

**SISTEM PENDETEKSI PENCEMARAN AIR SUNGAI
BERBASIS IOT DAN KOMUNIKASI LORA**



Disusun Oleh:

N a m a : Rasyid Achmad Fauzi

NIM : 21523182

**PROGRAM STUDI INFORMATIKA – PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

2026

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING

**SISTEM PENDETEKSI PENCEMARAN AIR SUNGAI
BERBASIS IOT DAN KOMUNIKASI LORA**

TUGAS AKHIR



N a m a : Rasyid Achmad

NIM : 21523182



Yogyakarta, 21 Januari 2026

Pembimbing,

(Kurniawan Dwi Irianto, S.T., M.Sc)

HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PENGUJI

SISTEM PENDETEKSI PENCEMARAN AIR SUNGAI BERBASIS IOT DAN KOMUNIKASI LORA

TUGAS AKHIR

Telah dipertahankan di depan sidang penguji sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Komputer dari Program Studi Informatika – Program Sarjana di Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta, 21 Januari 2026

Tim Penguji

Kurniawan Dwi Irianto, S.T., M.Sc.

Anggota 1

Moh. Idris, S.Kom., M.Kom.

Anggota 2

Ahmad Fathan Hidayatullah, ST, M.Cs., Ph.D.

الجمعة الالهية
Mengetahui,

Ketua Program Studi Informatika – Program Sarjana
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia



(Ir. Dhomas Hatta Fudholi, S.T., M.Eng., Ph.D.)

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rasyid Achmad Fauzi

NIM : 21523182

Tugas akhir dengan judul:

**SISTEM PENDETEKSI PENCEMARAN AIR SUNGAI
BERBASIS *IOT* DAN KOMUNIKASI *LORA***

Menyatakan bahwa seluruh komponen dan isi dalam tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri. Apabila di kemudian hari terbukti ada beberapa bagian dari karya ini adalah bukan hasil karya sendiri, tugas akhir yang diajukan sebagai hasil karya sendiri ini siap ditarik kembali dan siap menanggung risiko dan konsekuensi apapun.

Demikian surat pernyataan ini dibuat, semoga dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Yogyakarta, 9 Desember 2025

A handwritten signature in black ink is written over a yellow 6000 Rupiah postage stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text 'METERAI TEMPEL' and 'E1453ANX187360996'.

(Rasyid Achmad Fauzi)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji syukur ke hadirat Allah SWT, yang dengan rahmat, kasih sayang, dan kuasanya memberikan kekuatan serta kelapangan hati kepada penulis, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik di tengah berbagai tantangan dan keterbatasan.

Dengan penuh rasa hormat dan cinta yang tak terhingga, karya sederhana ini kupersembahkan untuk kedua orang tuaku tercinta, Ayahanda Sutrasno dan Ibunda Wiwik Latifah. Doa, pengorbanan, serta kasih sayang tulus tanpa pamrih dari kalian telah menuntunku pada setiap jalan kebaikan, membekali langkah-langkahku dengan kekuatan dan keyakinan bahwa tidak ada mimpi yang terlalu tinggi selama keyakinan dan usaha tidak padam. Semoga setiap langkah yang kutempuh dapat menjadi kebahagiaan dan kebanggaan untuk kalian, seperti halnya kalian telah menjadi sumber inspirasi sepanjang hidupku.

Teruntuk adikku tercinta, Virginita Dinda Aviaseka. Terima kasih atas keceriaan, kehangatan, dan semangat sederhana yang selama ini kau bagikan. Dukunganmu, baik lewat candaan maupun doa, selalu menjadi pelipur lelah dan pengingat untuk tidak mudah menyerah. Sebuah ucapan terima kasih yang istimewa juga penulis persembahkan kepada Felisa Rahmawati. Terima kasih atas semua kebersamaan, perhatian, semangat, dan ketulusan yang selalu hadir baik di saat suka maupun duka. Doamu dan dukunganmu menjadi penyemangat penulis melewati setiap proses dalam perjalanan ini.

Skripsi ini juga dipersembahkan kepada Bapak Kurniawan Dwi Irianto, S.T., M.Sc., dosen pembimbing yang telah sabar membimbing, memberi arahan, dan menumbuhkan semangat selama proses penyusunan hingga tugas akhir ini tuntas. Ucapan terima kasih tak lupa disampaikan kepada seluruh dosen, staf, serta teman-teman seperjuangan yang telah membantu dalam tawa, kerja keras, dan perjuangan di setiap langkah di kampus ini.

Akhir kata, penulis berharap karya kecil ini dapat menjadi bentuk pengabdian dan ucapan syukur atas kesempatan belajar yang telah Allah SWT berikan. Semoga skripsi ini membawa manfaat, menjadi awal dari perjalanan yang lebih besar, serta senantiasa diridai dan diberkahi oleh Allah SWT.

HALAMAN MOTO

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا

(QS. Al-Insyirah: 6)

"Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan."

Kerja keras, doa, dan keikhlasan adalah kunci menuju keberhasilan. "Kesuksesan sejati bukan hanya tentang pencapaian, melainkan tentang proses dan pembelajaran di setiap langkah."

Jangan pernah lelah untuk mencoba, karena Allah SWT senantiasa melihat usaha dan doamu.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul:

"Sistem Pendeteksi Pencemaran Air Sungai Berbasis Iot dan Komunikasi LoRa"

Skripsi ini disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana di Program Studi Informatika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia.

Penyusunan skripsi ini tentu tidak lepas dari bantuan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan cinta, penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada:


1. Allah SWT atas segala rahmat, karunia, kemudahan, dan kesehatan yang telah diberikan.
2. Ayahanda Sutrasno dan Ibunda Wiwik Latifah, serta adikku Virginita Dinda Aviaseka, atas kasih sayang, doa, dan dukungan yang tiada henti sepanjang perjalanan ini.
3. Felisa Rahmawati, atas semangat, dukungan, dan kebersamaan yang tulus selama masa studi dan penyusunan skripsi.
4. Bapak Kurniawan Dwi Irianto, S.T., M.Sc., selaku dosen pembimbing, atas segala bimbingan, arahan, dan motivasi yang diberikan selama proses penulisan skripsi ini.
5. Seluruh dosen pengajar, dosen penguji, dan staf di Program Studi Informatika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, yang telah memberikan ilmu, wawasan, serta bantuan selama masa studi.
6. Teman-teman seperjuangan dan semua pihak yang telah menjadi sumber motivasi, kebersamaan, dan dukungan selama masa perkuliahan.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaan karya ilmiah ini di masa mendatang.

Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan menjadi amal jariyah bagi semua pihak yang terlibat.

Wassalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Yogyakarta, 21 Januari 2026

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Rasyid Achmad Fauzi', written in a cursive style.

(Rasyid Achmad Fauzi)

SARI

Permasalahan pencemaran air sungai yang semakin meningkat menuntut adanya sistem pemantauan yang tidak hanya efektif, tetapi juga mampu bekerja secara berkelanjutan dan *real-time*. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pendeteksi pencemaran air sungai berbasis *Iot* dengan memanfaatkan teknologi komunikasi *LoRa*. Sistem yang dikembangkan terdiri atas *Node* pengirim berbasis Arduino Uno yang terintegrasi dengan sensor pH dan *TDS* untuk mendeteksi parameter kualitas air, serta *node* penerima berbasis ESP32 yang menerima data melalui modul *LoRa* RA-01. Data hasil pengukuran dikirim secara nirkabel dan langsung terhubung ke layanan *cloud Firebase* agar dapat diakses secara *real-time*. Untuk meningkatkan kemudahan pemantauan, sistem dilengkapi dengan *dashboard web* yang menampilkan visualisasi parameter air seperti pH, *TDS*, waktu pengambilan data, serta indikator kualitas sinyal komunikasi berupa *Received Signal Strength Indicator (RSSI)*. Hasil pengujian membuktikan sistem ini mampu memantau kondisi air sungai dengan tingkat akurasi yang baik, jangkauan komunikasi yang luas, serta konsumsi daya yang efisien. Selain itu, keberadaan fitur visualisasi status *RSSI* pada *dashboard* sangat membantu dalam *monitoring* kualitas komunikasi *LoRa* sehingga data yang tersaji lebih andal dan integratif. Sistem yang dirancang diharapkan mampu menjadi solusi rujukan dalam pengembangan sistem *monitoring* lingkungan berbasis *Iot*, terutama untuk aplikasi pemantauan kualitas air secara jarak jauh dan berkelanjutan di Indonesia.

