 20 meters above the seabed. The enhancement is carried out by redesigning the inter-sensor communication architecture using the I2C protocol extended with an I2C extender up to 20 meters, enabling sensor deployment at multiple observation points without compromising signal integrity. This system acquires and transmits real-time environmental data from various sensors, including temperature, humidity, barometric air pressure, wind speed and direction, rainfall, and solar irradiance.. The research methods include hardware and software design, custom printed circuit board fabrication, integration of the barometric pressure sensor on a long-distance I2C interface, and Node-RED configuration for data management and visualisation. Environmental data are collected every minute and sent to an MQTT broker to be displayed on a real-time dashboard. Test results show I2C sensor data completeness ranging from 99.3% to 99.9%, while RS485 sensor achieve 99.8% at Station 1 and 94.2% at Station 2. All recorded data fall within the operational range of the sesnors, ensuring data validity. The improved communication system and barometric sensor integration result in a more reliable and effective Microclimate Station to support ecological analysis and sustainable mangrove conservation efforts.

Keywords: Microclimate Station, Raspberry Pi, I2C Extender, Petengoran Mangrove Forest, Barometric Pressure.

**PENINGKATAN SISTEM KOMUNIKASI DAN INTEGRASI SENSOR
BAROMETRIK PADA *MICROCLIMATE STATION* DI HUTAN
MANGROVE PETENGORAN MENGGUNAKAN RASPBERRY PI DAN
*I2C EXTENDER***

Oleh

Akmal Dwiki Wijaya

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik

Universitas Lampung



JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2025

Judul Skripsi

:

**PENINGKATAN SISTEM
KOMUNIKASI DAN INTEGRASI
SENSOR BAROMETRIK PADA
MICROCLIMATE STATION DI HUTAN
MANGROVE PETENGORAN
MENGUNAKAN RASPBERRY PI
DAN I2C EXTENDER**

Nama Mahasiswa

:

Akmal Dwiki Wijaya

Nomor Pokok Mahasiswa

:

2155031007

Program Studi

:

Teknik Elektro

Fakultas

:

Teknik

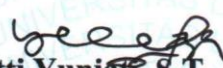


MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping


Yetti Yuniati, S.T., M.T.
NIP. 198001132009122002

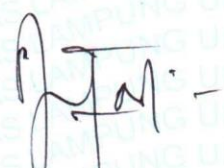

Dr.-ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., PhD.
NIP. 197311281999031005

Ketua Jurusan
Teknik Elektro

2. Mengetahui

Ketua Program Studi
Teknik Elektro


Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 197103141999032001


Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 197311042000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

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

.....

Sekretaris : Dr.-ing Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D.

.....

Penguji : Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D.

.....



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. 4
NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 19 September 2025

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi yang saya buat dengan judul “Peningkatan Sistem Komunikasi dan Integrasi Sensor Barometrik pada *Microclimate Station* di Hutan Mangrove Petengoran Menggunakan Raspberry Pi dan I2C *Extender*” dibuat tidak berdasarkan karya yang pernah dilakukan orang lain. Bahwa karya ini tidak terdapat karya lain atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali secara 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 saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 5 Desember 2025



Akmal Dwiki Wijaya
NPM. 2155031007

RIWAYAT HIDUP



Penulis, Akmal Dwiki Wijaya, lahir di Bekasi pada tanggal 1 Agustus 2002. Penulis saat ini berdomisili di Bekasi, Jawa Barat. Riwayat pendidikan penulis dimulai dari Sekolah Dasar di SDN Mekar Mukti 06 (kelas 1-3), SD Muhammadiyah 4 Ambarketawang (kelas 4 semester 1), dan SDN 1 Wadunggetas (kelas 4 semester 2 hingga 6) yang diselesaikan pada tahun 2018. Pendidikan Sekolah Menengah Pertama diselesaikan di SMP IT Insan Kamil pada tahun 2018, dan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Cikarang Pusat diselesaikan pada tahun 2021. Pada tahun 2021, penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

Selama masa perkuliahan, penulis aktif dalam beberapa kegiatan organisasi dan kepanitiaan, di antaranya menjadi bagian dari Kepengurusan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (2022-2023) di Departemen Komunikasi dan Informatika. Penulis juga pernah berpartisipasi dalam program Program Penguatan Kapasitas Organisasi Kemahasiswaan (PPK Ormawa) tahun 2023 dengan topik "Smart Tambak", yang berhasil lolos dan mendapatkan penghargaan sebagai Juara 2 Kategori Poster Terlengkap pada kegiatan Abdidaya 2023 di Jember. Selain itu, penulis mengikuti kegiatan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) studi independen di *Startup Campus* dengan fokus ilmu data (*Data Science*).

MOTTO

"Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan."

(QS Al-Insyirah: 5-6)

"Janganlah engkau mengeluh. Sesungguhnya kesulitan adalah jalan menuju kesuksesan."

(Imam Hasan Al-Bashri)

"Hidup yang tidak diuji tidak layak untuk dijalani."

(Socrates)

"Hidup kita adalah ciptaan pikiran kita."

(Penulis)

PERSEMBAHAN

Setiap langkah dalam perjalanan ini adalah jejak cinta, doa, dan pengorbanan.

Untuk itu, dengan penuh rasa syukur, kupersembahkan kepada:

Papa dan Mama

Serta

Kakak-kakakku dan Adik-adikku

Terima kasih telah membesarkan dan membimbing dengan penuh kasih sayang, selalu memotivasi dan memberi dukungan moril maupun materi, selalu mendoakan kesuksesan Penulis, serta segala bentuk pengorbanan dan semua hal yang telah diberikan kepada Penulis yang tidak akan pernah bisa terbalas, semoga Allah selalu melindungi kalian.

Dan juga rekan-rekan

Excalto 2021

TELTI 2021

HIMATRO UNILA

Terima kasih atas kebersamaan, motivasi, kerjasama, dan rasa kekeluargaan yang luar biasa. Dukungan kalian telah membuat proses studi ini penuh warna dan makna.

SANWACANA

Alhamdulillahirabbil'alamin. Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi/tugas akhir ini dengan judul “Peningkatan Sistem Komunikasi dan Integrasi Sensor Barometrik pada *Microclimate Station* di Hutan Mangrove Petengoran Menggunakan Raspberry Pi dan *I2C Extender*”. Dalam pelaksanaan dan pembuatan skripsi ini penulis menerima dukungan baik secara moril maupun materil yang sangat berharga dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih ke semua pihak yang telah membantu, khususnya kepada:

1. Kedua orang tua tercinta dan seluruh keluarga penulis yang tidak hentinya mendo'akan serta memberikan dorongan semangat dan materi;
2. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
3. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung;
4. Ibu Yetti Yuniati, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan ilmu, bimbingan, bantuan, masukan, dan pandangan kehidupan kepada penulis disetiap kesempatan dengan baik dan ramah;
5. Bapak Dr.-ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang telah memberikan ilmu, bimbingan, masukan, damotivasi kepada penulis disetiap kesempatan dengan baik dan ramah;
6. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun kepada penulis;

7. Bapak Aryanto, S.T., M.T. selaku Pembimbing Akademik yang telah memberikan arahan, nasehat dan bimbingan yang membangun bagi penulis selama menempuh perkuliahan;
8. Segenap dosen di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama menempuh pendidikan perkuliahan;
9. Segenap staff di Jurusan Teknik Elektro yang telah membantu penulis baik dalam hal administrasi dan lain-lain;
10. Keluarga Besar Laboratorium Telekomunikasi yang memberikan banyak ilmu, masukan dan saran kepada penulis yang tidak bisa dibayarkan;
11. Keluarga Besar MCS, Witra, Haris, dan Firmansyah yang telah Bersama-sama memberikan semangat dan gagasan dalam menyelesaikan skripsi ini;
12. Rekan seperjuangan Aldi Rifqi dan Nur Afni yang telah membantu penulis dalam memberikan saran dan semangat dalam menyelesaikan skripsi ini;
13. Teknik Elektro'21, terimakasih atas semangat dan kebersamaannya selama menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Elektro;
14. Keluarga Besar HIMATRO yang telah memberikan ilmu dan pengalaman kepada penulis selama pendidikan baik secara langsung maupun tak langsung;
15. Seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam proses pembuatan skripsi baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis mengakui adanya kekurangan dalam skripsi ini dan dengan tulus menerima kritik serta saran yang membangun dari berbagai pihak demi kemajuan bersama. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Bandar Lampung, 5 Desember 2025

Penulis

Akmal Dwiki Wijaya

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
SURAT PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN.....	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Rumusan Masalah.....	4
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Manfaat Penelitian.....	5
1.6. Sistematika Penulisan.....	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1. Penelitian Terdahulu	7
2.2. Uraian Deskriptif	11
2.2.1. <i>Internet of Things (IoT)</i>	12
2.2.2. <i>Microclimate Station</i>	12
2.2.3. <i>Single Board Computer</i>	13
2.2.4. <i>I2C Extender</i>	14

2.2.5. Barometrik Sensor	15
2.2.6. RS485 to USB	16
2.2.7. Node-RED	17
2.2.8. Tahapan Pengujian.....	18
2.2.9. Sistem Komunikasi	18
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	20
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	20
3.2. <i>Capstone Project</i>	20
3.3. Alat dan Bahan.....	21
3.4. Tahapan Penelitian	22
3.4.1. Studi Literatur.....	23
3.4.2. Perancangan Sistem	24
3.4.3. Pemasangan Setiap Modul	34
3.4.4. Uji Coba	34
3.4.5. Indikator Keberhasilan	36
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1. Hasil Perancangan Perangkat <i>Microclimate Station</i>	38
4.2. Implementasi Sistem <i>Microclimate Station</i>	38
4.3. Pengujian Komunikasi Sistem	42
4.3.1. Pengujian Komunikasi <i>Multi-Bus I2C</i> (I2C1 dan I2C4)	42
4.3.2. Pengujian Komunikasi RS485 to USB	47
4.4. Kalibrasi Sensor.....	51
4.4.1. Kalibrasi Sensor Suhu	52
4.4.2. Kalibrasi Sensor Kelembapan.....	53
4.4.3. Kalibrasi Sensor Kecepatan Angin	55
4.4.4. Kalibrasi Sensor <i>Wind Direction</i>	56
4.5. Pengujian Fungsionalitas Sistem	58
4.5.1. Pengambilan Data Setiap 1 Menit.....	58
4.5.2. Sinkronisasi Waktu (NTP).....	59
4.5.3. Pengiriman Data ke MQTT dan Node-RED.....	60
4.6. Akurasi Data.....	63
4.7. Visualisasi dan Interpretasi Data.....	65

4.7.1. Visualisasi Barometrik	66
4.7.2. Visualisasi Curah Hujan.....	67
4.7.3. Visualisasi Suhu dan Kelembapan	67
4.7.4. Visualisasi Arah dan Kecepatan Angin	69
4.7.5. Visualisasi Iradiasi Matahari	72
4.8. Evaluasi Akurasi Sistem	73
V. KESIMPULAN DAN SARAN	79
5.1. Kesimpulan.....	79
5.2. Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>State of the Art</i>	11
Gambar 2.2 Raspberry Pi	14
Gambar 2.3 I2C <i>Extender</i> PCA9600.....	15
Gambar 2.4 BMP388 Barometrik sensor	16
Gambar 2.5 RS485 to USB	17
Gambar 3.1 <i>Capstone Project</i>	21
Gambar 3.2 Tahapan Penelitian	23
Gambar 3.3 Diagram Blok MCS V1.....	25
Gambar 3.4 Diagram Blok MCS.....	26
Gambar 3.5a <i>Schematic Diagram Microclimate Station</i>	27
Gambar 3.5b Lanjutan <i>Schematic Diagram Microclimate Station</i>	28
Gambar 3.6 <i>Wiring Diagram</i>	31
Gambar 3.7 Diagram Alir Perancangan Alur Program.....	32
Gambar 3.8 Uji Coba I2C <i>Extender</i>	35
Gambar 4.1 PCB MCS V3.0	39
Gambar 4.2 <i>Node 1</i> MCS.....	41
Gambar 4.3 <i>Node 2</i> MCS.....	41
Gambar 4.4 Konfigurasi config.txt	43
Gambar 4.5 Pengujian Pada Kabel 5 Meter	44
Gambar 4.6 Pengujian Kabel 10 Meter.....	45
Gambar 4.7 Pengujian Kabel 20 Meter.....	46
Gambar 4.8 <i>Diagram Wind Rose Node 1</i>	49
Gambar 4.9 <i>Diagram Wind Rose Node 1</i>	50
Gambar 4.10 Radiasi Matahari dan Curah Hujan	51
Gambar 4.11 Kurva Regresi Linear Kalibrasi Suhu Node 2.....	53

Gambar 4.12 Kurva Regresi Linear Kalibrasi Kelembapan Relatif <i>Node 1</i> dan <i>Node 2</i>	54
Gambar 4.13 Kurva Regresi Linear Kalibrasi Sensor Kecepatan Angin <i>Node 1</i> dan <i>Node 2</i>	56
Gambar 4.14 <i>Debug Message</i> Node-RED	59
Gambar 4.15 Sinkronisasi Waktu NTP	60
Gambar 4.16 Struktur <i>Flow</i> Node-RED <i>Node 1</i>	61
Gambar 4.17 Struktur <i>Flow</i> Node-RED <i>Node 2</i>	62
Gambar 4.18 Grafik Barometrik	66
Gambar 4.19 Grafik Suhu dan Kelembapan	68
Gambar 4.20 <i>Wind Rose Diagram</i> <i>Node 2</i>	70
Gambar 4.21 <i>Wind Rose Diagram</i> <i>Node 1</i>	71
Gambar 4.22 Grafik Iradiasi Matahari	73

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Deskripsi Spesifikasi Raspberry Pi	14
Tabel 2.2 Spesifikasi Teknis I2C <i>Extender</i>	15
Tabel 2.3 Spesifikasi BMP388 Barometrik sensor	16
Tabel 3.1 Alat dan Bahan.....	21
Tabel 3.2 Koneksi Schematic Diagram MCS	29
Tabel 3.3 Komponen <i>Wiring Diagram</i>	30
Tabel 3.4 Indikator Keberhasilan.....	36
Tabel 4.1 Persentase Data	43
Tabel 4.2 Statistik Pembacaan Sensor RS485.....	48
Tabel 4.3 Data Kalibrasi Sensor Suhu <i>Node 2</i>	52
Tabel 4.4 Data Kalibrasi Sensor Suhu <i>Node 1</i>	52
Tabel 4.5 Data Kalibrasi Sensor Kelembapan Relatif <i>Node 1</i>	54
Tabel 4.6 Data Kalibrasi Sensor Kelembapan Relatif <i>Node 2</i>	54
Tabel 4.7 Data Kalibrasi Sensor Kecepatan Angin <i>Node 1</i>	55
Tabel 4.8 Data Kalibrasi Sensor Kecepatan Angin <i>Node 2</i>	55
Tabel 4. 9 Data Kalibrasi Sensor Arah Angin <i>Node 1</i>	57
Tabel 4.10 Data Kalibrasi Sensor Arah Angin <i>Node 2</i>	57
Tabel 4.11 Ringkasan Validitas Data Sensor	64
Tabel 4.12 Kelengkapan Data MCS.....	65
Tabel 4.13 Distribusi Arah dan Kecepatan Angin <i>Node 2</i> dalam Persentase	69
Tabel 4.14 Distribusi Lengkap Arah dan Kecepatan Angin <i>Node 1</i> dalam Persentase.....	71
Tabel 4.15 Hasil Evaluasi Akurasi Sistem	74

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Desa Gebang merupakan salah satu desa yang terletak di Kecamatan Teluk Pandan, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung [1]. Desa Gebang memiliki luas wilayah sekitar 1.198,96 hektar, dengan enam dusun, yaitu Dusun Tanjung Jaya, Dusun Gebang Hilir, Dusun Gebang Induk, Dusun Sinar Harapan, Dusun Suka Agung, dan Dusun Seribu, yang dihuni oleh 13.400 jiwa. Sebagian besar penduduk bermata pencaharian sebagai petani, sedangkan sektor perdagangan menjadi salah satu penopang perekonomian desa [2].