Kata Kunci: *Iot, LoRa, pencemaran air, pH, TDS, RSSI, monitoring, dashboard*

GLOSARIUM

Arduino Uno	Mikrokontroler digunakan sebagai <i>Node</i> pengirim yang membaca data dari sensor pH dan <i>TDS</i> .
ESP32	Mikrokontroler sebagai <i>node</i> penerima untuk menerima data <i>LoRa</i> dan mengirim ke <i>Firestore</i> .
pH	Satuan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air.
<i>TDS</i>	(<i>Total Dissolved Solids</i>) Jumlah zat padat terlarut dalam air, diukur dalam satuan ppm (parts per million).
<i>LoRa (Long Range)</i>	Teknologi komunikasi nirkabel jarak jauh dengan konsumsi daya rendah.
<i>LoRa RA-01</i>	Modul komunikasi <i>LoRa</i> untuk transmisi data antara <i>Node</i> pengirim dan penerima.
<i>Dashboard Web</i>	Antarmuka berbasis <i>web</i> untuk menampilkan data hasil pengukuran secara <i>real-time</i> .
<i>RSSI</i>	(<i>Received Signal Strength Indicator</i>) Indikator kekuatan sinyal <i>LoRa</i> yang diterima perangkat, menentukan kualitas komunikasi.
<i>Firestore</i>	Layanan <i>cloud</i> untuk penyimpanan dan pengelolaan data secara <i>real-time</i> .
<i>Node</i> pengirim	Perangkat (Arduino dan sensor) untuk membaca dan mengirim data kualitas air.
<i>Node</i> Penerima	Perangkat (ESP32) yang menerima data dan meneruskannya ke server.
<i>Monitoring</i>	Proses pemantauan kondisi secara rutin atau <i>Real-time</i> untuk deteksi pencemaran.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PEMBIMBING	ii
HALAMAN PENGESAHAN DOSEN PENGUJI	iii
HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
HALAMAN PERSEMBAHAN	v
HALAMAN MOTO.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
SARI	ix
GLOSARIUM.....	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Metodologi Penelitian	5
1.7 Sistematika Penulisan	6
BAB II LANDASAN TEORI.....	8
2.1 Internet of Things (Iot).....	8
2.2 Komunikasi <i>LoRa</i>	9
2.3 Sensor Kualitas Air (pH, dan <i>TDS</i>).....	11
2.3.1 Indeks pencemaran Air (IP)	12
2.4 Sistem <i>Monitoring</i> dan Visualisasi Data	13
2.5 Model <i>Prototyping</i>	14
2.6 Penelitian Terdahulu	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian.....	21
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian.....	22

3.2.1	Lokasi Pengembangan Sistem	22
3.2.2	Lokasi Pengujian Lapangan	22
3.2.3	Waktu Penelitian	23
3.3	Model Pengembangan Sistem	23
3.3.1	Blok Diagram Sistem	24
3.4	Alat dan Bahan Penelitian	25
3.5	Rancangan Sistem	29
3.5.1	Perancangan <i>Node</i> Pengirim	31
3.5.2	Perancangan <i>Node</i> Penerima	32
3.5.3	Konfigurasi Dasar LoRa RA-01	33
3.6	Tahapan Pengembangan Sistem	34
3.6.1	Identifikasi Kebutuhan	36
3.6.2	Perancangan Awal	37
3.6.3	Pembuatan <i>Prototype</i>	38
3.6.4	Pengujian <i>Prototype</i>	40
3.6.5	Revisi dan Penyempurnaan	45
3.7	Teknik Pengumpulan Data	47
3.7.1	Survei Pengumpulan Data Persepsi Pengguna	48
3.7.2	Survei/Pengukuran Pengujian Sistem	48
3.8	Teknik Analisis Data	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		51
4.1	Gambaran Umum Sistem	51
4.2	Hasil Implementasi <i>Prototype</i>	52
4.2.1	Perakitan dan Rangkaian Sistem	53
4.2.2	Tampilan Serial Monitor	55
4.2.3	Penyimpanan Data di <i>Firebase</i>	55
4.2.4	<i>Dashboard web</i> untuk Visualisasi	57
4.2.5	Rangkuman Implementasi Sistem	59
4.3	Hasil Pengujian Sensor	59
4.3.1	Pengujian Akurasi Sensor pH	60
4.3.2	Pengujian Akurasi Sensor <i>TDS</i>	61
4.4	Hasil Pengujian Komunikasi <i>LoRa</i>	62
4.4.1	Jangkauan dan Kualitas Sinyal <i>LoRa</i> (<i>LOS</i> dan <i>NLOS</i>)	63
4.4.2	Paket <i>LOSs</i> dan <i>Delay</i> Sistem	64

4.5	Hasil Visualisasi <i>Dashboard</i>	65
4.5.1	Komponen <i>Real-time</i> dan Interpretasi Data	66
4.5.2	Integrasi dan Efektivitas Dashoard Web Pemantauan Kualitas Air.....	67
4.6	Hasil Survei Persepsi Pengguna.....	68
4.7	Pembahasan	71
4.8	Kelebihan dan Keterbatasan Sistem	71
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		73
5.1	Kesimpulan.....	73
5.2	Keterbatasan Penelitian	73
5.3	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA		75
LAMPIRAN.....		79

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Langkah-Langkah Model Pengembangan	15
Gambar 3.1	Kondisi Lokasi Pengujian di Embung Tambakboyo	23
Gambar 3.2	Blok Diagram Sistem <i>Monitoring</i> Kualitas Air Berbasis <i>Iot</i> dan <i>LoRa</i>	24
Gambar 3.3	<i>Board</i> Arduino Uno dan Sensor pH Analog pada <i>Node</i> pengirim	27
Gambar 3.4	<i>Node</i> Penerima ESP32 dan Modul <i>LoRa</i> RA-01	27
Gambar 3.5	Sensor <i>TDS</i> dan PCB Lubang.....	28
Gambar 3.6	Baterai 18650	28
Gambar 3.7	Blok Diagram Sistem <i>Monitoring</i> Kualitas Air Berbasis <i>Iot</i> dan <i>LoRa</i>	30
Gambar 3.8	Kode Pembacaan, Kalibrasi, dan Pengiriman Data Sensor <i>Node</i> pengirim.....	32
Gambar 3.9	Kode Inisialisasi Modul Lora RA-01 (<i>Node</i> Pengirim).....	33
Gambar 3.10	Kode Proses Pengiriman Data Sensor ke <i>Firestore</i> pada <i>Node</i> Penerima.....	34
Gambar 3.11	Tahapan Pengembangan Sistem Menggunakan Model <i>Prototyping</i>	35
Gambar 3.12	Diagram Kebutuhan Perangkat Keras dan Lunak Sistem.	36
Gambar 3.13	Output Serial Monitor Pengujian Sistem.	39
Gambar 3.14	Dokumentasi Pengujian <i>Prototype</i> di Embung Tambakboyo.....	40
Gambar 3.15	Skema Pengujian Lapangan Sistem <i>Monitoring</i> Air Sungai.	41
Gambar 3.16	Diagram Alur Pengujian Sistem <i>Monitoring</i> dari Sensor hingga Visualisasi.....	43
Gambar 3.17	Pengukuran pH Air Sungai dengan pH Meter Digital (uji manual pH4).....	44
Gambar 3.18	Pengukuran pH Air Sungai dengan pH Meter Digital (uji manual pH6).....	44
Gambar 3.19	Pengukuran pH Air Sungai dengan pH Meter Digital (uji manual pH8).....	45
Gambar 3.20	Diagram Kebutuhan Sistem <i>Monitoring</i> Kualitas Air	47
Gambar 4.1	Implementasi <i>Node</i> Sensor (<i>Node</i> pengirim).....	51
Gambar 4.2	(<i>Node</i> Penerima).....	53
Gambar 4.3	Dokumentasi <i>Node</i> pengirim.	54
Gambar 4.4	Dokumentasi <i>Node</i> Penerima.	54
Gambar 4.5	Tampilan Monitor ESP32.....	55
Gambar 4.6	Struktur Database <i>Firestore Real-time</i>	56
Gambar 4.7	Kode Pengiriman Data ke <i>Firestore</i>	56
Gambar 4.8	Antarmuka <i>Dashboard web</i> Pemantauan Kualitas Air.....	57
Gambar 4.9	Kode Inisialisasi dan <i>Listener Real-time Firestore</i> pada <i>Dashboard Web</i>	58
Gambar 4.10	Proses Pengukuran pH dan <i>TDS</i> di Sungai.	60

Gambar 4.11	Tampilan <i>Serial Monitor</i> Pembacaan Sensor pH pada Pengujian.	61
Gambar 4.12	Tampilan <i>Serial Monitor</i> Pembacaan Sensor <i>TDS</i> pada Pengujian.	62
Gambar 4.13	<i>Serial Monitor</i> Counter Packet Loss (Repetisi 1)	65
Gambar 4.14	<i>Dashboard Monitoring</i> Kualitas Air Secara <i>Real-time</i> di Lokasi Embung	66
Gambar 4.15	Diagram Pie Komposisi Jenis Kelamin Responden.....	68
Gambar 4.16	Diagram Pie Usia Responden.	69
Gambar 4.17	Diagram Pie Pengalaman Responden Melihat Pencemaran Air Sungai.	69
Gambar 4.18	Diagram Bar Dampak Utama Pencemaran Air Menurut Responden.	69
Gambar 4.19	Diagram Pie Pendapat Mengenai Pentingnya Teknologi Otomatis Untuk.....	70
Gambar 4.20	Diagram Pie Tingkat Dukungan Responden terhadap Sistem <i>Monitoring</i>	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penelitian Terdahulu Terkait Sistem <i>Monitoring</i> Kualitas Air Berbasis <i>Iot</i> dan <i>LoRa</i>	18
Tabel 3.1	Rincian Jadwal Pelaksanaan Penelitian.....	23
Tabel 3.2	Daftar Alat dan Bahan Penelitian.....	26
Tabel 3.3	Daftar Perangkat Lunak Penelitian.....	26
Tabel 3.4	Konfigurasi Parameter Lora RA-01	33
Tabel 4.1	Hasil Pengujian Akurasi Sensor pH.....	60
Tabel 4.2	Hasil Pengujian Akurasi Sensor <i>TDS</i>	61
Tabel 4.3	Ringkasan Parameter Hasil Pengujian.....	63
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Jangkauan dan Kualitas Sinyal <i>LoRa</i>	63
Tabel 4.5	Hasil Pengujian Packet Loss LoRa (100 Paket, 100m LOS).....	65
Tabel 4.6	Threshold Kualitas Air Sungai.....	67
Tabel 4.7	Ringkasan Uji Efektivitas.....	67