Ekosistem mangrove di Petengoran, Desa Gebang, memiliki fungsi ekologi dan sosial ekonomi yang signifikan, seperti mendukung produktivitas perikanan, menyerap karbon, menahan erosi pantai, dan mencegah intrusi air laut ke daratan. Selain itu, ekosistem ini juga berperan sebagai pengendali banjir dan pelindung pantai dari gelombang besar atau tsunami. Wilayah ini memiliki pola iklim monsoonal dengan satu puncak musim hujan dan satu musim kemarau setiap tahun, di mana musim kemarau cenderung lebih panjang. Rata-rata curah hujan berkisar antara 50–70 mm per dasarian, sedangkan suhu udara menunjukkan tren kenaikan sebesar $0,0023^{\circ}\text{C}$ per bulan, yang menambah kerentanan ekosistem terhadap perubahan iklim [3]. Perbedaan kondisi mikroiklim di atas dan di level kanopi mangrove, seperti suhu lebih tinggi dan radiasi lebih intens di bagian atas, memengaruhi pertumbuhan bibit mangrove, di mana kanopi dapat menahan suhu ekstrem tetapi membatasi penetrasi cahaya matahari.

Microclimate Station (MCS) versi 1 merupakan sistem pemantauan iklim otomatis berbasis IoT yang telah dipasang permanen di area konservasi mangrove Petengoran untuk mendukung mitigasi perubahan iklim dan analisis degradasi

ekosistem. Sistem ini mengintegrasikan mikrokontroler ESP32 dan Raspberry Pi 4 sebagai pusat kendali, serta ditempatkan pada dua stasiun, yaitu stasiun atas kanopi (20 meter) dan stasiun di level kanopi (2 meter), untuk menangkap perbedaan parameter mikroiklim. Namun, sistem ini masih memiliki keterbatasan jarak komunikasi sensor dan belum mengintegrasikan sensor barometrik, yang menjadi dasar pengembangan sistem lanjutan.

Setelah satu tahun pengoperasian, data MCS menunjukkan bahwa kematian bibit mangrove sering disebabkan oleh (1) kurangnya paparan sinar matahari akibat naungan kanopi berlebih, (2) periode genangan yang melebihi toleransi bibit (maksimum 4 jam), dan (3) minimnya asupan air tawar yang meningkatkan salinitas dan stres osmotik. Penambahan sensor barometrik diperlukan untuk mendukung penelitian yang lebih komprehensif terkait hubungan tekanan atmosfer dengan *vapor pressure deficit* (VPD), pola pasang-surut, dan potensi intrusi air laut [4].

Tantangan teknis dalam implementasi stasiun mikroklimatologi saat ini adalah keterbatasan jarak komunikasi sensor, yang mengharuskan penempatan sensor pada lokasi yang tinggi, sekitar 18 meter, sementara komponen modul dan pengontrol harus ditempatkan di lokasi yang mudah diakses untuk mempermudah proses pemeliharaan secara berkala. Secara umum, panjang kabel I2C standar hanya berkisar antara 1-3 meter. Penggunaan I2C *extender* dapat menjadi solusi efektif untuk mengatasi keterbatasan tersebut, memungkinkan penempatan sensor pada ketinggian yang lebih tinggi dengan mikrokomputer yang lebih rendah, serta memberikan data yang lebih akurat tentang kondisi mikroiklim di level kanopi mangrove.

Penggunaan mikrokontroler seperti Arduino atau ESP32 dalam sistem *monitoring* lingkungan memiliki keterbatasan dalam kemampuan *remote access* dan manajemen jarak jauh [5]. Sistem ini membutuhkan *hardware* tambahan untuk konektivitas dan memiliki keterbatasan dalam multitasking serta *remote debugging*, yang dapat mempengaruhi efisiensi pengumpulan data [6]. Penggunaan sistem yang lebih terintegrasi seperti Raspberry Pi dapat mengatasi keterbatasan ini dengan menyediakan kemampuan *remote management* yang lebih baik [7].

Peningkatan *Microclimate Station* yang telah terpasang permanen di kawasan hutan mangrove ini mencakup tiga target utama, yaitu implementasi I2C *extender* untuk optimalisasi penempatan sensor, integrasi sensor barometrik, serta migrasi sistem dari ESP32 ke Raspberry Pi untuk manajemen data yang lebih efisien. Peningkatan sistem ini diharapkan dapat meningkatkan akurasi pengumpulan data dengan interval waktu pengambilan data setiap 10 menit secara *real-time*. Data yang dihasilkan akan memperkaya pemantauan parameter lingkungan yang sudah berjalan dan memberikan landasan empiris yang lebih komprehensif untuk pengambilan keputusan dalam pengelolaan kawasan mangrove yang berkelanjutan di Desa Gebang.

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem komunikasi data *Microclimate Station* berbasis Raspberry Pi 4 pada menara meteorologi dua level di hutan mangrove Petengoran, dengan pemanfaatan protokol I2C dan I2C *extender* hingga jarak 20 meter untuk menghubungkan beberapa sensor pada berbagai titik pengamatan.
2. Mengintegrasikan dan menguji kinerja sensor tekanan udara barometrik pada jalur antarmuka I2C jarak jauh dalam sistem *Microclimate Station*, sehingga mampu melakukan akuisisi data tekanan udara secara *real-time* bersama parameter mikroklimat lain (suhu, kelembapan, angin, curah hujan, iradiasi matahari).
3. Mengevaluasi unjuk kerja dan keandalan sistem *Microclimate Station* yang dikembangkan, berdasarkan tingkat kelengkapan data, stabilitas komunikasi (I2C dan RS485), serta kesesuaian data yang terekam dengan rentang operasional sensor untuk mendukung analisis ekologi dan konservasi mangrove secara berkelanjutan.

1.3. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam pengembangan *Microclimate Station* dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan komponen *I2C Extender* terhadap akurasi dan jangkauan komunikasi data pada *Microclimate Station* di Hutan Mangrove Petengoran?
2. Bagaimana proses integrasi dan pengujian sensor tekanan barometrik ke dalam *Microclimate Station* agar mampu mengakuisisi data tekanan udara secara real-time Bersama parameter mikroklimat lainnya?
3. Bagaimana unjuk kerja dan keandalan sistem *Microclimate Station* yang dikembangkan, jika dievaluasi dari tingkat kelengkapan data, stabilitas komunikasi (I2C dan RS485), serta kesesuaian data yang terekam dengan rentang operasional sensor untuk mendukung analisis ekologi dan konservasi mangrove?

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam pengembangan *Microclimate Station* dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Implementasi *I2C Extender* dibatasi pada komunikasi sensor yang ditempatkan pada ketinggian 20 meter dari permukaan tanah di Hutan Mangrove Petengoran untuk mengukur parameter seperti barometrik (tekanan atmosfer), suhu, dan kelembapan.
2. Integrasi sensor dibatasi pada sensor barometrik BMP388, sensor suhu dan kelembapan SHT31, serta sensor berbasis RS485 (*pyranometer*, *anemometer*, dan *wind direction*) yang terhubung ke sistem *Microclimate Station*.
3. Pengembangan sistem berbasis Raspberry Pi dibatasi pada penggunaan Node-RED untuk pemrosesan data lokal, penyimpanan data dalam format CSV, dan

pengiriman data ke *cloud* melalui protokol MQTT, dengan fokus pada sentralisasi data dan deteksi dini masalah komunikasi sensor.

4. Penelitian ini tidak membahas sensor suhu air karena tidak adanya perubahan dalam sistem komunikasi yang digunakan.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Menyediakan sistem komunikasi *Microclimate Station* yang dioptimalkan dengan *I2C Extender* untuk menghasilkan data lingkungan yang akurat dan andal, mendukung pemantauan mikroklimat di Hutan Mangrove Petengoran.
2. Memberikan data barometrik yang komprehensif melalui integrasi sensor Barometrik, yang dapat digunakan untuk penelitian ketahanan ekosistem mangrove terhadap perubahan iklim.
3. Menghasilkan sistem pengelolaan data lingkungan berbasis Raspberry Pi yang terpusat, dengan kemampuan deteksi dini masalah operasional dan visualisasi data *real-time*, untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan berkelanjutan kawasan mangrove.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam pembahasan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, dan tujuan penelitian. Ini juga membahas prosedur penulisan laporan tentang penelitian Pengembangan *Microclimate Station* dalam Hutan Konservasi Mangrove Petengoran.

2. BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Membahas tentang penelitian-penelitian sebelumnya pada tinjauan pustaka, dan dasar-dasar teori dari penelitian Pengembangan *Microclimate Station* dalam Hutan Konservasi Mangrove Petengoran.

3. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan waktu, tempat, alat dan bahan, dan metode penelitian beserta tahapannya mengenai Pengembangan *Microclimate Station* dalam Hutan Konservasi Mangrove Petengoran.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Membahas mengenai hasil implementasi teknologi yang telah diterapkan, data-data yang telah berhasil dikumpulkan, dan Analisa terhadap data *Microclimate Station*.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Membahas mengenai hasil keseluruhan penelitian, kesimpulan dari hasil analisa dan fungsionalitas teknologi yang diterapkan, dan saran keberlanjutan penelitian selanjutnya.

6. DAFTAR PUSTAKA

Bab ini menjabarkan seluruh daftar pustaka yang dipakai dalam mendukung teori yang digunakan serta sumber data-data terverifikasi sebagai acuan implementasi teknologi.

7. LAMPIRAN

Bab ini menjabarkan terkait lampiran-lampiran tambahan yang mendukung dan memperjelas penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Penelitian yang dilakukan oleh Addabbo et al. berjudul *Using the I2C bus to set up Long Range Wired Sensor and Actuator Networks in Smart Buildings* [8] pada tahun 2019 mengeksplorasi penggunaan komunikasi bus I2C untuk jaringan sensor dan aktuator berjangkauan panjang pada bangunan cerdas. Metode penelitian tersebut menerapkan modifikasi frekuensi bus I2C pada mode standar (100 kHz) untuk meminimalkan efek kapasitansi, dengan perhitungan *resistor pull-up* yang optimal. Penggunaan kabel *Fieldbus* khusus dengan kapasitansi parasitik rendah bertujuan mereduksi interferensi sinyal, sehingga memungkinkan komunikasi sensor yang stabil.

Adapun penelitian yang dilakukan berbeda dalam pendekatan, yaitu menggunakan I2C *extender* sebagai solusi perpanjangan jarak komunikasi. Metode ini mampu mentransformasi sinyal I2C menjadi lebih tahan terhadap gangguan dan kapasitansi parasitik, dengan kemampuan komunikasi pada jarak yang lebih panjang serta stabilitas yang superior tanpa menurunkan frekuensi bus. Selain itu, jenis kabel yang digunakan pada penelitian terdahulu menggunakan kabel *fieldbus*, sedangkan penelitian yang akan dilakukan menggunakan kabel ethernet.

Penelitian Anditasari et al. berjudul *Perancangan Sistem Akuisisi Data Multisensor (Oksigen, Hidrogen, Suhu, Aliran, Tekanan, Arus, dan Tegangan) berbasis Human Machine Interface* [9] pada tahun 2020 mengembangkan sistem akuisisi data multisensor pada perangkat *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC). Sistem tersebut mengintegrasikan berbagai sensor untuk mengukur parameter kompleks: kadar

oksigen, hidrogen, suhu, aliran, tekanan, arus, dan tegangan. Miktokontroler Arduino Mega 2560 digunakan untuk memproses data, dengan antarmuka *Human Machine Interface* (HMI) sebagai medium visualisasi.

Adapun penelitian ini memiliki keterbatasan, yaitu ketergantungan pada Arduino Mega 2560 yang memiliki kapabilitas terbatas dalam mendukung pemantauan jarak jauh dan pengelolaan data secara *real-time*, serta fokus pada lingkungan SOFC yang terkontrol, sehingga kurang adaptif untuk kondisi ekosistem terbuka seperti mangrove yang dinamis. Keterbatasan ini menunjukkan perlunya sistem yang lebih fleksibel dan terintegrasi untuk pemantauan lingkungan pesisir. Oleh karena itu, penelitian yang diusulkan menggunakan Raspberry Pi sebagai pengendali utama dengan integrasi sensor berbasis I2C *extender*, yang memungkinkan komunikasi jarak jauh hingga 20 meter dan pemantauan *real-time* parameter mikroklimat, sehingga mengisi gap teknologi untuk aplikasi di ekosistem mangrove yang kompleks.