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Penelitian ini dilakukan untuk mendeteksi dini pencemaran sungai di Daerah Istimewa Yogyakarta, yang sering terancam limbah domestik dan industri sesuai data DLH DIY 2025. Saat ini, pemantauan manual lambat dan tidak *real-time*, sehingga diperlukan sistem otomatis berbasis IoT-LoRa untuk pencegahan keracunan ikan, kerusakan ekosistem, dan risiko kesehatan masyarakat.

Air merupakan komponen vital dalam menunjang kelangsungan kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya. Dalam konteks lingkungan, air berfungsi sebagai media pelarut, sarana transportasi, serta habitat berbagai organisme akuatik. Salah satu sumber air yang sangat krusial dan banyak dimanfaatkan masyarakat adalah sungai. Sungai tidak hanya berperan sebagai sumber air bersih, tetapi juga dimanfaatkan untuk keperluan pertanian, industri, perikanan, transportasi, bahkan sebagai tempat pembuangan limbah. Namun, seiring meningkatnya aktivitas manusia di sepanjang daerah aliran sungai, kualitas air sungai kian terancam oleh berbagai jenis pencemaran. Sistem *monitoring* kualitas air telah banyak dikembangkan di sungai, pesisir, limbah industri, maupun pertanian, sesuai hasil studi (Irianto, 2022c, 2022a; Khairullah *et al.*, 2025; Setyawan *et al.*, 2022a).

Pencemaran air sungai dapat berasal dari limbah rumah tangga, limbah industri, pertanian (seperti pestisida dan pupuk), hingga aktivitas pertambangan. Dampak pencemaran ini tidak hanya mengganggu keseimbangan ekosistem perairan, tetapi juga membahayakan kesehatan masyarakat. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa Sungai Kapuas atau beberapa sungai besar di Indonesia mengalami peningkatan salinitas akibat intrusi air laut yang dipengaruhi oleh menurunnya debit air di musim kemarau menurut (Atalaric & Sujarwo, 2024a; Jan *et al.*, 2021; Taha *et al.*, 2024). Belum adanya sistem deteksi dini terhadap perubahan kualitas air menyebabkan keterlambatan dalam penanganan, sehingga mengindikasikan kebutuhan akan sistem pemantauan yang dapat bekerja secara otomatis dan berkelanjutan.

Selama ini, pemantauan kualitas air sungai umumnya masih dilakukan secara manual, yaitu dengan pengambilan sampel air di lapangan yang kemudian dianalisis di laboratorium. Meskipun metode ini akurat, prosesnya memerlukan waktu yang lama, biaya operasional yang tinggi, serta tidak dapat memberikan hasil secara *real-time*. Keterbatasan ini menjadi kendala

utama, khususnya di wilayah terpencil yang sulit dijangkau dan tidak memiliki infrastruktur pengawasan yang memadai.

Meskipun alat pH manual seperti HANNA HI98103 Checker (Rp 4.000.000) akurat, prosesnya lambat (pengukuran manual + analisis lab 1-2 hari), *non real-time*, serta sulit untuk jarak jauh di sungai rural. Sistem IoT-LoRa ini mengatasi keterbatasan tersebut dengan pengukuran otomatis, transmisi jarak jauh 500m, *update Firebase* setiap 5 detik, akurasi $\pm 5\%$, dan biaya total < Rp 1.000.000 cocok untuk wilayah terpencil seperti Sleman-Yogyakarta.

Menjawab tantangan tersebut, perkembangan teknologi *Internet of Things (Iot)* membuka peluang baru untuk membangun sistem pemantauan kualitas air secara otomatis. *Iot* memungkinkan integrasi sensor lingkungan dengan mikrokontroler untuk mengirimkan data secara berkala melalui jaringan komunikasi nirkabel. Teknologi ini sangat tepat diterapkan pada sistem *monitoring* kualitas air sungai karena dapat bekerja terus-menerus, hemat daya, dan menyajikan data secara *real-time*. Untuk meningkatkan jangkauan, sistem *Iot* dapat dikombinasikan dengan teknologi komunikasi *LoRa (Long Range)*, sebuah protokol nirkabel jarak jauh yang dirancang untuk kebutuhan daya rendah dan transmisi data kecil.

LoRa sangat ideal digunakan pada wilayah rural atau aliran sungai yang tidak terjangkau oleh sinyal *GSM* atau *WiFi*. Dalam penelitian Setyawan *et al.* (2022a) komunikasi *LoRa* berhasil digunakan dalam sistem *monitoring* udara di wilayah gambut hingga jarak lebih dari 1.000 meter. Sementara itu, Roby *et al.* (2022) mengembangkan sistem pemantauan kualitas air di IPAL Tlogomas dengan *LoRa RA-01*, dan mencatat efisiensi konsumsi daya hingga 67% dibanding sistem berbasis *GSM*.

Lebih lanjut, Gani *et al.* (2024a) berhasil merancang sistem *monitoring* air menggunakan sensor pH, suhu, dan *TDS* serta algoritma *Naïve Bayes* untuk mengklasifikasikan kualitas air ke dalam kategori baik, sedang, atau buruk. Sistem ini dihubungkan dengan *Firebase* dan menampilkan hasilnya melalui *dashboard* berbasis *web* yang dikembangkan secara mandiri, terhubung ke *Firebase* secara *real-time*. Penggunaan sistem klasifikasi dan visualisasi berbasis *cloud* sangat mendukung pengambilan keputusan cepat oleh pengguna maupun otoritas terkait.

Namun demikian, belum banyak penelitian yang secara spesifik mengembangkan sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *Iot* dan *LoRa* yang terintegrasi secara menyeluruh mulai dari sensorisasi, komunikasi data, hingga tampilan antarmuka *cloud* yang dapat diakses secara publik.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem pendeteksi pencemaran air sungai berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*. Sistem yang

dikembangkan menggunakan dua mikrokontroler, yaitu Arduino Uno R3 sebagai pengirim data sensor melalui *LoRa*, dan ESP32 sebagai penerima sekaligus pengirim data ke *Firebase*. Sensor yang digunakan dibatasi pada dua parameter utama, yaitu pH dan *TDS*, sebagai indikator dasar pencemaran air. Data yang diterima ditampilkan secara *Real-time* melalui *dashboard cloud* sehingga dapat diakses dari jarak jauh.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam mendukung pengawasan kualitas air yang lebih responsif dan berkelanjutan. Selain itu, sistem yang dikembangkan dapat menjadi solusi teknologi tepat guna untuk wilayah yang memiliki keterbatasan infrastruktur jaringan, serta menjadi dasar pengembangan sistem *monitoring* lingkungan berbasis *IoT* di masa mendatang.

Komunikasi *LoRa* sangat sesuai untuk pemantauan sungai rural seperti di Daerah Istimewa Yogyakarta karena jangkauan hingga 500 m pada kondisi *Line-of-Sight (LOS)*, konsumsi daya rendah 67% dibandingkan *GSM*, serta kestabilan pada *Non-Line-of-Sight (NLOS)* dengan *RSSI* rata-rata -113 dBm (Setyawan *et al.*, 2022b). Teknologi ini memastikan pengiriman data sensor pH dan *TDS* secara *real-time* ke *Firebase* meskipun tanpa infrastruktur seluler, sehingga mendukung deteksi dini pencemaran di wilayah terpencil.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, terdapat beberapa permasalahan utama yang menjadi fokus dalam penelitian ini. Permasalahan tersebut berkaitan dengan bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan kualitas air sungai yang dapat bekerja secara efisien, *real-time*, dan akurat menggunakan teknologi (*IoT*) dan komunikasi *LoRa*.

Permasalahan-permasalahan tersebut dapat dirumuskan ke dalam tujuh poin utama sebagai berikut:

Bagaimana merancang sistem pendeteksi pencemaran air sungai berbasis *IoT* yang mampu bekerja secara otomatis dan berkelanjutan dalam mengukur parameter kualitas air?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan sistem pendeteksi pencemaran air sungai yang terintegrasi dengan teknologi *IoT* dan komunikasi *LoRa*. Sistem ini diharapkan dapat memantau parameter kualitas air secara otomatis, *real-time*, dan dapat diakses dari jarak jauh melalui platform digital berbasis *cloud*.