Penelitian Tyrovolas dan Hajnal berjudul *Inter-communication between Programmable Logic Controllers using IoT technologies* [10] pada tahun 2021 mengeksplorasi komunikasi antar *Programmable Logic Controllers* (PLC) menggunakan protokol MQTT dan Modbus RTU. Metode penelitian melibatkan penggunaan dua *gateway* untuk pertukaran data antar PLC dalam sistem otomasi industri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa protokol IoT dapat diimplementasikan untuk komunikasi antar perangkat industri, memberikan fleksibilitas dan kemungkinan pemantauan jarak jauh.

Perbedaan mendasar pada penelitian ini terletak pada pengembangan arsitektur monitoring lingkungan yang lebih komprehensif. Penelitian sebelumnya memiliki keterbatasan dalam lingkup komunikasi antar PLC menggunakan *modbus* yang sudah terdaftar dengan ESP32, sementara penelitian ini fokus pada integrasi *multi-sensor* untuk pemantauan mikroklimatis di ekosistem mangrove. Penggunaan sensor dengan jenis komunikasi RS485 memiliki *modbus slave* yang sudah terdaftar dan menggunakan jenis mikrokomputer Raspberry Pi untuk komunikasinya.

Penelitian Śniadkowski (2022) yang berjudul *Increasing Transmission of Inter-Integrated Circuit in Home Automation Solutions* [11], fokus diarahkan pada

analisis metode untuk meningkatkan jangkauan dan keandalan komunikasi I2C pada sistem otomasi rumah. Studi tersebut mengevaluasi beberapa IC *extender*, termasuk PCA9600, yang mampu memperpanjang jangkauan komunikasi I2C dengan merubah transmisi sinyal menjadi *bidirectional*. PCA9600 dirancang untuk mengatasi keterbatasan jarak protokol I2C standar dengan memisahkan jalur SDA dan SCL menjadi dua bagian, sehingga dapat meminimalkan gangguan elektromagnetik dan memungkinkan komunikasi hingga 25 meter.

Perbedaan mendasar pada penelitian ini terletak pada aplikasi praktis PCA9600 untuk mendukung integrasi sensor lingkungan seperti *rain gauge*, barometrik sensor, serta *temperature & humidity sensor*. Selain itu, penelitian ini menggunakan mikrokomputer Raspberry Pi sebagai pengendali utama, menggantikan penggunaan mikrokontroler sederhana seperti Arduino. Penggunaan Raspberry Pi memungkinkan pengelolaan data dari sensor secara lebih terintegrasi, mendukung *monitoring* jarak jauh berbasis internet, serta meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas sistem. Integrasi ini dirancang untuk mendukung pengawasan lingkungan di ekosistem mangrove yang membutuhkan presisi tinggi, stabilitas komunikasi, dan kapabilitas *real-time* dalam memantau parameter *microclimate station*.

Penelitian Kumru dan Vural berjudul "*Design and Application of IoT Based Weather Station for High Voltage Laboratories*" [12] pada tahun 2023 mengembangkan stasiun cuaca berbasis IoT menggunakan Raspberry Pi 4 dan sensor BME680. Metode penelitian meliputi perancangan perangkat keras, perhitungan koefisien koreksi kelembaban dan kepadatan udara secara *real-time*, serta pengembangan antarmuka *website*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perhitungan koefisien koreksi *real-time* dapat secara signifikan mengurangi kesalahan pengukuran tegangan *breakdown* pada elektroda bola.

Perbedaan pada penelitian ini belum mempertimbangkan tantangan yang muncul dalam lingkungan terbuka seperti ekosistem mangrove. Penelitian ini mengisi gap dengan mengembangkan sistem pemantauan mikroiklim yang lebih komprehensif, termasuk implementasi I2C *extender* untuk mengatasi keterbatasan jangkauan komunikasi sensor, serta integrasi sensor tambahan, yaitu sensor barometrik untuk

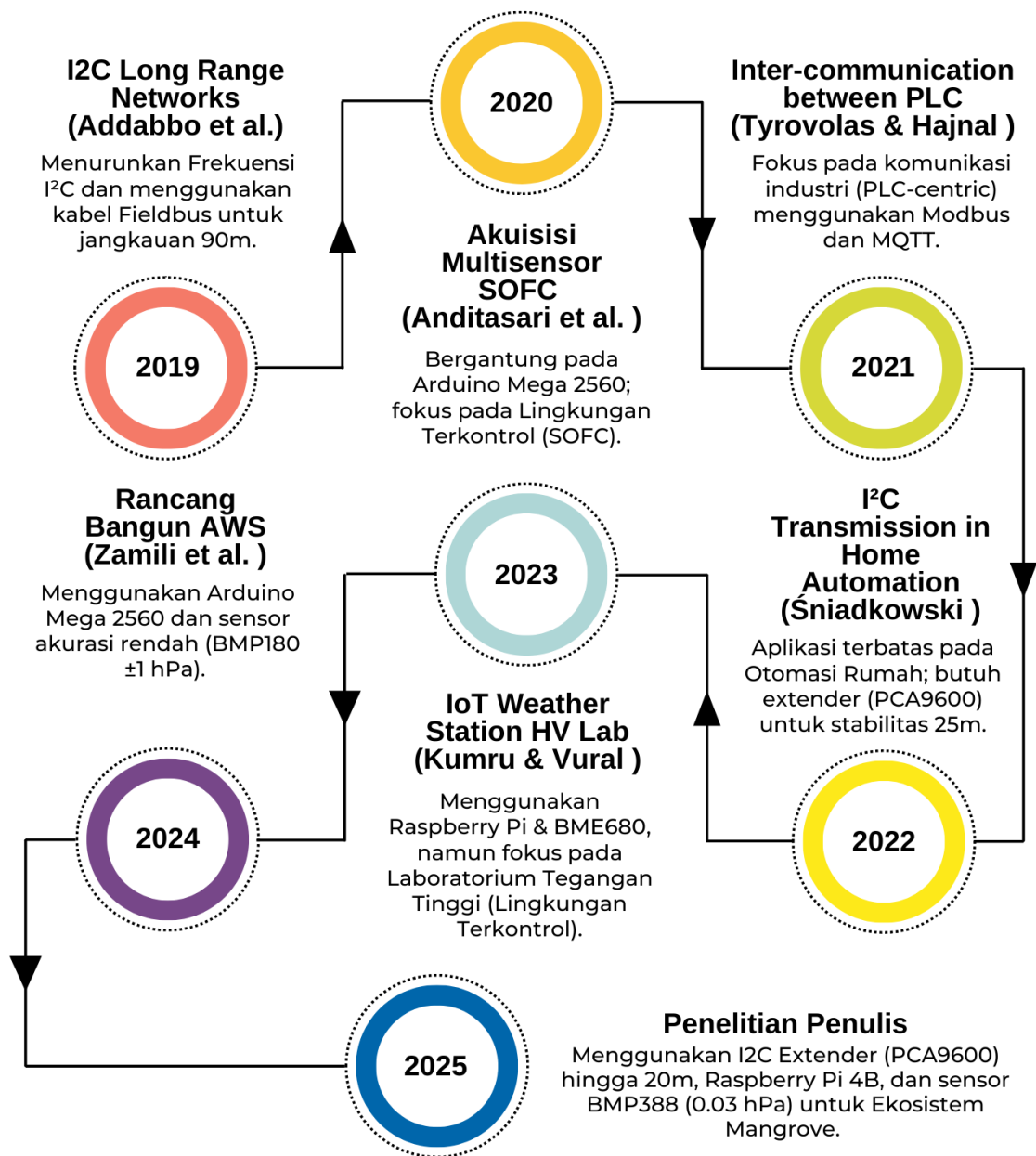
memahami dinamika atmosfer secara lebih menyeluruh. Dengan pendekatan ini, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan pemantauan kondisi lingkungan yang dinamis dan kompleks di ekosistem mangrove, yang tidak dibahas dalam penelitian sebelumnya.

Penelitian Zamili et al. berjudul Rancang Bangun Alat Ukur Data Iklim *Automatic Weather System* (AWS) [13] pada tahun 2024 fokus diarahkan pada perancangan *Automatic Weather System* (AWS) untuk mengukur kondisi iklim menggunakan sensor DHT11, BMP180, dan modul pendeteksi hujan dengan mikrokontroler Arduino Mega 2560. Proses kalibrasi dilakukan dengan membandingkan data sensor DHT11 melalui aplikasi *AccuWeather* dan sensor BMP180 barometer smartphone.

Perbedaan mendasar pada penelitian ini terletak pada penggunaan sensor Barometrik BMP388, yang memiliki akurasi signifikan hingga $\pm 0,03$ hPa, jauh lebih presisi dibandingkan BMP180 dengan akurasi ± 1 hPa. Selain itu, integrasi mikrokomputer Raspberry Pi memungkinkan *remote sensing sensor* secara komprehensif, meningkatkan fleksibilitas dan kapabilitas pemantauan *real-time Microclimate Station*.

Gambar 2.1 merangkum penelitian IoT dan monitoring yang mendasari studi ini. Addabbo et al. (2019) dan Śniadkowski (2022) terbatas pada jangkauan I2C pendek untuk bangunan cerdas dan otomasi rumah. Tyrovolas dan Hajnal (2021) fokus pada komunikasi PLC dengan MQTT dan Modbus RTU, kurang relevan untuk lingkungan terbuka. Anditasari et al. (2020) dan Zamili et al. (2024) menggunakan sensor akurasi rendah (BMP180, DHT11) dan Arduino, lemah dalam pemantauan jarak jauh mangrove.

Penelitian ini mengatasi gap dengan I2C *extender* PCA9600 untuk komunikasi 20 meter pada sensor I2C, sensor presisi BMP388 ($\pm 0,03$ hPa), dan Raspberry Pi untuk *remote sensing real-time*. Berbeda dari Kumru dan Vural (2023) pada laboratorium, pendekatan ini optimalkan monitoring mikroklimat mangrove, mendukung pengelolaan berkelanjutan.



Gambar 2. 1 State of the Art

2.2. Uraian Deskriptif

Uraian informasi dan penjelasan beberapa aspek terkait yang mendasari penelitian mengenai *Microclimate Station* dapat dijabarkan dalam beberapa poin berikut:

2.2.1. *Internet of Things (IoT)*

Internet of Things (IoT) adalah jaringan yang menghubungkan berbagai objek fisik, seperti perangkat elektronik, kendaraan, mesin industri, hingga peralatan rumah tangga, ke internet untuk memungkinkan pertukaran data secara otomatis. IoT menggunakan sensor, perangkat lunak, dan teknologi komunikasi untuk memantau, mengontrol, serta berinteraksi tanpa memerlukan campur tangan manusia secara langsung. Tujuan utama dari IoT adalah menciptakan jaringan perangkat yang saling terhubung dan dapat beroperasi secara mandiri, sehingga dapat meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan kenyamanan di berbagai sektor kehidupan, seperti rumah pintar, industri manufaktur, hingga kesehatan [14].

Secara arsitektur, IoT terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu lapisan persepsi, lapisan jaringan, dan lapisan aplikasi. Lapisan persepsi bertanggung jawab dalam mengidentifikasi objek dan mengumpulkan data menggunakan perangkat seperti sensor dan RFID. Lapisan jaringan berfungsi sebagai penghubung data antara lapisan persepsi dan aplikasi, memastikan informasi dapat dikirim dan diterima secara efisien. Terakhir, lapisan aplikasi memproses data untuk menghasilkan layanan cerdas yang dapat digunakan di berbagai sektor. Teknologi pendukung seperti *cloud computing*, kecerdasan buatan (AI), dan komunikasi *machine-to-machine* (M2M) memainkan peran penting dalam pengelolaan data dan pengambilan keputusan otomatis, sehingga memungkinkan IoT memberikan respons yang cepat terhadap perubahan lingkungan secara *real-time* [15].

2.2.2. *Microclimate Station*

Microclimate Station (MCS) adalah stasiun cuaca otomatis yang dilengkapi dengan perangkat pengukur meteorologi untuk mengamati dan merekam kondisi atmosfer secara mandiri tanpa memerlukan intervensi manusia langsung. MCS digunakan untuk mengukur parameter cuaca seperti suhu udara, kelembapan, tekanan atmosfer, kecepatan dan arah angin, serta curah hujan. Stasiun ini dapat dilengkapi dengan instrumen tambahan, seperti sensor radiasi matahari dan pengukur suhu tanah, yang memperluas kemampuan pemantauan kondisi lingkungan. Data yang

dikumpulkan oleh MCS dikirim secara otomatis ke pusat pemrosesan melalui jaringan komunikasi, memungkinkan pemantauan cuaca di daerah terpencil dan meningkatkan efisiensi serta akurasi dalam pengumpulan data meteorologi [16].

Microclimate Station yang akan dikembangkan telah dilengkapi dengan sejumlah sensor canggih untuk mengumpulkan data lingkungan secara komprehensif. Sensor *Wind Direction* berfungsi menentukan arah angin dengan presisi, dengan mengarahkan *nacelle* turbin agar sejajar dengan arah angin, sehingga dapat memaksimalkan penangkapan energi angin. *Wind speed sensor* mengukur kecepatan angin dengan mengubah berbagai besaran fisik menjadi sinyal Listrik. *Rain Gauge* berperan mengukur jumlah curah hujan yang jatuh ke permukaan bumi. *Rain Gauge* berjenis *Tipping bucket* bekerja dengan mencatat waktu antara setiap kali embernya terisi dan tidak memberikan informasi langsung tentang laju hujan atau curah hujan.

Sensor *temperature and humidity* (sensor suhu dan kelembapan) mengukur suhu dan kelembapan relatif dengan menghasilkan *output* yang sangat baik dengan waktu respon yang sangat cepat. Sensor iradiasi matahari mengukur jumlah total radiasi matahari yang jatuh pada permukaan datar dalam berbagai kondisi dan skala waktu. Sensor Suhu Air (DS18B20) memberikan informasi tentang temperatur cairan dengan tingkat akurasi yang tinggi, yang dapat digunakan untuk mengukur kenaikan suhu dalam air.

2.2.3. Single Board Computer

Single board computer merupakan perangkat komputer berukuran kecil yang dirancang untuk memberikan pengalaman komputasi yang terjangkau dan mudah diakses. Contoh dari *singls board computer* adalah Raspberry Pi yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 mampu menjalankan berbagai fungsi yang biasanya dilakukan oleh komputer konvensional. Selain itu, Raspberry Pi memiliki keunikan dengan menyediakan antarmuka langsung ke pin GPIO (*General Purpose Input/Output*), yang memungkinkan pengguna menghubungkan sirkuit elektronik secara langsung [17].

Pemilihan mikrokomputer ini dikarenakan mendukung pemrograman dengan bahasa Python serta menjalankan berbagai sistem operasi berbasis Linux. Selain itu juga memiliki GPIO yang mampu berkomunikasi langsung dengan berbagai jenis sensor.



Gambar 2.2 Raspberry Pi [18]

Spesifikasi teknis Raspberry pi 4B menunjukkan kapabilitas perangkat ini dalam mendukung berbagai aplikasi. Tabel 2.1 di bawah ini merangkum fitur-fitur utama Raspberry pi 4B, termasuk prosesor, memori, *port*, serta antarmuka yang tersedia.

Tabel 2.1 Deskripsi Spesifikasi Raspberry Pi [19]

Parameter	Spesifikasi
<i>Processor</i>	Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72 64-bit SoC @ 1.5GHz
RAM	1GB, 2GB, 4GB, 8GB LPDDR4-3200 SDRAM
Ethernet	<i>Gigabit</i> Ethernet
<i>Port</i> USB	2 × USB 3.0, 2 × USB 2.0
<i>Header</i> GPIO	40 <i>pin</i> GPIO standar
<i>Port</i> HDMI	2 × <i>micro</i> -HDMI (mendukung 4Kp60)
<i>Port</i> Display dan Kamera	2-lane MIPI DSI, 2-lane MIPI CSI
Audio/Video	4- <i>pole</i> stereo audio dan video komposit

2.2.4. I2C Extender

I2C (*Inter-Integrated Circuit*) adalah protokol komunikasi serial yang menggunakan dua jalur utama, SDA (*Serial Data Line*) dan SCL (*Serial Clock Line*), untuk menghubungkan berbagai perangkat elektronik. Protokol ini memiliki keterbatasan jarak transmisi, biasanya hanya beberapa meter, akibat kapasitansi kabel dan gangguan elektromagnetik. Untuk mengatasi masalah ini, digunakan I2C

Extender, yaitu perangkat yang memperpanjang jangkauan komunikasi dengan cara mengubah sinyal *unidirectional* menjadi dua jalur (*bidirectional*) [11]. I2C *extender* bekerja dengan cara memisahkan sinyal komunikasi I2C menjadi dua jalur satu arah, yaitu jalur TX (*transmit*) dan RX (*receive*), yang memungkinkan sinyal I2C dapat berjalan lebih jauh tanpa terpengaruh kapasitansi yang tinggi pada kabel. Hal ini mengurangi interferensi dan memungkinkan transmisi data yang lebih stabil.

I2C *Extender*, seperti PCA9600 yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 yang digunakan pada penelitian ini mampu memperluas jangkauan hingga 25 meter dan meningkatkan keandalan transmisi bahkan dalam lingkungan dengan gangguan tinggi. I2C *Extender* menjadi solusi penting untuk aplikasi yang memerlukan komunikasi jarak jauh yang andal, seperti otomasi rumah dan industri. Spesifikasi teknis dari I2C *Extender* PCA9600 dijelaskan pada tabel 2.2.



Gambar 2.3 I2C *Extender* PCA9600 [20]

Tabel 2.2 Spesifikasi Teknis I2C Extender

Parameter	Spesifikasi
<i>Working Voltage</i>	2.5~15V
<i>Working Current</i>	5mA
<i>Output Signal</i>	I2C
<i>Transmission Distance</i>	Up to 25m

2.2.5. Barometrik Sensor

Barometrik sensor adalah sensor barometrik canggih, salah satunya adalah BMP388 yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 dikembangkan oleh Bosch untuk aplikasi yang memerlukan pengukuran tekanan dan suhu dengan presisi tinggi. Keunggulan BMP388 terletak pada resolusi tinggi sebesar 0.17 Pa untuk pengukuran tekanan dan waktu respons sangat cepat, hanya 0.005 detik [21].

Pemilihan barometrik sensor pada penelitian ini untuk mengukur tekanan atmosfer di hutan mangrove untuk mengetahui variasi tekanan atmosfer yang terjadi pada kondisi cuaca tertentu. Spesifikasi teknis dari BMP388 secara singkat dapat dilihat melalui tabel 2.3.



Gambar 2.4 BMP388 Barometrik sensor [22]

Tabel 2.3 Spesifikasi BMP388 Barometrik sensor

Parameter	Spesifikasi
<i>Working Voltage</i>	1.65~3.6 V
<i>Working Current</i>	0.0032 mA
<i>Output Signal</i>	I2C, SPI
<i>Detection Range</i>	300 – 1250 hPa

2.2.6. RS485 to USB

RS485 adalah standar komunikasi yang menggunakan mode transmisi diferensial atau *balanced transmission* dengan sepasang kabel *twisted pair*. Dalam sistem ini, terminal A dari semua *node* dihubungkan bersama, begitu pula dengan terminal B. RS485 umumnya menggunakan mode komunikasi *half-duplex master-slave*, di mana satu *host* dapat memiliki beberapa *slave*. Namun, sistem komunikasi yang dapat mengimplementasikan komunikasi *multi-master* pada bus RS485 telah diperkenalkan, memungkinkan komunikasi dua arah dan digital sepenuhnya antara *node multi-host* [23].

Penggunaan antarmuka RS485 dalam berbagai aplikasi yang memerlukan transmisi data yang andal dan efisien. Data yang dikumpulkan dari perangkat diolah oleh mikrokontroler atau *single board computer*, lalu ditransmisikan ke sistem pusat

untuk analisis dan penyimpanan. Penggunaan *converter* RS485 to USB seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 pada penelitian ini bertujuan untuk melakukan konversi sinyal RS485 yang dikeluarkan oleh sensor berjenis RS485, seperti *wind speed sensor*, *wind direction sensor*, dan sensor iradiasi matahari ke dalam bentuk digital.



Gambar 2.5 RS485 to USB [24]

2.2.7. Node-RED

Node-RED adalah *platform* pemrograman berbasis aliran (*Flow-Based Programming*/FBP) yang dirancang untuk mengintegrasikan perangkat keras, layanan *online*, dan API secara visual melalui antarmuka berbasis *browser*. Dikembangkan oleh IBM, Node-RED menggunakan Node.js sebagai *runtime*-nya, memungkinkan pengguna untuk membuat aplikasi tanpa memerlukan keterampilan pemrograman yang mendalam. *Platform* ini sangat berguna dalam *Internet of Things* (IoT) karena memungkinkan koneksi perangkat *edge* ke *platform cloud* dengan cara yang sederhana dan intuitif, menjadikannya alat yang efisien untuk membangun aplikasi *data-driven* [25].

Node-RED telah menjadi komponen penting dalam otomatisasi dan *prototype* cepat di era Industri 4.0. Dengan antarmuka *drag-and-drop*, pengaplikasian Node-RED dapat dengan cara mengatur aliran data, mengintegrasikan sensor, dan memvisualisasikan data secara *real-time*. *Platform* ini juga mendukung protokol komunikasi seperti MQTT, mempercepat transfer data antar perangkat, serta memudahkan pengelolaan dan analisis data untuk meningkatkan efisiensi industri.

2.2.8. Tahapan Pengujian

Pengujian fungsionalitas, durabilitas, dan reabilitas menjadi elemen penting untuk memastikan sistem *Microclimate Station* (MCS) berbasis IoT dapat beroperasi secara optimal dalam memantau parameter lingkungan di kawasan mangrove. Pengujian fungsionalitas bertujuan untuk memastikan setiap komponen sistem, seperti sensor dan modul komunikasi, dapat bekerja sesuai dengan spesifikasi dan menjalankan fungsi yang diharapkan, termasuk dalam pengolahan dan pengiriman data secara *real-time*.

Durabilitas sistem diuji untuk menilai ketahanan perangkat keras dan perangkat lunak terhadap kondisi lingkungan ekstrem, seperti kelembapan tinggi, suhu panas, atau paparan air di kawasan mangrove. Sementara itu, reabilitas sistem mengukur konsistensi dan keandalan data yang dihasilkan oleh sensor serta stabilitas komunikasi data antar perangkat. Pengujian terhadap ketiga aspek ini diperlukan untuk memastikan MCS tidak hanya mampu beroperasi secara efektif, tetapi juga dapat memberikan data yang akurat dan stabil dalam jangka panjang di lingkungan yang dinamis.

2.2.9. Sistem Komunikasi

Sistem komunikasi adalah suatu rangkaian yang memungkinkan pertukaran informasi antara dua atau lebih entitas. Dalam konteks teknologi, sistem komunikasi dapat mencakup berbagai protokol dan antarmuka yang digunakan untuk mentransfer data secara efisien dan efektif. Beberapa protokol komunikasi yang umum digunakan adalah UART, RS485, dan I2C [26].

1. UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*)

Protokol ini memungkinkan komunikasi serial asinkron dengan mengubah data paralel menjadi serial untuk pengiriman. UART dikenal karena kesederhanaan implementasinya, cocok untuk aplikasi seperti komunikasi antar mikrokontroler dan perangkat eksternal.

2. RS485

Protokol ini dirancang untuk komunikasi jarak jauh dengan dukungan *multi-drop*, memungkinkan banyak perangkat terhubung dalam satu jaringan. RS485 menggunakan metode diferensial untuk mengurangi gangguan sinyal, sehingga cocok untuk aplikasi industri yang memerlukan keandalan tinggi.

3. I2C (*Inter-Integrated Circuit*)

I2C memungkinkan komunikasi antar *chip* pada satu *bus* dengan menggunakan dua jalur utama, SDA (*data*) dan SCL (*clock*). Protokol ini efisien untuk menghubungkan beberapa sensor atau perangkat dengan satu pengendali utama, sehingga ideal untuk sistem sensor yang terintegrasi.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini dilakukan pada:

Waktu : Oktober 2024 – Maret 2025

Tempat : Laboratorium Teknik Telekomunikasi dan Laboratorium Baja dan Kayu Fakultas Teknik Universitas Lampung, serta Hutan Mangrove Petengorog di Desa Gebang, Kec. Teluk Pandan, Kab. Pesawaran, Lampung

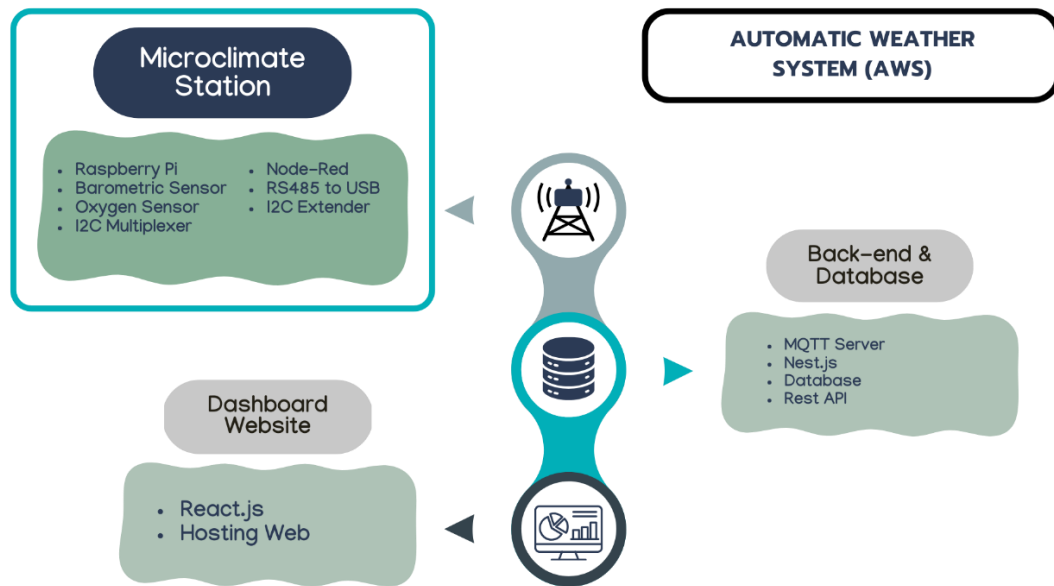
3.2. *Capstone Project*

Penelitian ini merupakan bagian dari kolaborasi dalam mengembangkan *Automatic Weather System (AWS)* pada *Microclimate Station* [16]. Diagram keseluruhan proyek penelitian disajikan pada Gambar 3.1, yang menggambarkan kompleksitas rancangan penelitian dengan pembagian fokus pada beberapa komponen utama. Lingkup proyek mencakup pengembangan perangkat keras untuk pemutakhiran *Microclimate Station* di Hutan Konservasi Mangrove Petengoran, serta perancangan infrastruktur *Back-end* dan *dashboard* berbasis *website*.

Penelitian terfokus spesifik pada perangkat *Microclimate Station* berupa rangkaian sensor *monitoring* serta sistem kontrol. Sub-proyek terkait antarmuka *front-end* dan *back-end* untuk *dashboard monitoring* akan diselesaikan rekan peneliti pada kelompok kolaborasi sama.

Sistem AWS yang diusulkan dirancang sebagai infrastruktur pemantauan otomatis untuk *Microclimate Station*, yang memungkinkan akuisisi data lingkungan secara berkelanjutan dan terstruktur. Melalui mekanisme *monitoring* otomatis, sistem ini

diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam menganalisis dinamika mikroiklim di kawasan hutan konservasi mangrove.