Secara khusus, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

Merancang sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *Iot* yang terdiri dari perangkat sensor pH, dan *TDS* yang mampu mendeteksi parameter pencemaran air secara langsung di lapangan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan berbagai manfaat, baik secara teoritis maupun praktis, dalam pengembangan teknologi *monitoring* kualitas air sungai yang lebih efisien dan adaptif terhadap kebutuhan di lapangan. Manfaat yang dimaksud dapat dijabarkan sebagai berikut:

Manfaat Utama:

- a. DLH DIY dan Instansi Pemerintah: Data *real-time cloud* untuk pengawasan cepat dan pengambilan keputusan pencegahan pencemaran.
- b. Masyarakat Lokal: Akses *dashboard* mudah cegah keracunan air sungai, dukung kesadaran lingkungan di Sleman-Yogyakarta.
- c. Ekosistem & Kesehatan: Deteksi dini pH/TDS cegah kematian ikan dan penyakit berbasis air.
- d. Bagi masyarakat umum, sistem ini dapat menjadi sarana informasi dini terhadap kondisi pencemaran air sungai yang ada di lingkungan sekitar, sehingga meningkatkan kesadaran dan kewaspadaan terhadap pentingnya menjaga kualitas air.
- e. Untuk instansi pemerintah atau dinas lingkungan hidup, hasil dari sistem ini dapat digunakan sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam upaya pengawasan dan pengendalian pencemaran air sungai secara berkala dan efisien.
- f. Bagi pengembang sistem *Iot*, penelitian ini dapat menjadi acuan teknis dalam merancang sistem *monitoring* berbasis sensor yang terintegrasi dengan komunikasi jarak jauh menggunakan *LoRa* dan layanan *cloud* seperti *Firebase*.
- g. Bagi dunia pendidikan dan penelitian, sistem yang dirancang dapat digunakan sebagai media pembelajaran dan eksperimen di bidang teknik elektro, informatika, maupun lingkungan hidup, khususnya pada topik integrasi sensor, jaringan *LoRa*, dan visualisasi data *Iot*.

1.5 Batasan Masalah

Dalam mengembangkan sistem pendeteksi pencemaran air sungai berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*, penelitian ini memiliki batasan-batasan sebagai berikut:

- a. Parameter kualitas air yang diamati hanya terbatas pada dua indikator utama, yaitu pH (tingkat keasaman) dan *TDS* (*Total Dissolved Solids*).
- b. Sensor yang digunakan terdiri dari sensor pH analog dan sensor *TDS* berbasis konduktivitas listrik, tanpa melibatkan parameter lain seperti suhu, DO, atau *turbidity*.
- c. Sistem menggunakan dua mikrokontroler, yaitu Arduino Uno R3 sebagai *Node* pengirim (*transmitter*) dan ESP32 sebagai *gateway* penerima (*receiver*) yang bertugas mengirim data ke *cloud*.
- d. Komunikasi nirkabel antar mikrokontroler menggunakan modul *LoRa* 915 MHz, dengan konfigurasi *point-to-point* (P2P) tanpa *LoRaWAN*.
- e. Jangkauan pengujian transmisi data dibatasi hingga 500 meter dalam kondisi *Line of Sight* (*LOS*) tanpa hambatan fisik.
- f. Penyimpanan dan visualisasi data dilakukan menggunakan platform *Firebase* yang terintegrasi dengan *dashboard* berbasis *web* sederhana.
- g. Pengujian sistem dilakukan secara lokal di lingkungan sungai dengan aliran tenang, dan tidak mencakup kondisi ekstrem seperti banjir besar, intrusi air laut, atau pencemaran bahan kimia berbahaya.

1.6 Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Prototyping* sebagai pendekatan dalam pengembangan sistem. Metode ini dipilih karena memungkinkan proses iteratif yang fleksibel, sehingga sangat sesuai diterapkan dalam pengembangan sistem berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*. Sistem seperti ini umumnya memerlukan tahapan pengujian perangkat keras dan perangkat lunak yang dilakukan secara bertahap dan berulang hingga tercapai hasil yang optima.

a. Identifikasi Kebutuhan

Pada tahap ini dilakukan analisis kebutuhan sistem yang mencakup pemilihan jenis sensor yang digunakan (sensor pH dan *TDS*), spesifikasi mikrokontroler (Arduino Uno R3 dan ESP32), jenis komunikasi nirkabel (modul *LoRa* 915 MHz), serta platform *cloud* yang digunakan untuk penyimpanan dan visualisasi data (*Firebase*).

b. Perancangan *Prototype*

Tahap ini mencakup perancangan awal sistem, baik perangkat keras maupun perangkat lunak. Perancangan meliputi skema rangkaian antar sensor dan mikrokontroler, alur komunikasi data dari Arduino ke ESP32 melalui *LoRa*, serta desain awal tampilan *dashboard* visualisasi data berbasis *Firebase*.

c. Pembuatan *Prototype*

Pada tahap ini, sistem *prototype* dirakit dan diprogram untuk membaca nilai sensor pH dan *TDS*, mengirimkan data melalui modul *LoRa* dari Arduino Uno ke ESP32, lalu mengunggah data tersebut ke *Firebase* agar dapat ditampilkan secara *Real-time* melalui *dashboard* berbasis *web*.

d. Pengujian

Dilakukan pengujian terhadap akurasi pembacaan sensor, kestabilan komunikasi *LoRa*, dan keterbacaan data pada *dashboard Firebase*. Uji coba dilakukan baik dalam lingkungan simulasi (*indoor/laboratorium*) maupun secara langsung di lokasi sungai dengan arus tenang sebagai lokasi pengambilan data.

e. Revisi dan Penyempurnaan

Berdasarkan hasil pengujian, dilakukan analisis terhadap kelemahan sistem yang ditemukan. Selanjutnya, sistem akan disempurnakan melalui penyesuaian konfigurasi, penggantian perangkat jika diperlukan, dan peningkatan akurasi serta efisiensi komunikasi data hingga sistem berjalan sesuai dengan kebutuhan *monitoring* pencemaran air sungai.

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan dalam skripsi ini disusun secara terstruktur agar memudahkan pembaca dalam memahami isi dan alur penelitian. Adapun sistematika penulisan skripsi ini terdiri atas lima bab utama yang dijelaskan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Bab ini menjelaskan alasan dan arah dari penelitian yang dilakukan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini membahas teori-teori yang mendasari penelitian, seperti konsep *Internet of Things (Iot)*, komunikasi *LoRa*, sensor kualitas air pH, dan *TDS* (suhu kompensasi), platform *cloud (Firebase)*, serta penelitian terdahulu yang relevan sebagai referensi dan dasar pengembangan sistem.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tahapan perancangan sistem, mulai dari analisis kebutuhan, perancangan perangkat keras dan lunak, pemilihan alat dan bahan, serta skema sistem yang dikembangkan. Disajikan pula diagram alir dan diagram blok sistem.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi hasil implementasi sistem yang telah dirancang dan diuji, termasuk pengujian sensor, performa komunikasi *LoRa*, tampilan data di *cloud*, dan analisis efektivitas sistem secara keseluruhan.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan lebih lanjut, baik dari segi teknis maupun pemanfaatan sistem di masa depan.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 *Internet of Things (Iot)*

Internet of Things (Iot) merupakan salah satu terobosan besar dalam dunia teknologi yang menghubungkan perangkat fisik ke dalam sistem digital, memungkinkan terjadinya pertukaran data secara otomatis tanpa keterlibatan langsung manusia. *Iot* memungkinkan objek-objek seperti sensor, perangkat elektronik, mikrokontroler, dan modul komunikasi untuk saling terhubung melalui jaringan internet, sehingga dapat memantau dan mengendalikan kondisi lingkungan secara *real-time*. Teknologi ini telah berkembang pesat dan banyak digunakan di berbagai bidang, mulai dari industri manufaktur, pertanian, transportasi, hingga pemantauan lingkungan.

Dalam konteks pemantauan kualitas air sungai, *Iot* memainkan peran yang sangat penting karena mampu menggantikan metode manual yang selama ini dinilai kurang efisien dan tidak responsif. Melalui sistem berbasis *Iot*, proses pemantauan dapat dilakukan secara otomatis, kontinu, dan langsung menampilkan data kondisi air ke dalam *dashboard* yang terhubung dengan server *cloud*. Menurut (Aji & Nurwasito, 2023; Herlangga *et al.*, 2024) tren *monitoring* kualitas air di dunia kini menerapkan sistem *cloud dashboard* dan data *logger* jarak jauh. Hal ini tentu sangat membantu dalam mendeteksi adanya pencemaran air sejak dini serta mendukung pengambilan keputusan yang cepat dan berbasis data.