Gambar 3.1 Capstone Project

3.3. Alat dan Bahan

Penelitian yang akan dilaksanakan akan memanfaatkan berbagai komponen dan perangkat lunak sebagai bagian dari proses perancangan dan pengembangan. Rincian komponen serta perangkat lunak yang akan digunakan disajikan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Alat dan Bahan

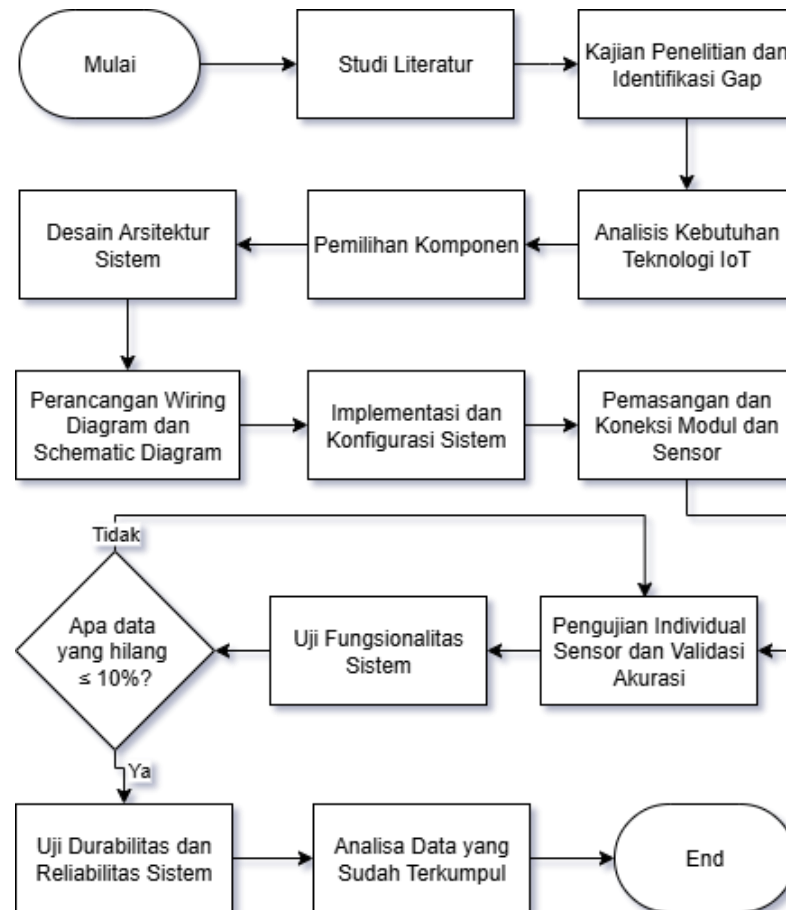
No.	Alat dan Bahan	Keterangan Penggunaan
1	Laptop	Perangkat digital untuk menjalankan proses pengkodean dan pengembangan sistem.
2	Raspberry pi 4 Model B	Pusat pengelolaan data dan pengiriman informasi.
3	Sensor <i>Rain Gauge</i>	Mengukur tingkat curah hujan.
4	<i>Wind speed sensor</i>	Mengukur kecepatan angin.
5	Sensor <i>Wind Direction</i>	Mendeteksi arah angin.
6	Suhu dan kelembapan	Memantau suhu dan kelembapan lingkungan.

No.	Alat dan Bahan	Keterangan Penggunaan
7	Sensor suhu air	Mengukur suhu air.
8	Router Tenda N300	Menghubungkan sistem ke internet.
9	SD Card Memory 32GB	Menyimpan data.
10	Matek Micro BEC	Mengatur dan menyesuaikan tegangan listrik.
11	LC Filter	Mengurangi noise pada tegangan input.
12	Sensor Barometrik	Mengukur tekanan atmosfer.
13	Node-RED	Mengelola aliran data dan memproses hasil pengukuran.
14	Buck-Boost Converter	Mengubah tegangan input.

3.4. Tahapan Penelitian

Penelitian ini berfokus pada pemutakhiran *Automatic Weather System* (AWS) dalam konteks *Microclimate Station* (MCS) sebagai upaya mendukung pemantauan lingkungan. Tahapan pelaksanaan penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan integritas serta keberhasilan penerapan sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things* (IoT) pada mikroklimatologi Hutan Konservasi Mangrove [27].

Tahapan penelitian yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 mencakup beberapa langkah utama yang dimulai dengan studi literatur untuk mengidentifikasi gap penelitian dan menganalisis kebutuhan teknologi IoT pada MCS. Selanjutnya, dilakukan perancangan sistem yang meliputi desain arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak, pemilihan komponen, serta konfigurasi protokol komunikasi. Setelah itu, tahap implementasi dan konfigurasi mencakup pemasangan perangkat keras, instalasi sistem operasi, dan pemrograman akuisisi data sensor. Pengujian sistem dilakukan untuk memverifikasi fungsionalitas dan keandalan, baik secara individual maupun integrasi keseluruhan. Jika pengujian berhasil, penelitian dilanjutkan dengan pengumpulan, analisis, dan validasi data, yang kemudian diakhiri dengan penyusunan laporan penelitian. Seluruh tahapan ini bertujuan mengintegrasikan teknologi AWS dan IoT untuk mendukung pemantauan mikroklimat di kawasan konservasi mangrove secara komprehensif.



Gambar 3.2 Tahapan Penelitian

3.4.1. Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini difokuskan pada analisis komprehensif penggunaan teknologi *Internet of Things* (IoT) di ekosistem mangrove [3]. Melalui telaah sistematis terhadap publikasi ilmiah terkini, teridentifikasi sejumlah gap penelitian yang signifikan, terutama terkait dengan keterbatasan sistem monitoring lingkungan pesisir. Penelitian sebelumnya umumnya masih menghadapi kendala dalam akurasi pengukuran parameter lingkungan dan kontinuitas pemantauan dinamika ekosistem mangrove. Analisis teknologi sensor mutakhir menunjukkan perkembangan pesat dalam kemampuan *sensing*, namun implementasinya di kawasan mangrove masih terbatas.

Kajian mendalam terhadap berbagai referensi ilmiah mengungkapkan kebutuhan akan sistem *monitoring* yang mampu mengintegrasikan *multiple* sensor dengan

kemampuan transmisi data *real-time* dan ketahanan terhadap kondisi lingkungan ekstrem [28]. Berdasarkan evaluasi teknologi sensor terkini, penelitian ini akan menggunakan kombinasi sensor yang dipilih secara spesifik untuk menjawab tantangan *monitoring* ekosistem mangrove, meliputi sensor kecepatan angin, arah angin, *pyranometer*, *rain gauge*, suhu dan kelembapan, dan barometrik. Pemilihan komponen sensor dilakukan dengan mempertimbangkan kriteria akurasi pengukuran, daya tahan perangkat, efisiensi energi, dan keterjangkauan biaya implementasi.

Pendekatan ini diharapkan dapat menghasilkan solusi IoT yang lebih komprehensif dan adaptif dalam memahami dinamika kompleks ekosistem mangrove, sekaligus mengisi celah metodologis yang ada dalam penelitian sebelumnya.

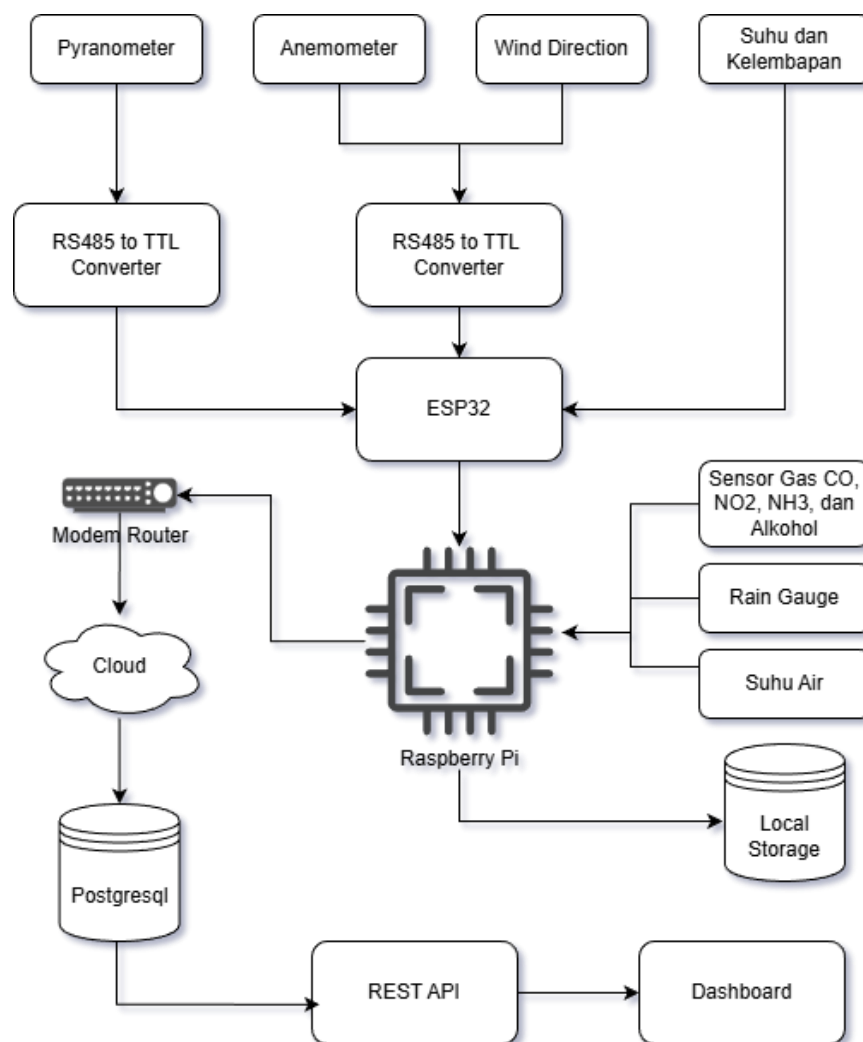
3.4.2. Perancangan Sistem

Perancangan sistem diawali dengan peninjauan sistem lama yang ditampilkan pada Gambar 3.3 Diagram Blok MCS V1. Perangkat *monitoring* atribut iklim pada sistem ini menggunakan *anemometer*, *wind direction*, sensor SHT85, *pyranometer*, sensor MiCS-4514, sensor DS18B20, dan *rain gauge*. Raspberry Pi berfungsi sebagai pusat kendali sekaligus pengoperasian sebagian sensor, sedangkan mikrokontroler ESP32 mengendalikan *pyranometer*, *anemometer*, dan *wind direction* dengan bantuan konverter RS485.

Data hasil akuisisi dari ESP32 ditransmisikan ke Raspberry Pi melalui *port* USB *serial*, digabungkan dengan data dari sensor lain, lalu dikemas dalam format JSON. Data JSON disimpan pada *local storage* dan dikirim ke *cloud* melalui router 4G sebagai *gateway*, kemudian disimpan dalam *database* agar dapat diakses oleh *dashboard front-end* melalui REST API.

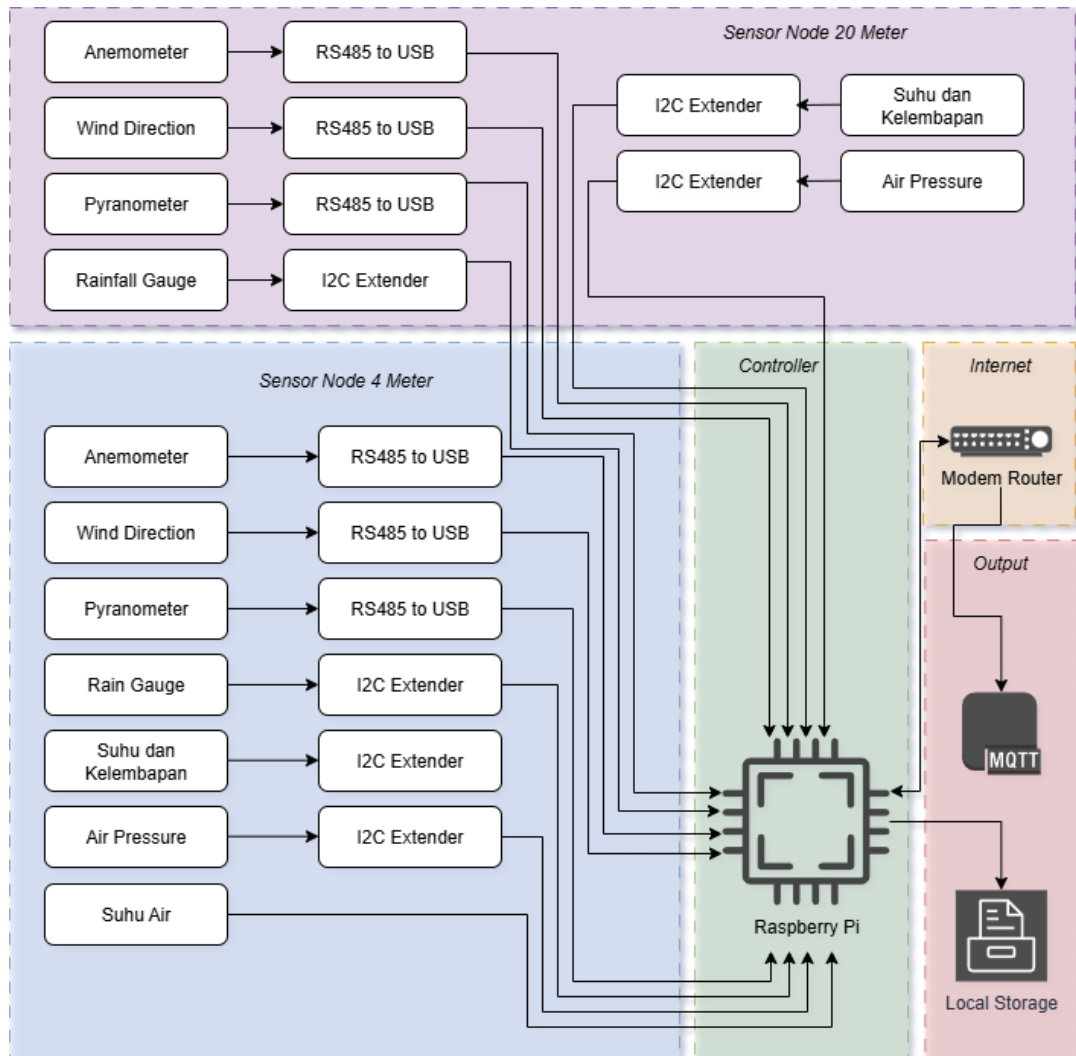
Fokus penelitian ini beralih pada pengembangan sistem baru berupa *Microclimate Station* berbasis *Internet of Things* (IoT) yang terintegrasi di kawasan Hutan Mangrove Petengoran, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.4 Diagram Blok *Microclimate Station*. Sistem baru menggunakan Raspberry Pi 4 Model B sebagai pusat kendali untuk mengumpulkan, memproses, dan mengirimkan data secara *real-time*. Sensor yang digunakan meliputi BMP 388 (barometrik), sensor suhu dan

kelembapan, *rain gauge*, sensor angin, serta sensor iradiasi matahari yang dihubungkan melalui RS485, sementara sensor lainnya menggunakan I2C.



Gambar 3.3 Diagram Blok MCS V1

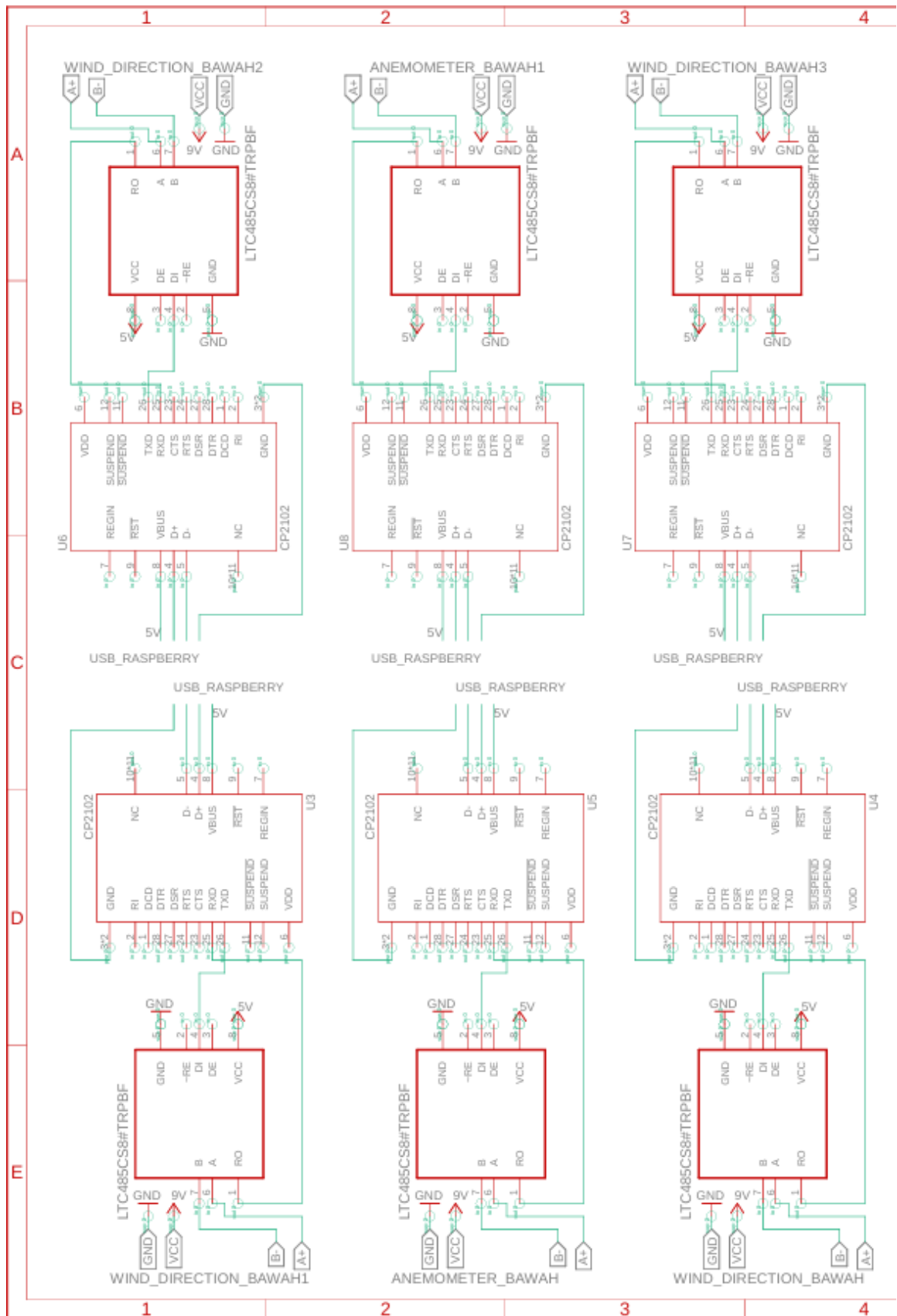
I2C *extender* memperluas jangkauan komunikasi sehingga sensor dapat ditempatkan pada ketinggian optimal di atas 20 meter guna meningkatkan akurasi pengukuran. Seluruh data dikirimkan secara nirkabel ke *server* pusat untuk analisis lebih lanjut. Sistem dilengkapi fitur *remote management* yang mendukung pemantauan, pembaruan perangkat lunak, serta pemeliharaan jarak jauh, sehingga pengumpulan data mikroklimatologi dapat berlangsung akurat dan berkelanjutan.



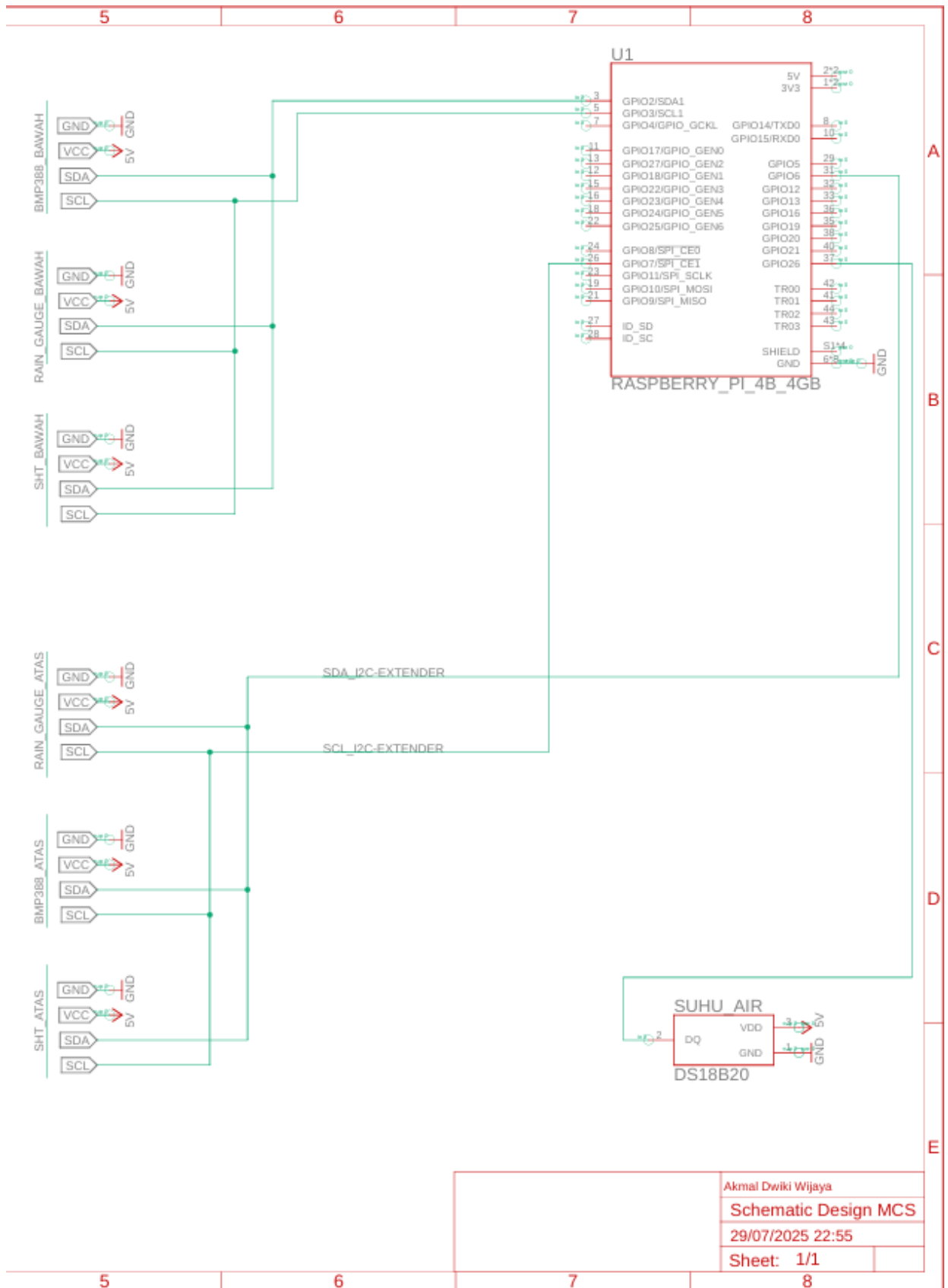
Gambar 3.4 Diagram Blok MCS

3.4.2.1 Perancangan *Schematic Diagram* Perangkat *Microclimate Station*

Langkah awal yang krusial dalam pemutakhiran *Microclimate Station* (MCS) adalah perancangan *schematic diagram*, yang dapat dilihat pada Gambar 3.5. Diagram ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai hubungan antar komponen yang digunakan dalam sistem. Perancangan *schematic diagram* yang mendetail sangat penting untuk memastikan pemutakhiran MCS dilakukan secara terstruktur dan sistematis, serta memberikan informasi yang jelas dalam proses perancangan.



Gambar 3.5a Schematic Diagram Microclimate Station



Gambar 3.6b Lanjutan Schematic Diagram Microclimate Station

Schematic diagram memberikan visual desain komponen-komponen dalam sistem dan menunjukkan bagaimana komponen-komponen tersebut terhubung dan berkomunikasi. Dibandingkan dengan *wiring diagram*, *schematic diagram* memberikan informasi yang lebih mendalam mengenai elemen-elemen teknis dan interaksi di antara perangkat keras. Dalam perancangan *schematic diagram* untuk *Microclimate Station*, digunakan berbagai komponen seperti Raspberry Pi, modul RS485 untuk *wind speed sensor*, iradiasi matahari, dan arah angin, serta sensor DS18B20 untuk suhu air, BMP 388 untuk tekanan atmosfer, dan berbagai sensor lainnya. Setiap jalur penghubung antar komponen digambarkan dengan garis yang dilabeli, memudahkan identifikasi jalur komunikasi dan memastikan konektivitas yang baik antar perangkat untuk memastikan sistem berfungsi secara optimal.

Penggunaan catu daya yang berbeda pada masing-masing komponen, yaitu 5V dan 9V. Pada catu daya 5V digunakan pada I2C Extender, RS485 to USB, dan komponen sensor, seperti sensor curah hujan, sensor suhu dan kelembapan, sensor barometrik, dan sensor suhu air. Pada 9V digunakan pada sensor iradiasi matahari, *wind speed sensor*, dan *wind direction*.

Koneksi yang terhubung pada Raspberry Pi dan modul lainnya disajikan pada Tabel 3.2. berikut.

Tabel 3.2 Koneksi *Schematic Diagram* MCS

Modul Out	Koneksi Pin	Modul In
<i>Wind speed sensor</i>	RS485 to USB	Serial USB Raspberry
Sensor Iradiasi Matahari	RS485 to USB	Serial USB Raspberry
<i>Wind Direction</i>	RS485 to USB	Serial USB Raspberry
Sensor Suhu dan Kelembapan	I2C Pin	I2C Extender
<i>Rain Gauge</i>	I2C Pin	I2C Extender
Sensor Barometrik	I2C Pin	I2C Extender
I2C Extender Rain Gauge	I2C Pin 1 dan 2	TCA9548A
I2C Extender Sensor Suhu dan Kelembapan	I2C Pin 3 dan 4	TCA9548A
I2C Extender Sensor Barometrik	I2C Pin 5 dan 6	TCA9548A
DS18B20	GPIO 26	Raspberry Pi

3.4.2.2 Perancangan *Wiring Diagram* Perangkat *Microclimate Station*

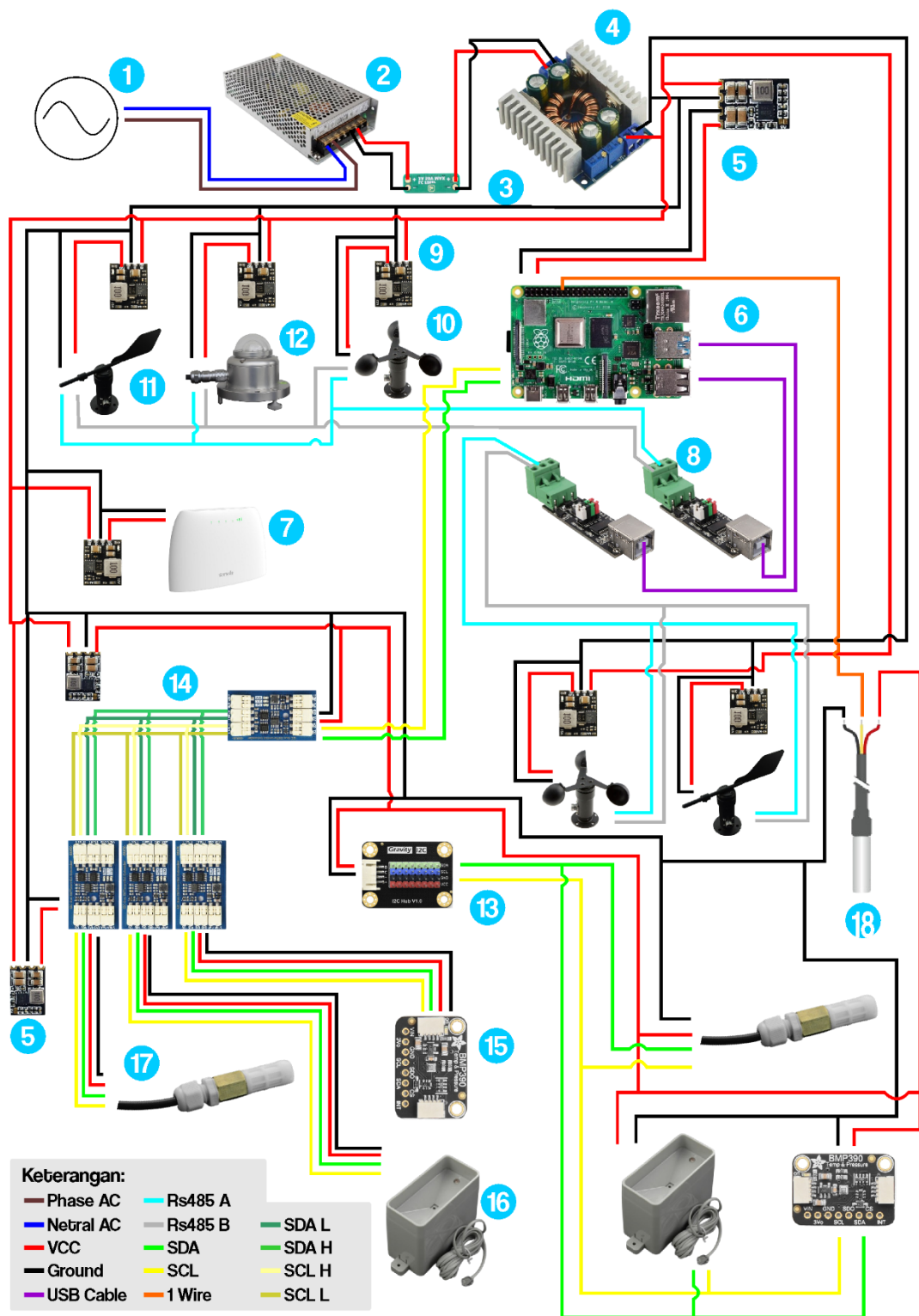
Perancangan *wiring diagram Microclimate Station* (MCS) yang disajikan pada Gambar bertujuan untuk memvisualisasikan dan memastikan koneksi yang tepat antar komponen, seperti Raspberry Pi, sensor-sensor, dan modul pendukung lainnya.