Konsep IoT sendiri didasarkan pada tiga komponen utama, yaitu perangkat sensor untuk pengumpulan data, jaringan komunikasi untuk pengiriman data, dan platform aplikasi untuk pengelolaan dan visualisasi data. Dalam literatur umum sistem IoT monitoring kualitas air, perangkat sensor sering digunakan untuk mengukur parameter seperti pH dan TDS (suhu dikompensasi formula standar sesuai batasan Bab 1.5) ¹(Gani *et al.*, 2024b) Namun, sesuai batasan masalah pada Bab I.5, penelitian ini membatasi implementasi pada sensor pH dan TDS saja untuk fokus pada *proof-of-concept* integrasi *LoRa-Firebase*, mengoptimalkan konsumsi daya serta kompleksitas rangkaian di lokasi terpencil. Data dari sensor ini diproses oleh mikrokontroler Arduino Uno R3 (node pengirim) yang selanjutnya mengirimkan data melalui jaringan komunikasi LoRa menuju *gateway* ESP32 yang terhubung ke internet. Dari *gateway*, data dikirim ke platform *cloud Firebase* untuk disimpan dan ditampilkan dalam bentuk grafik dan angka yang mudah dipahami .

¹ Library GravityTDS: factor=1+0.02 (T-25), T=26.5°C BPS DIY

Keunggulan dari *Iot* dalam sistem pemantauan air sungai adalah kemampuannya untuk bekerja dalam jangka waktu yang lama dengan konsumsi daya yang rendah. Selain itu, *Iot* juga memungkinkan akses data dari jarak jauh menggunakan perangkat apa pun yang terhubung dengan internet, sehingga sangat cocok diterapkan di daerah terpencil atau wilayah yang sulit dijangkau. Dalam studi yang dilakukan oleh Jan *et al.* (2021), disebutkan bahwa *Iot* mampu mengubah paradigma pemantauan lingkungan yang selama ini bergantung pada tenaga manusia menjadi lebih otomatis, hemat biaya, dan responsif terhadap kondisi lapangan.

Pemanfaatan *Iot* dalam sistem *monitoring* kualitas air tidak hanya terbatas pada pengumpulan data, tetapi juga memungkinkan integrasi fitur notifikasi atau peringatan dini (Alghamdi *et al.*, 2022; Jan *et al.*, 2021; Khairullah *et al.*, 2025; R. M. N. Putra *et al.*, 2024; Setyawan *et al.*, 2022a). Misalnya, ketika nilai pH air terdeteksi terlalu asam atau kandungan *TDS* melebihi ambang batas aman, sistem secara otomatis dapat mengirimkan notifikasi kepada pengguna melalui aplikasi atau email. Fitur ini memberikan nilai tambah dalam hal kecepatan respon terhadap ancaman pencemaran air dan membantu pengguna untuk segera melakukan tindakan yang diperlukan.

Namun, di balik keunggulan tersebut, *Iot* juga memiliki tantangan yang harus diperhatikan, seperti perlunya stabilitas koneksi jaringan, keamanan data yang dikirim, serta pemeliharaan perangkat keras yang digunakan di lapangan. Oleh karena itu, desain sistem yang baik dan pemilihan teknologi yang tepat menjadi kunci utama dalam mengimplementasikan *Iot* secara efektif.

Dengan segala potensi dan fleksibilitas yang dimilikinya, *Iot* menjadi pilihan tepat dalam membangun sistem pemantauan kualitas air sungai yang cerdas, efisien, dan ramah lingkungan. Penelitian ini mencoba mengaplikasikan konsep *Iot* secara praktis untuk mendeteksi pencemaran air sungai secara otomatis dan *real-time*, dengan harapan dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengelolaan sumber daya air yang lebih baik dan berkelanjutan.

2.2 Komunikasi LoRa

Komunikasi *LoRa* (*Long Range*) merupakan salah satu teknologi komunikasi nirkabel yang termasuk dalam kategori *Low Power Wide Area Network (LPWAN)*. Teknologi ini dirancang khusus untuk mendukung kebutuhan transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya yang sangat rendah, sehingga sangat cocok digunakan pada sistem berbasis *Iot*, terutama dalam konteks pemantauan di wilayah-wilayah yang sulit dijangkau jaringan *GSM* atau *WiFi* (Afdal *et al.*, 2024; Atalaric & Sujarwo, 2024a; Roby *et al.*, 2022). *LoRa* bekerja dengan

menggunakan teknik modulasi *chirp spread spectrum (CSS)* yang memungkinkan pengiriman data tetap stabil bahkan dalam kondisi interferensi sinyal dan keberadaan hambatan fisik seperti gedung, pohon, atau medan berbukit.

Dalam sistem pemantauan kualitas air sungai, komunikasi *LoRa* menjadi elemen penting yang menghubungkan *node* sensor dengan *gateway*. pH dan *TDS* (suhu kompensasi standar untuk *TDS*) kemudian data tersebut dikirim secara nirkabel melalui modul *LoRa* menuju *gateway* yang selanjutnya meneruskan data ke *cloud* storage seperti *Firebase* untuk divisualisasikan dalam bentuk *dashboard*. Keunggulan dari *LoRa* terletak pada jangkauan sinyalnya yang sangat luas, yaitu dapat mencapai lebih dari 5 kilometer di area terbuka dan 1–2 kilometer di area dengan hambatan (Setyawan *et al.*, 2022a)

Berdasarkan hasil penelitian oleh Gani *et al.* (2024a) modul *LoRa* Dragino SX1276 yang digunakan pada sistem *monitoring* kualitas air mampu mentransmisikan data sejauh 550 meter dalam kondisi *Line of Sight (LOS)* dengan rata-rata nilai *RSSI* sebesar -113 dBm dan *SNR* mencapai -8,28 dB. Hal ini menunjukkan bahwa *LoRa* memiliki kualitas sinyal yang sangat baik meskipun berada dalam medan terbuka dan tanpa dukungan jaringan tambahan. Penelitian lain juga membuktikan bahwa pengaturan nilai *spreading factor (SF)* pada *LoRa* dapat memperluas jangkauan sinyal secara signifikan. Dalam pengujiannya, jangkauan sinyal dapat ditingkatkan dari 75 meter menjadi 435 meter dengan tetap menjaga kestabilan komunikasi antar perangkat meskipun dalam kondisi *Non Line of Sight (NLOS)*.

Keunggulan *LoRa* lainnya adalah kemampuannya dalam penghematan energi. Karena modul ini hanya mengirimkan data dalam interval waktu tertentu dan tidak terus-menerus aktif, maka konsumsi dayanya sangat rendah. Hal ini memungkinkan sistem untuk dioperasikan dalam jangka waktu lama menggunakan baterai atau sumber daya alternatif seperti panel surya. Roby *et al.* (2022) mencatat bahwa penggunaan *LoRa* dalam sistem pemantauan IPAL menghasilkan efisiensi daya sebesar 67% dibandingkan sistem berbasis *GSM*, serta memiliki tingkat keberhasilan pengiriman data mencapai 90% dalam lingkungan outdoor.

Selain itu, *LoRa* memiliki kelebihan dalam hal biaya operasional. Tidak seperti komunikasi *GSM* yang membutuhkan biaya bulanan untuk langganan data, sistem berbasis *LoRa* tidak membutuhkan biaya berlangganan. Hal ini sangat menguntungkan dalam implementasi sistem *monitoring* jangka panjang di daerah-daerah yang minim akses infrastruktur dan keterbatasan dana operasional. Aji & Nurwasito (2023) menekankan bahwa sistem *monitoring* berbasis *LoRa-MQTT* dapat dioperasikan secara berkelanjutan dengan biaya sangat rendah dan mendukung koneksi antar perangkat yang stabil meskipun tanpa koneksi internet langsung di titik sensor.

Dengan mempertimbangkan seluruh keunggulan tersebut, *LoRa* menjadi pilihan utama dalam pengembangan sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *IoT*. Ketersediaan modul yang fleksibel, konsumsi daya rendah, jangkauan luas, serta kemudahan integrasi dengan mikrokontroler seperti ESP32 menjadikan *LoRa* sebagai solusi tepat dalam mengatasi tantangan pemantauan kualitas air di lapangan. Dalam penelitian ini, penggunaan *LoRa* diintegrasikan secara penuh untuk mendukung transmisi data antar *node* dan *gateway*, sekaligus sebagai infrastruktur utama dalam sistem *monitoring* berbasis *cloud* yang dirancang secara *real-time*, efisien, dan ramah terhadap kondisi geografis Indonesia yang kompleks.

2.3 Sensor Kualitas Air (pH, dan TDS)

Sensor merupakan komponen utama dalam sistem *monitoring* kualitas air, yang berfungsi untuk mengukur dan menangkap data dari lingkungan fisik guna diproses secara digital. Dalam penelitian ini, pemantauan kualitas air sungai dilakukan dengan menggunakan dua parameter utama, yaitu pH (tingkat keasaman) dan *TDS* (*Total Dissolved Solids*). Kedua parameter ini telah banyak digunakan dalam berbagai studi untuk mendeteksi indikasi pencemaran air secara dini (Afdal *et al.*, 2024; Atalaric & Sujarwo, 2024a; Gani *et al.*, 2023, 2024a).