Seperti yang disajikan pada Gambar 3.6, sensor barometrik, sensor curah hujan, serta sensor suhu dan kelembapan dihubungkan melalui jalur I2C dengan bantuan I2C *extender* dan I2C *multi-Bus*, sementara *wind speed sensor*, sensor iradiasi matahari, dan sensor wind direction menggunakan protokol RS485 yang dikonversi ke USB. Selain itu, modul *power supply*, Matek *micro BEC* dan *buck-boost converter*, dirancang untuk mendistribusikan daya secara stabil, didukung LC *Filter* untuk meredam noise. *Wiring diagram* yang dirancang secara rinci ini memastikan setiap komponen bekerja optimal dalam lingkungan mangrove yang menantang, mendukung akurasi dan keberlanjutan pengumpulan data mikroklimatologi.

Secara detail penggunaan komponen yang digunakan pada *wiring diagram* disajikan melalui Tabel 3.3 *Komponen Wiring Diagram*.

Tabel 3.3 *Komponen Wiring Diagram*

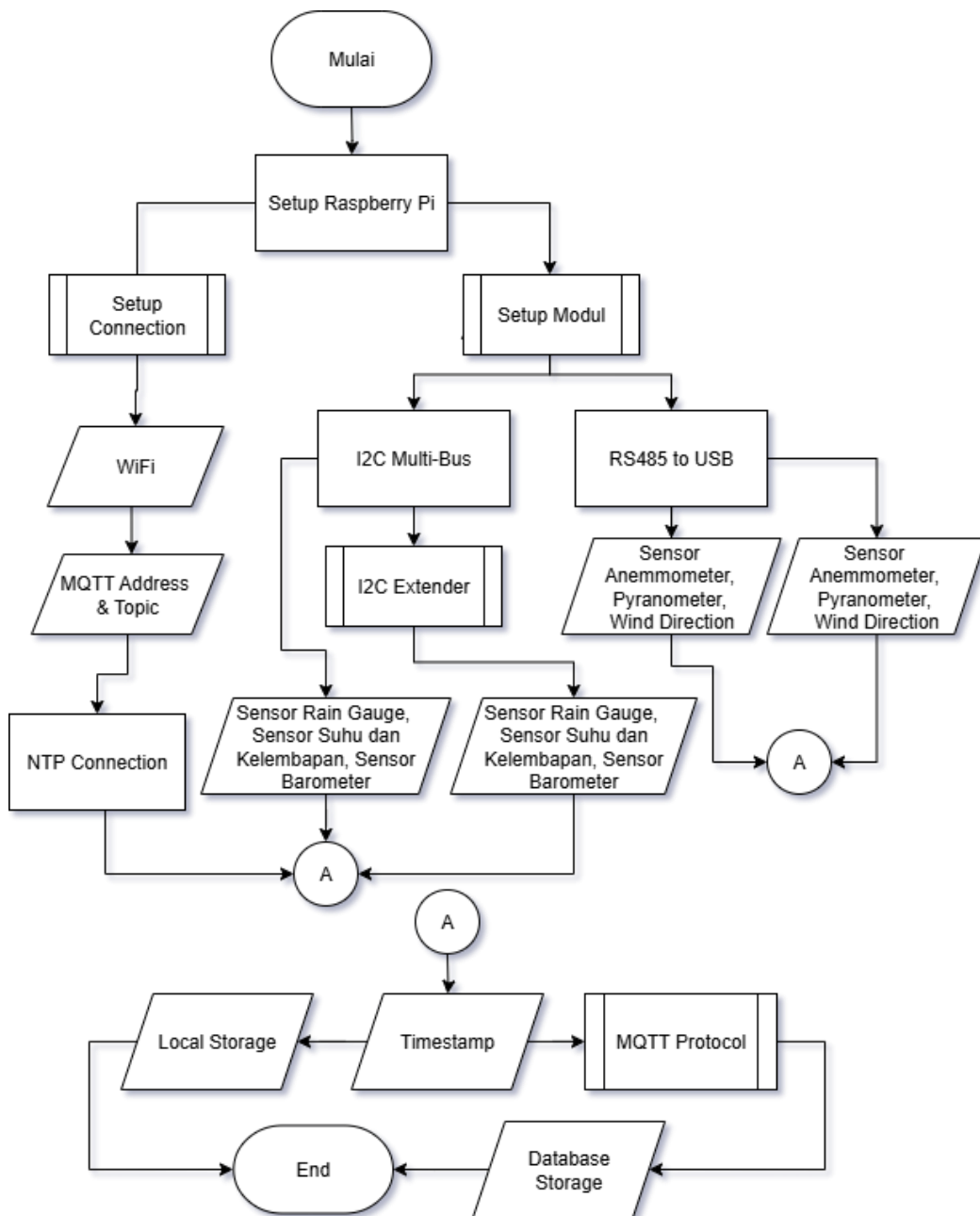
No.	Komponen
1	Sumber Listrik AC 1 Fasa
2	<i>Power Supply AC to DC Converter</i>
3	LC Filter
4	<i>Buck boost Converter</i>
5	<i>Micro BEC to 5V</i>
6	Raspberry Pi
7	Router
8	RS485 to TTL USB
9	<i>Micro BEC to 9V</i>
10	<i>Wind speed sensor</i>
11	<i>Wind Direction</i>
12	Sensor iradiasi matahari
13	I2C <i>Multi-Bus</i>
14	I2C <i>Extender</i>
15	<i>Air Pressure Sensor</i>
16	Sensor Curah Hujan
17	Sensor Suhu dan Kelembapan
18	DS18B20



Gambar 3.7 Wiring Diagram

3.4.2.3 Perancangan Alur Program *Microclimate Station*

Alur program *Microclimate Station* (MCS) dirancang untuk memastikan pengumpulan data mikroklimatologi yang akurat dan *real-time* di kawasan hutan mangrove.



Gambar 3.8 Diagram Alir Perancangan Alur Program

Proses ini disajikan pada Gambar 3.7 diagram alir perancangan alur program dengan konfigurasi Raspberry Pi sebagai pusat kendali, di mana koneksi jaringan

diatur melalui pengaturan alamat MQTT, topik komunikasi, koneksi Wi-Fi, serta sinkronisasi waktu menggunakan *Network Time Protocol* (NTP) agar data yang dihasilkan memiliki penanda waktu yang tepat. Modul sensor diintegrasikan dengan bantuan I2C *multi-Bus* milik Raspberry Pi, yang memperluas jalur komunikasi I2C untuk menghubungkan sensor-sensor utama seperti *rain gauge*, sensor suhu dan kelembapan, dan sensor barometrik. Sensor tambahan seperti *wind speed sensor*, sensor iradiasi matahari, dan sensor arah angin terhubung melalui protokol RS485 yang dikonversi ke USB, memungkinkan pemantauan parameter atmosfer secara menyeluruh.

Setelah data dikumpulkan oleh sensor, sistem menambahkan *timestamp* dan menyimpannya secara lokal di Raspberry Pi. Data ini kemudian dikirimkan ke server menggunakan protokol MQTT untuk penyimpanan di basis data, memastikan bahwa informasi lingkungan dapat diakses dan dianalisis secara *real-time*. Alur ini dirancang untuk mendukung pengelolaan ekosistem mangrove secara berkelanjutan dengan menyediakan data yang presisi dan dapat diandalkan.

3.4.2.4 Skenario Akuisisi Data

Skenario akuisisi data dalam penelitian ini difokuskan pada pengumpulan data lingkungan di ekosistem mangrove Petengoran, Desa Gebang, menggunakan *Microclimate Station* berbasis *Internet of Things* (IoT). Data akan dikumpulkan dari berbagai sensor yang dipasang di lokasi, seperti *wind speed sensor*, *wind direction*, sensor iradiasi matahari, suhu dan kelembapan, barometrik, dan curah hujan. Setiap sensor akan mengirimkan data setiap 1 menit ke Raspberry Pi sebagai pusat pemrosesan. Raspberry Pi kemudian memproses data yang diterima, menampilkannya untuk validasi awal, dan mengekstrak nilai numerik (*float*) tanpa menyertakan nama variabel. Setelah itu, setiap parameter data diberi label sesuai jenisnya, dan data yang sudah diproses dikemas dalam format JSON untuk dikirim ke server MQTT secara paralel untuk penyimpanan dan analisis lebih lanjut, serta disimpan dalam file CSV secara *real-time* untuk memungkinkan pemantauan terus-menerus dan analisis historis.

3.4.3. Pemasangan Setiap Modul

Setelah perancangan sistem selesai, tahap selanjutnya adalah implementasi fisik dari komponen-komponen yang telah direncanakan. Sensor baru, yaitu sensor barometrik, dipasang pada *tower* di tengah kawasan hutan mangrove untuk mendapatkan pengukuran yang lebih mendalam tentang kondisi mikroklimatologi. Sensor-sensor yang berkomunikasi menggunakan I2C, seperti curah hujan, sensor barometrik dan sensor suhu dan kelembapan, dihubungkan dengan I2C *extender* untuk memperluas jangkauan komunikasi. Raspberry Pi 4 Model B diintegrasikan pada *tower* sebagai pusat pengolahan data yang mengumpulkan, mengolah, dan mengirimkan data secara *real-time* ke server. Pemasangan sistem ini memastikan bahwa setiap sensor dapat berkomunikasi secara efisien melalui jaringan IoT, meskipun berada di lokasi yang terpencil, mendukung pemantauan kondisi mikroklimatologi yang akurat dan berkelanjutan di ekosistem mangrove.

3.4.4. Uji Coba

Tahapan uji coba merupakan komponen vital dalam pengembangan sistem mikroklimatologi untuk pemantauan kawasan mangrove. Proses ini dirancang secara metodis untuk memvalidasi keandalan sistem dalam menghasilkan data lingkungan yang akurat dan konsisten. Pengujian dilaksanakan melalui dua tahap utama yang saling melengkapi untuk memastikan sistem dapat beroperasi secara optimal dalam berbagai kondisi lingkungan mangrove.

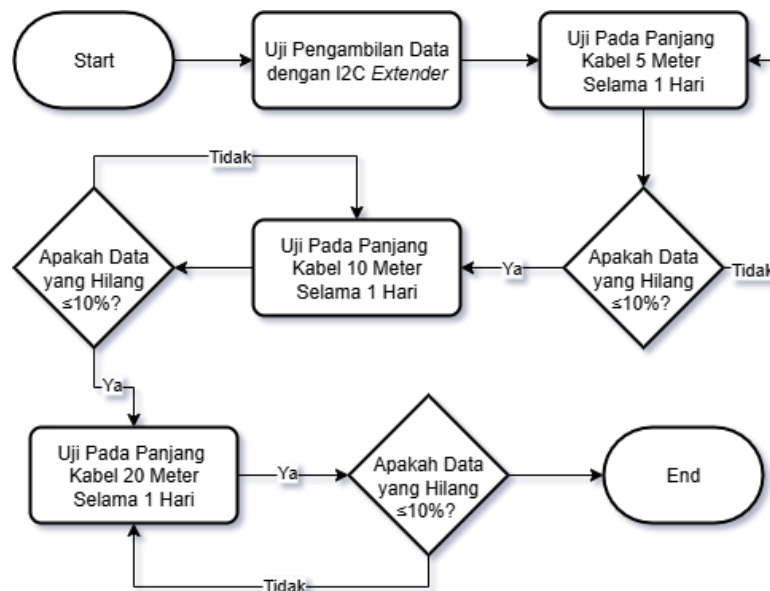
Tahap pertama merupakan uji fungsionalitas dasar yang berlangsung selama tiga hari, dengan fokus utama pada verifikasi kinerja setiap komponen sistem. Pengujian ini mencakup evaluasi menyeluruh terhadap kemampuan sensor barometrik dalam mendeteksi tekanan dan suhu udara, selain itu, tahap ini juga menguji reliabilitas konektivitas antara setiap sensor dengan Raspberry Pi sebagai unit pemroses utama.

Tahap kedua berlangsung selama tujuh hari, berfokus pada pengujian sistem secara terintegrasi dalam kondisi operasional yang lebih menantang di *Microclimate Station* [29]. Pada tahap ini, sistem diuji untuk mengevaluasi tiga aspek kritis:

fungsionalitas terintegrasi, durabilitas terhadap kondisi lingkungan, dan reliabilitas dalam pengumpulan data.

1. Aspek fungsionalitas, pengujian mencakup kemampuan sistem dalam merespons dan merekam perubahan parameter lingkungan secara *real-time*.
2. Aspek durabilitas diuji melalui paparan sistem terhadap berbagai kondisi cuaca, termasuk perubahan suhu ekstrem, kelembaban tinggi, dan potensi paparan air hujan.
3. Aspek reliabilitas sistem dinilai melalui konsistensi pengumpulan dan transmisi data, serta kemampuan sistem dalam mempertahankan akurasi pengukuran selama periode pengujian.

Sebagai komplemen dari kedua tahap utama tersebut, dilakukan pengujian tambahan untuk mengevaluasi reliabilitas pengambilan data dari sensor untuk ditempatkan pada ketinggian 20 meter. Pengujian ini menggunakan variasi panjang kabel mulai dari 5, 10, dan 20 meter, dengan durasi satu hari untuk setiap variasi jarak untuk sensor yang terhubung dengan I2C *extender* seperti yang digambarkan pada *flow chart* pada Gambar 3.8.



Gambar 3.9 Uji Coba I2C Extender

Tujuan spesifik dari pengujian ini adalah untuk mengidentifikasi potensi degradasi sinyal atau kehilangan data yang mungkin terjadi akibat variasi panjang kabel, yang dapat mempengaruhi reliabilitas sistem secara keseluruhan, dengan tolok ukur

bahwa jumlah data yang hilang tidak kurang dari atau sama dengan 10% selama 1 hari.

3.4.5. Indikator Keberhasilan

Indikator keberhasilan pengembangan *Microclimate Station* (MCS) dirancang sebagai instrumen komprehensif untuk mengevaluasi kinerja sistem pemantauan mikroklimatologi di kawasan hutan mangrove. Evaluasi dilakukan melalui serangkaian kriteria terukur yang mencakup aspek fungsional, teknis, dan performatif sistem. Tabel 3.5 berikut menggambarkan parameter kunci yang akan digunakan untuk mengukur keberhasilan implementasi teknologi IoT dalam mendukung penelitian lingkungan berkelanjutan, dengan fokus utama pada akurasi pengukuran, stabilitas komunikasi, dan ketahanan sistem dalam kondisi lapangan yang dinamis dan menantang.

Tabel 3.4 Indikator Keberhasilan

No.	Kriteria Evaluasi	Indikator Kinerja	Satuan Pengukuran	Nilai Target	Hasil Aktual	Keterangan
1	Fungsionalitas Sensor	Keberhasilan pengambilan data iradiasi matahari, <i>wind speed</i> , <i>wind direction</i> , barometrik, curah hujan, suhu, dan kelembapan	Persentase data	$\geq 90\%$		
2	Adaptabilitas Sistem	Kemampuan sistem bertahan pada variasi kondisi mikroklimatologi	Ya/Tidak	Ya		
3	Stabilitas Komunikasi	Konsistensi pengiriman data <i>real-time</i>	Menit	1 menit/data		
		Jarak komunikasi sensor	Meter	20 m		

No.	Kriteria Evaluasi	Indikator Kinerja	Satuan Pengukuran	Nilai Target	Hasil Aktual	Keterangan
4	Akurasi Data	Kehandalan komunikasi I2C <i>extender</i>	Ya/Tidak	Ya		
		Presisi pengukuran sesuai spesifikasi sensor	Persentase data valid	$\geq 90\%$		
		Ketahanan perangkat pada kondisi lingkungan ekstrem	Ya/Tidak	Ya		
5	Durabilitas Komponen	Tidak ada kerusakan komponen selama 7 hari	Ya/Tidak	Ya		
6	Integrasi Teknologi	Kinerja sistem konsisten	Ya/Tidak	Ya		
		Keberhasilan migrasi sistem	Ya/Tidak	Ya		

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Optimalisasi sistem komunikasi dengan I2C *Extender* Implementasi I2C *Extender* PCA9600 berhasil memperpanjang jangkauan komunikasi sensor hingga 20 meter dengan tingkat keberhasilan pengambilan data rata-rata sebesar 99,6% untuk sensor I2C di *node* 1 (ketinggian 4 meter) dan 99,7% di *node* 2 (ketinggian 20 meter). Akurasi data sensor I2C, seperti suhu dan kelembapan serta tekanan atmosfer, mencapai 100% sesuai rentang operasional (-40°C hingga 125°C untuk suhu, 0-100% untuk kelembapan, dan 300-1250 hPa untuk tekanan atmosfer), menunjukkan stabilitas komunikasi yang tinggi dalam lingkungan mangrove yang menantang.
2. Integrasi sensor barometrik BMP388 berhasil diintegrasikan ke dalam MCS, menghasilkan data tekanan atmosfer dengan akurasi $\pm 0,03$ hPa. Data barometrik menunjukkan korelasi tinggi antara *node* 1 dan *node* 2 dengan perbedaan rata-rata tekanan sebesar 2 hPa (1012 hPa di *node* 1 dan 1010 hPa di *node* 2) selama periode pengujian 16-22 Juli 2025. Fluktuasi harian tekanan atmosfer terbatas pada 2 hPa, memberikan data yang konsisten untuk analisis dinamika atmosfer di ekosistem mangrove.
3. Pengembangan sistem berbasis Raspberry Pi sistem berbasis Raspberry Pi 4 berhasil menyentralisasi pengelolaan data lingkungan dengan pengambilan data setiap 1 menit, mencapai konsistensi waktu 100% melalui sinkronisasi NTP. Tingkat kelengkapan data sensor berkisar antara 94,2% (sensor Modbus di *node* 2) hingga 99,9% (sensor I2C di *node* 1), dengan pengiriman data ke *broker*

MQTT secara *real-time* melalui Node-RED. Sistem ini juga mendeteksi kegagalan komunikasi sensor secara dini, memastikan keandalan pemantauan mikroklimat dengan keberhasilan operasional 100% selama pengujian 7 hari.

5.2. Saran

Berdasarkan temuan dan keterbatasan yang ada selama pelaksanaan penelitian, berikut beberapa saran yang dapat dijadikan acuan untuk pengembangan dan penelitian lanjutan:

1. Optimalisasi pengolahan data sistem pengolahan data yang saat ini dilakukan melalui Node-RED dapat dioptimalkan dengan migrasi ke skrip Python murni. Pendekatan ini akan meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya sistem dan meminimalkan *overhead* yang terkait dengan lingkungan pemrograman visual. Dengan mengonsolidasikan seluruh proses, dari akuisisi sensor hingga pengiriman data, ke dalam satu basis kode, arsitektur sistem akan menjadi lebih ringkas dan mudah dipelihara di masa depan.
2. Penentuan jumlah percobaan pembacaan sensor untuk meningkatkan keandalan pengambilan data, perlu dilakukan analisis berdasarkan *datasheet* sensor guna menentukan jumlah maksimum percobaan (*retry*) pembacaan data yang optimal. Hal ini akan memastikan akurasi data maksimal sambil meminimalkan risiko kegagalan komunikasi, terutama pada sensor I2C dan RS485 dalam kondisi lingkungan yang bervariasi.
3. Peningkatan keamanan jaringan untuk implementasi jangka panjang atau skala besar, sistem perlu dilengkapi dengan fitur keamanan jaringan dan enkripsi data. Langkah ini penting untuk menjaga integritas dan kerahasiaan data yang dikirimkan melalui jaringan, terutama saat data lingkungan sensitif dipublikasikan ke *cloud* melalui protokol MQTT.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. H. Kusuma, E. Efendi, and H. Mayagues, "Identifikasi Sampah Anorganik di Desa Gebang, Kecamatan Teluk Pandan, Kabupaten Pesawaran, Provinsi Lampung," *Jurnal Perikanan Unram*, vol. 12, no. 4, pp. 575–587, Dec. 2022, doi: 10.29303/jp.v12i4.370.
- [2] R. Taufik, I. Adi Pribadi, I. Sabda Ilman, and R. Sholehurrohman, "Manajemen Wordpress untuk Menginformasikan Profil Dan Potensi Desa di Desa Gebang Kecamatan Teluk Pandan Kabupaten Pesawaran Lampung," *Journal of Social Sciences and Technology for Community Service*, vol. 4, no. 1, 2023, doi: 10.33365/jsstcs.v4i1.2534.
- [3] Aryanto, I. Mirda, Melvi, and A. Ulvan, "Pelestarian Hutan Mangrove Daerah Pesisir dalam Upaya Antisipasi Perubahan Iklim," *Nusantara: Jurnal Ilmu Pengetahuan Sosial*, vol. 11, no. 3, pp. 882–890, 2024, doi: 10.31604/jips.v11i3.2024.882-890.
- [4] J. L. Devaney, M. Lehmann, I. C. Feller, and J. D. Parker, "Mangrove microclimates alter seedling dynamics at the range edge," *Ecology*, vol. 98, no. 10, pp. 2513–2520, Oct. 2017, doi: 10.1002/ecy.1979.
- [5] M. A. Hairuddin, N. D. K. Ashar, A. F. Z. Abidin, and N. Md. Tahir, "Cost-Effective Interfaces with Arduino-LabVIEW for an IOT-Based Remote Monitoring Application," *LabVIEW - A Flexible Environment for Modeling and Daily Laboratory Use*, 2021, doi: 10.5772/intechopen.97784.
- [6] K. P. K. Rianti and Y. Prastyo, "Analisis Penggunaan Sensor Suhu dan Kelembaban untuk Monitoring Lingkungan Greenhouse Berbasis Arduino," *Antivirus : Jurnal Ilmiah Teknik Informatika*, 2022, doi: 10.35457/antivirus.v16i2.2512.
- [7] S. R. Khabibi, J. E. Poetro, and A. T. Nugraha, "Rancang Bangun Panel Sistem Kontrol dan Monitoring Motor 3 Fasa Dual Speed Berbasis Mikrokontroler," *Elektriese: Jurnal Sains dan Teknologi Elektro*, 2022, doi: 10.47709/elektriese.v10i02.1638.

- [8] T. Addabbo, A. Fort, M. Mugnaini, S. Parrino, A. Pozzebon, and V. Vignoli, "Using the I2C bus to set up Long Range Wired Sensor and Actuator Networks in Smart Buildings," in *2019 4th International Conference on Computing, Communications and Security (ICCCS)*, 2019, pp. 1–8. doi: 10.1109/CCCS.2019.8888085.
- [9] P. Anditasari, S. Sudjadi, and D. Darjat, "Perancangan Sistem Akuisisi Data Multisensor (Oksigen, Hidrogen, Suhu, Aliran, Tekanan, Arus, dan Tegangan) Berbasis Human Machine Interface," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 9, no. 1, pp. 107–114, Mar. 2020, doi: 10.14710/transient.v9i1.107-114.
- [10] M. Tyrovolas and T. Hajnal, "Inter-communication between Programmable Logic Controllers using IoT technologies: A Modbus RTU/MQTT Approach," 2021, *arXiv*. doi: 10.48550/ARXIV.2102.05988.
- [11] M. Śniadkowski, "Increasing Transmission of Inter-Integrated Circuit in Home Automation Solutions," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 16, no. 6, pp. 50–54, Dec. 2022, doi: 10.12913/22998624/155215.
- [12] C. F. KUMRU and M. S. VURAL, "Design and Application of IoT Based Weather Station for High Voltage Laboratories," *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, vol. 11, no. 3, pp. 1190–1201, Sep. 2023, doi: 10.21923/jesd.1288951.
- [13] B. Zamili, Hermantoro, and Superman, "Rancang Bangun Alat Ukur Data Iklim Automatic Weather Station (AWS)," *Agricultural Engineering Innovation Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 28–36, Jan. 2024, doi: 10.55180/aei.v2i1.766.
- [14] S. Vadlamudi, "An Introduction to Internet of Things, Artificial Intelligence, and Machine Learning," 2021. Accessed: Nov. 28, 2024. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=Q9uXzgEACAAJ>

- [15] B. Wang, X. Liu, and Y. Zhang, "Internet of Things," in *Internet of Things and BDS Application*, B. Wang, X. Liu, and Y. Zhang, Eds., Singapore: Springer Singapore, 2022, pp. 71–127. doi: 10.1007/978-981-16-9194-2_2.
- [16] K. Ioannou, D. Karampatzakis, P. Amanatidis, V. Aggelopoulos, and I. Karmiris, "Low-cost automatic weather stations in the internet of things," Apr. 01, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/info12040146.
- [17] G. Halfacree, *Fully Updated for Raspberry PI 400 Raspberry Pi Beginner's Guide*, vol. 1. 2020.
- [18] I. Mouser Electronics, "Rpi4-Modbp-4gb-Bulk Raspberry Pi," Mouser Electronics, Inc., [Online]. Available: <https://bit.ly/41Be61t>. [Accessed 1 12 2024].
- [19] T. Maragatham, P. Balasubramanie, and M. Vivekanandhan, "IoT Based Home Automation System using Raspberry Pi 4," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1055, no. 1, p. 012081, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1055/1/012081.
- [20] S. Electronics, "PCA9600 Differential I2C Long Cable Extender with Boost Convertor," Sandbox Electronics, [Online]. Available: <https://bit.ly/3OFvryA>. [Accessed 1 12 2024].
- [21] K. S. Ladino, M. P. Sama, and V. L. Stanton, "Development and Calibration of Pressure-Temperature-Humidity (PTH) Probes for Distributed Atmospheric Monitoring Using Unmanned Aircraft Systems," *Sensors*, vol. 22, no. 9, p. 3261, Apr. 2022, doi: 10.3390/s22093261.
- [22] DFRobot, "Fermion: BMP388 Digital Barometric Pressure Sensor (Breakout)," DFRobot, [Online]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-2432.html>. [Accessed 2 12 2024].
- [23] Y. Cheng-ying and C. Yong, "Research on Multi-master Communication System Based on RS485 Bus," *J Phys Conf Ser*, vol. 1237, no. 4, p. 042078, Jun. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1237/4/042078.

- [24] D. Electronics, "USB to RS485 Module FT232 Chip USB to TTL/RS485 Double Function," tokopedia, [Online]. Available: <https://bit.ly/3ZApn0d>. [Accessed 2 12 2024].
- [25] K. Ferencz and J. Domokos, "Using Node-RED platform in an industrial environment," in *XXXV. Jubileumi Kandó Konferencia*, Tîrgu Mureş, Romania: Sapientia Hungarian University of Transylvania, Feb. 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/339596157>
- [26] M. Trehan, P. Kumar, and N. Gaur, "Design and Analysis of Multi-Protocol Conversion Unit for SPI, I2C and UART," in *2024 2nd International Conference on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies (DICCT)*, IEEE, Mar. 2024, pp. 324–329. doi: 10.1109/DICCT61038.2024.10533106.
- [27] A. R. Rumei, "IoT System for Remote Monitoring of Mangrove Forest the Sundarbans," *Journal of Computer Sciences Institute*, vol. 20, pp. 254–258, Sep. 2021, doi: 10.35784/jcsi.2703.
- [28] S. Ranjan Laha, B. K. Pattanayak, and S. Pattnaik, "Advancement of Environmental Monitoring System Using IoT and Sensor: A Comprehensive Analysis," *AIMS Environ Sci*, vol. 9, no. 6, pp. 771–800, 2022, doi: 10.3934/environsci.2022044.
- [29] G. Sanhaji, H. Sholahudin, and I. A. Rahman, "Internet of Things (IoT) Based Micro Climate Control Optimization System for Tropical Greenhouses in Responding to Climate Change," *International Journal of Research and Review*, vol. 11, no. 9, pp. 141–151, Sep. 2024, doi: 10.52403/ijrr.20240916.