Sensor pH digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air. Nilai pH mencerminkan kondisi kimia air yang memengaruhi kelangsungan hidup organisme akuatik serta kestabilan ekosistem. Rentang pH netral adalah 7 nilai di bawahnya menunjukkan kondisi asam dan di atasnya menunjukkan kondisi basa. Sungai yang sehat umumnya memiliki nilai pH antara 6,5 hingga 8,5. Perubahan drastis pada nilai pH dapat menjadi indikasi awal adanya pencemaran akibat limbah industri, domestik, atau pertanian. Menurut Asharullah *et al.* (2024), sistem *monitoring* kualitas air berbasis *IoT* dengan sensor pH menunjukkan deviasi pembacaan hanya sekitar 3–5% dibandingkan alat laboratorium, sehingga masih dinilai akurat untuk aplikasi lapangan.

Sementara itu, parameter *Total Dissolved Solids* (*TDS*) menggambarkan jumlah zat padat terlarut dalam air, seperti mineral, garam, logam berat, dan senyawa organik anorganik. Nilai *TDS* yang tinggi biasanya mengindikasikan adanya kontaminasi air yang serius, yang dapat membahayakan kesehatan manusia maupun ekosistem. Sensor TDS SEN0244 mengukur konduktivitas listrik (EC), yang sangat dipengaruhi suhu (naik 2% per °C di atas 25°C). Untuk mencegah bias, diterapkan kompensasi suhu via *library Gravity TDS: compensation = 1 + 0.02 (T-25)*, dengan T=26.5°C rata-rata suhu udara Sleman (BPS DIY 2024, BMKG data sungai lokal 26-28°C). Tanpa sensor suhu dedicated (hemat daya LoRa),

akurasi tetap $\pm 5\%$. Menurut Pambudi & Wulandari (2022), peningkatan nilai *TDS* yang bersamaan dengan penurunan pH dapat dijadikan indikator awal terjadinya pencemaran air, khususnya yang disebabkan oleh limbah rumah tangga dan aktivitas pertanian.

Meskipun tidak menggunakan sensor suhu dalam sistem ini, berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kombinasi minimal antara sensor pH dan *TDS* saja sudah cukup untuk memberikan gambaran awal terhadap kualitas air. Penelitian oleh Gani *et al.* (2024a) menunjukkan bahwa integrasi sensor pH dan *TDS* dalam sistem *monitoring* berbasis *LoRa* dapat memberikan data *Real-time* yang efektif untuk deteksi dini pencemaran. Hal ini diperkuat oleh temuan H. A. Putra & Rosano (2024) yang mengintegrasikan kedua sensor tersebut dalam sistem *monitoring* kualitas air dengan pengiriman data ke *Firestore*, dan menyatakan bahwa sistem tersebut mampu mendeteksi perubahan lingkungan dengan baik dan efisien.

Dalam penelitian ini, penggunaan sensor pH dan *TDS* dipilih berdasarkan alasan teknis dan pertimbangan efisiensi, terutama karena sistem dirancang untuk dapat beroperasi secara mandiri di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur komunikasi dan energi. Oleh karena itu, integrasi dua sensor ini diharapkan mampu mendukung pencapaian sistem *monitoring* air sungai yang akurat, *real-time*, dan berkelanjutan.

2.3.1 Indeks pencemaran Air (IP)

Indeks Pencemaran Air (IP) adalah metode sederhana untuk menilai tingkat pencemaran berdasarkan beberapa parameter seperti pH, TDS, dan turbidity (Afdal, 2024). Rumus perhitungannya adalah:

$$[IP = \frac{(\sum L_i)^2 + 3L_{\max}}{45}]$$

dengan ($L_i = \frac{C_i}{L_{ij}} - 1$), di mana (C_i)

$=$ konsentrasi parameter ke i dan (L_{ij})

$=$ baku mutu (misalnya pH 6 – 9, TDS < 1000 ppm).

Di mana:

L_i = $(C_i/L_{ij}) - 1$

C_i = konsentrasi (pH, TDS)

L_{ij} = baku mutu

Penggunaan di penelitian ini Rumus IP dibahas sebagai landasan teori untuk evaluasi kualitas air multi-parameter. Namun, tidak diimplementasikan karena:

- a. Hanya mengukur pH dan TDS (belum turbidity/suhu, sehingga IP kurang akurat)
- b. Fokus utama adalah desain sistem akuisisi LoRa *real-time*, bukan klasifikasi indeks.

IP dapat diintegrasikan di pengembangan lanjutan via *dashboard Firebase* Penelitian ini batasi pH-TDS sesuai batasan masalah, suhu via kompensasi formula untuk akurasi TDS <5% tanpa tambah hardware hemat daya LoRa.

2.4 Sistem *Monitoring* dan Visualisasi Data

Sistem *monitoring* berbasis *Iot* merupakan salah satu bentuk inovasi teknologi yang memungkinkan pengumpulan, pemrosesan, dan pengiriman data secara *Real-time* tanpa keterlibatan manusia secara langsung. Dalam konteks pemantauan kualitas air sungai, sistem *monitoring* yang efektif harus mampu mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, komunikasi data, serta platform *cloud* untuk menampilkan hasil secara visual dan dapat diakses kapan saja serta dari mana saja (Irianto, 2022c, 2022a, 2022b; Jan *et al.*, 2021; Khairullah *et al.*, 2025; Setyawan *et al.*, 2022a).

Proses *monitoring* dimulai dari pembacaan parameter kualitas air oleh sensor, seperti sensor pH dan *TDS*. Data yang dihasilkan dari sensor tersebut dikirim ke mikrokontroler dalam hal ini Arduino Uno R3 sebagai *Node* pengirim kemudian ditransmisikan melalui komunikasi *LoRa* ke ESP32 sebagai *node* penerima. ESP32 bertugas mengunggah data ke platform penyimpanan *cloud* yaitu *Firebase Real-time Database* melalui koneksi *WiFi* (Atalaric & Sujarwo, 2024a; Roby *et al.*, 2022). Selanjutnya, data yang tersimpan divisualisasikan dalam *dashboard* berbasis *web* yang dikembangkan sendiri oleh peneliti.

Penggunaan *Firebase Real-time Database* memberikan sejumlah keunggulan, seperti kemampuan menampilkan data secara *real-time*, mendukung sistem notifikasi otomatis, serta kompatibel dengan berbagai jenis antarmuka pengguna. Penelitian oleh Atalaric & Sujarwo (2024a) menunjukkan bahwa sistem *monitoring* yang mereka kembangkan mampu menampilkan data kualitas air melalui LCD sekaligus mengirimkannya ke *Firebase* dengan tingkat keberhasilan pengiriman hingga 80% dari sepuluh kali pengujian. Mereka juga menegaskan bahwa pengguna dapat mengakses hasil pembacaan sensor baik secara lokal di perangkat maupun secara daring melalui *dashboard Firebase*.

Kemampuan visualisasi data yang baik tidak hanya meningkatkan kenyamanan pengguna, tetapi juga sangat penting dalam proses pengambilan keputusan secara cepat, terutama dalam situasi yang menunjukkan anomali atau potensi pencemaran. Sistem yang

dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan aplikasi *web monitoring* mandiri yang menampilkan data sensor secara *Real-time* dalam bentuk tabel dan grafik. Antarmuka ini memudahkan pengguna dalam membaca tren perubahan kualitas air serta mempercepat proses deteksi awal pencemaran.

Beberapa penelitian sebelumnya memang menggunakan platform seperti *Blynk*, *Antares*, atau *Google Sheets* untuk visualisasi data, seperti yang dijelaskan oleh H. A. Putra & Rosano (2024). Namun dalam penelitian ini, *dashboard* dirancang secara independen untuk memberikan fleksibilitas dalam tampilan dan penyesuaian logika sistem.

Berdasarkan berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa integrasi antara sensor, mikrokontroler, dan platform visualisasi *cloud* merupakan pendekatan yang efektif dan efisien dalam membangun sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *Iot*. Penyajian data secara *Real-time* melalui aplikasi *web* hasil pengembangan sendiri tidak hanya meningkatkan keandalan sistem, tetapi juga memperkuat transparansi serta partisipasi masyarakat dalam pelestarian lingkungan perairan.

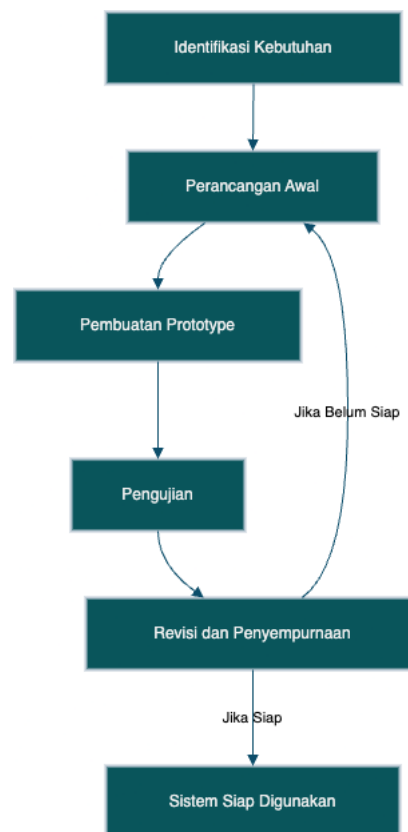
2.5 Model *Prototyping*

Penelitian ini menggunakan pendekatan model *Prototyping* dalam proses pengembangan sistem. Model *Prototyping* merupakan metode pengembangan sistem yang menekankan pada proses iteratif, di mana sistem dikembangkan melalui tahapan pembuatan purwarupa (*prototype*) terlebih dahulu, kemudian dilakukan pengujian dan perbaikan berulang hingga terbentuk sistem final yang optimal. Model ini sangat sesuai untuk sistem berbasis teknologi seperti *Iot* karena memungkinkan evaluasi dan penyesuaian sejak tahap awal pengembangan.

Menurut (Gani *et al.*, 2023, 2024a) model *Prototyping* memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas dan responsivitas terhadap kebutuhan pengguna. Hal ini karena pengguna dapat langsung melihat dan memberikan masukan terhadap bentuk awal sistem sebelum dikembangkan secara penuh. Dengan demikian, kesalahan desain dapat diminimalkan sejak awal, dan proses pengembangan menjadi lebih efisien. Pendekatan ini sangat cocok digunakan dalam pengembangan sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*, karena memungkinkan iterasi bertahap terhadap konfigurasi sensor, komunikasi antarperangkat, serta antarmuka visualisasi data.

Model *Prototyping* yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari lima tahap utama yang membentuk siklus pengembangan sistem berulang, yaitu identifikasi kebutuhan, perancangan awal, pembuatan *prototype*, pengujian, dan revisi serta penyempurnaan. Meskipun dilakukan secara berurutan, kelima tahapan ini bersifat dinamis dan dapat diulang bila diperlukan apabila ditemukan kekurangan dalam pengujian.

Langkah-langkah model pengembangan *Prototyping* dalam penelitian ini dapat dijelaskan melalui bagan berikut:²



Gambar 2.1 Langkah-Langkah Model Pengembangan

Sumber: diadaptasi dari (Gani *et al.*, 2023, 2024a)

Langkah-langkah model pengembangan *Prototyping*:

a. Identifikasi Kebutuhan (*Requirement Identification*)

Melakukan studi pustaka, analisis kebutuhan teknis, dan pemetaan perangkat yang akan digunakan. Tahap ini mencakup penetapan parameter kualitas air yang diamati (pH dan *TDS*), pemilihan dua mikrokontroler yaitu Arduino Uno R3 sebagai *node* sensor (TX) dan ESP32 sebagai *gateway* (RX), serta platform penyimpanan dan visualisasi data berbasis *Firebase*.

² Sumber: Diadaptasi dari Gani *et al.* (2024), Jurnal Teknik Elektro, hal. 146.

b. Perancangan Awal (*Initial Design*)

Tahap ini meliputi perancangan blok diagram sistem, alur komunikasi data dari Arduino ke ESP32 melalui modul *LoRa* 915 MHz, serta rancangan antarmuka *dashboard Firebase*. Desain awal ini juga mencakup format data, interval pengiriman, dan pengolahan nilai sensor agar sesuai dengan kebutuhan *monitoring*.

c. Pembuatan *Prototype* (*Quick Construction*)

Prototipe sistem dirakit dengan menghubungkan sensor pH dan *TDS* ke Arduino Uno, yang kemudian mengirimkan data melalui modul *LoRa* TX. Data diterima oleh ESP32 melalui modul *LoRa* RX, diproses, dan diteruskan ke *Firebase*. Seluruh alur ini diprogram menggunakan Arduino IDE, dan diuji dalam kondisi laboratorium terlebih dahulu.

d. Pengujian (*Testing*)

Dilakukan pengujian terhadap stabilitas pembacaan sensor, keakuratan transmisi data *LoRa*, dan keterbacaan data pada *dashboard Firebase*. Pengujian dilakukan baik dalam lingkungan indoor maupun outdoor di lokasi sungai dengan arus tenang. Parameter seperti *delay* pengiriman, kekuatan sinyal, dan konsistensi data juga dianalisis.

e. Revisi dan Penyempurnaan (*Refinement*)

Berdasarkan hasil pengujian, dilakukan evaluasi terhadap kelemahan sistem. Revisi dilakukan pada konfigurasi perangkat keras (misalnya kabel atau sensor), pengaturan parameter *LoRa*, atau tampilan visualisasi *dashboard*. Tahapan ini dilakukan secara berulang hingga sistem dinyatakan siap dan berjalan sesuai fungsinya dalam mendeteksi pencemaran air secara *real-time*.

2.6 Penelitian Terdahulu

Sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *Iot* telah diaplikasikan dalam berbagai penelitian. Salah satunya oleh Situmorang *et al.* (2024), yang mengembangkan pemantauan kondisi air pada daerah aliran sungai menggunakan sensor pH, *turbidity*, dan *TDS* yang terkoneksi platform *Iot*. Hasilnya menunjukkan data dapat dipantau *Real-time* dan memberikan kemudahan deteksi pencemaran secara jarak jauh melalui *dashboard* berbasis *cloud*.

Penelitian terdahulu sangat penting sebagai dasar pijakan dalam menyusun dan mengembangkan sistem *monitoring* kualitas air berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*. Beberapa penelitian telah banyak dilakukan dalam pengembangan sistem sejenis, baik yang berfokus pada integrasi sensor, penggunaan mikrokontroler, komunikasi nirkabel, hingga pengolahan

dan visualisasi data berbasis *cloud* (Paradis, 2023; Perdana *et al.*, 2021; Widowati *et al.*, 2019).

Salah satu penelitian dilakukan oleh Gani *et al.* (2024a), yang mengembangkan sistem pemantauan kualitas air berbasis *LoRa* dengan metode klasifikasi *Naïve Bayes*. Sistem ini memanfaatkan sensor pH, *TDS*, dan suhu yang terhubung ke mikrokontroler Arduino Uno dan modul *LoRa* Dragino. Data dikirim ke *gateway* dan ditampilkan secara *Real-time* melalui *Firestore* dan aplikasi Android. Hasil klasifikasi kualitas air berdasarkan algoritma *Naïve Bayes* menunjukkan akurasi sebesar 94%, dengan jangkauan komunikasi hingga 800 meter .

Sementara itu, Atalaric & Sujarwo (2024a) mengembangkan versi lanjutan sistem *monitoring* air sungai bernama Bank Air Kami v2. Sistem ini menggunakan sensor pH, *TDS*, suhu, dan *turbidity* yang dihubungkan ke ESP32 dan dikirim ke *Firestore Real-time Database*. Keunggulan dari penelitian ini adalah sistem dapat menampilkan status koneksi dan nilai pembacaan langsung di LCD, sehingga pengguna di lapangan bisa langsung melihat hasilnya tanpa memerlukan koneksi eksternal. Pengujian sistem menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman data sebesar 80% dalam 10 kali percobaan .

Penelitian lainnya oleh H. A. Putra & Rosano (2024) menggunakan mikrokontroler berbasis *IoT* dan memanfaatkan platform *Blynk* dan *Google Sheet* untuk menyimpan dan memvisualisasikan data dari sensor pH, suhu, dan *TDS*. Penelitian ini menekankan kemudahan akses sistem secara *online* dan memungkinkan pengguna memantau parameter air sungai dari jarak jauh. Meskipun belum menggunakan *LoRa*, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pemanfaatan *cloud* dan visualisasi data .

Penelitian-penelitian tersebut memberikan kontribusi signifikan dalam bidang pemantauan kualitas air berbasis *IoT*. Namun, sebagian besar masih menghadapi keterbatasan seperti jangkauan komunikasi terbatas (karena tidak menggunakan *LoRa*), tidak ada klasifikasi otomatis terhadap kualitas air, atau ketergantungan pada sinyal *GSM/WiFi*. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba menjawab kekosongan tersebut dengan membangun sistem pemantauan air sungai berbasis *LoRa* yang hemat daya, *real-time*, serta terintegrasi dengan *Firestore* untuk visualisasi dan notifikasi otomatis.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu Terkait Sistem *Monitoring* Kualitas Air Berbasis *Iot* dan *LoRa*.

No	Peneliti & Tahun	Platform	Sensor	Komunikasi	Cloud/ Visualisasi	Kelebihan	RSSI (dbm)
1	Gani <i>et al.</i> (2024a)	Arduino + <i>LoRa</i>	pH, <i>TDS</i> (suhu kompensasi)	<i>LoRa</i>	<i>Firestore</i> + MIT App	Akurasi klasifikasi 94%, jangkauan 800m	-113
2	Atalaric & Sujarwo (2024a)	ESP32 + <i>WiFi</i>	pH, <i>TDS</i> (suhu kompensasi) Turbidity	<i>WiFi</i>	<i>Firestore Real-time</i>	<i>Monitoring</i> lokal + display LCD	<i>WiFi</i> bukan <i>LoRa</i>
3	H. A. Putra & Rosano (2024)	ESP32	pH, <i>TDS</i> (suhu kompensasi)	<i>WiFi</i>	<i>Blynk</i> + <i>Google Sheet</i>	Sistem ringan & mudah diakses	-
4	Faza <i>et al.</i> (2021)	Arduino Uno	pH, Turbidity, Suhu	<i>LoRa</i>	ThingSpeak	Error pH 2.10%, fokus limbah batik bukan sungai rural	-
5	Raihan (2022)	ESP32	pH, <i>TDS</i> (fuzzy)	<i>WiFi</i>	Android App	Tanpa <i>LoRa</i> jarak jauh, tanpa RSSI dashboard	-
6	Putra Rosano (2024)	ESP32	<i>TDS</i> , pH	<i>WiFi</i>	<i>Blynk</i> , <i>Google Sheet</i>	Error <i>TDS</i> 6.74%, tanpa <i>LoRa</i> P2P	-

Tabel 2.1 tersebut menunjukkan perbandingan dari tiga penelitian terdahulu yang relevan dengan topik sistem pemantauan kualitas air berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*. Penelitian- penelitian tersebut memiliki pendekatan yang berbeda dalam aspek platform perangkat keras, jenis sensor yang digunakan, teknologi komunikasi yang diterapkan, serta platform visualisasi atau penyimpanan data.

Pada baris pertama, penelitian yang dilakukan oleh Gani *et al.* (2024a) menggunakan kombinasi mikrokontroler Arduino Uno dengan modul komunikasi *LoRa*. Sensor yang

digunakan meliputi pH, suhu, dan *TDS*, yang merupakan parameter umum dalam pengukuran kualitas air. Keunggulan utama penelitian ini adalah integrasi algoritma *Naïve Bayes* untuk klasifikasi kualitas air serta jangkauan komunikasi hingga 800 meter dalam pengujian lapangan. Namun, sistem ini belum dilengkapi dengan fitur notifikasi otomatis atau tampilan langsung di lokasi, sehingga pengguna harus membuka aplikasi untuk mengetahui status air.

Pada baris kedua, Atalaric & Sujarwo (2024a) mengembangkan sistem *monitoring* menggunakan ESP32 yang terhubung ke jaringan *WiFi*. Sensor yang digunakan lebih lengkap, yakni pH, suhu, *TDS*, dan *turbidity*. Data dikirim ke *Firestore Real-time Database*, dan salah satu keunggulan dari sistem ini adalah adanya layar LCD lokal yang menampilkan hasil pengukuran secara langsung tanpa perlu membuka aplikasi. Sistem ini cocok untuk lokasi-lokasi dengan sinyal *WiFi* stabil, namun tidak menggunakan *LoRa*, sehingga jangkauannya lebih terbatas dan bergantung pada infrastruktur jaringan.

Penelitian ketiga oleh H. A. Putra & Rosano (2024) juga menggunakan mikrokontroler ESP32, dan memanfaatkan platform *Blynk* dan *Google Sheet* untuk penyimpanan dan visualisasi data. Sistem ini menekankan pada kemudahan akses data secara *online* serta kemudahan implementasi karena tidak membutuhkan perangkat khusus selain koneksi internet. Kekurangan dari sistem ini adalah tidak tersedianya fitur komunikasi *LoRa*, sehingga jangkauannya terbatas dan konsumsi daya bisa lebih tinggi dibandingkan dengan sistem berbasis *LoRa*.

Dari analisis penelitian terdahulu pada Tabel , dapat disimpulkan bahwa pH dan *TDS* (suhu standar literatur) dalam sistem monitoring kualitas air berbasis IoT-LoRa (Atalaric & Sujarwo, 2024b; Gani *et al.*, 2024b). Penelitian ini mengadopsi rujukan tersebut sebagai dasar desain, tetapi secara sadar membatasi implementasi pada sensor pH dan *TDS* saja sesuai batasan masalah (Bab I.5). Pembatasan ini bertujuan mengoptimalkan konsumsi daya, mengurangi kompleksitas rangkaian, dan memfokuskan pengujian pada performa transmisi *LoRa real-time* di kondisi geografis terpencil seperti sungai rural Yogyakarta.

Tabel tersebut menunjukkan bahwa mayoritas sistem *monitoring* kualitas air telah menggunakan sensor standar (pH, suhu, *TDS*), tetapi memiliki pendekatan platform dan komunikasi yang beragam tergantung pada kebutuhan sistem. Penelitian oleh Gani *et al.* (2024a), Atalaric & Sujarwo (2024a), serta H. A. Putra & Rosano (2024) dirangkum pada Tabel sebagai dasar perancangan sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini.

Selain penelitian yang berfokus pada aspek edukatif dan penggunaan gim untuk pembelajaran, terdapat pula beberapa penelitian yang secara teknis mengembangkan sistem pemantauan kualitas air berbasis *Iot*. Penelitian-penelitian ini menjadi penting untuk ditelaah

karena mendasari aspek teknis dari sistem yang dibangun dalam penelitian ini, khususnya yang menggunakan sensor pH, suhu, dan *TDS* serta memanfaatkan komunikasi *LoRa* dan platform visualisasi berbasis *cloud*.

Berdasarkan tabel tersebut, penelitian oleh Atalaric & Sujarwo (2024a) menggunakan ESP32 dan koneksi *WiFi* untuk mengirim data dari sensor pH, suhu, *TDS*, dan *turbidity* ke *Firestore*. Sistem ini dilengkapi dengan LCD lokal untuk menampilkan data secara langsung. Meskipun fitur ini memudahkan pengguna di lapangan, sistem ini bergantung pada ketersediaan sinyal *WiFi* dan belum menerapkan komunikasi *LoRa*, sehingga jangkauannya terbatas di daerah rural.

Penelitian H. A. Putra & Rosano (2024) berfokus pada kesederhanaan sistem, dengan menggunakan platform *Blynk* dan *Google Sheets* sebagai media visualisasi data. Sistem ini memudahkan akses pengguna terhadap informasi sensor dari jarak jauh. Namun, seperti penelitian sebelumnya, sistem ini masih bergantung pada koneksi *WiFi* dan belum menggunakan protokol komunikasi jarak jauh seperti *LoRa*, serta tidak menyediakan fitur notifikasi terhadap kondisi air yang abnormal.

Sementara itu, Gani *et al.* (2024a) menjadi salah satu dari sedikit penelitian yang telah menerapkan modul komunikasi *LoRa* dalam sistem *monitoring* kualitas air. Sistem mereka tidak hanya mengintegrasikan sensor pH, suhu, dan *TDS*, tetapi juga dilengkapi dengan klasifikasi kualitas air berbasis algoritma *Naïve Bayes*. Data dikirim secara *Real-time* ke *Firestore* dan ditampilkan melalui aplikasi mobile. Sistem ini juga memiliki keunggulan dalam hal jangkauan komunikasi, yang mencapai hingga 800 meter dalam uji lapangan. Namun, tampilan data tidak disediakan secara langsung pada perangkat lokal seperti LCD, sehingga pengguna tetap membutuhkan akses ke aplikasi *mobile*.

Penelitian lain oleh R. M. N. Putra, (2024) menggunakan platform Antares dan aplikasi mobile untuk *monitoring* kualitas air. Sistem ini memiliki keunggulan dalam visualisasi *Real-time* melalui aplikasi, namun tidak dilengkapi dengan fitur klasifikasi otomatis maupun komunikasi jarak jauh seperti *LoRa*.

Dari keempat penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa meskipun masing-masing memiliki keunggulan tersendiri, belum ada sistem yang secara menyeluruh menggabungkan sensor kualitas air, komunikasi *LoRa* jarak jauh, serta fitur visualisasi dan notifikasi *Real-time* berbasis *Firestore*. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk merancang dan mengembangkan sistem *monitoring* kualitas air sungai yang mampu bekerja secara efisien di area terpencil dengan dukungan komunikasi *LoRa*, integrasi *Firestore*, dan visualisasi data *Real-time* yang dapat diakses kapan saja.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian rekayasa (*engineering research*) yang bertujuan untuk merancang dan membangun sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *Internet of Things (Iot)* dan komunikasi *LoRa*. Fokus utama dari penelitian ini adalah menghasilkan suatu *prototype* sistem yang dapat mengukur parameter kualitas air seperti pH dan *Total Dissolved Solids (TDS)*, mengirimkan data melalui jaringan nirkabel *LoRa*, serta menampilkannya secara *Real-time* melalui *dashboard web* yang terhubung ke *Firestore Real-time Database* (Atalaric & Sujarwo, 2024a; H. A. Putra & Rosano, 2024; R. M. N. Putra *et al.*, 2024; Saputra *et al.*, 2025).

Jenis penelitian ini bersifat aplikatif dan eksperimental, karena melibatkan proses perancangan, implementasi, serta pengujian terhadap alat dan sistem yang dibangun. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat digunakan secara langsung di lapangan untuk membantu masyarakat maupun instansi terkait dalam melakukan pemantauan kualitas air secara berkelanjutan.

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Prototyping*, yaitu suatu pendekatan iteratif dalam pengembangan sistem yang memungkinkan perancang untuk membangun purwarupa awal (*prototype*), mengujinya, dan melakukan revisi berdasarkan masukan atau hasil uji coba. Model ini sangat cocok diterapkan dalam pengembangan sistem berbasis *Iot* karena memungkinkan perbaikan bertahap, baik dari sisi perangkat keras (*hardware*) maupun perangkat lunak (*software*), hingga diperoleh sistem yang stabil dan sesuai dengan kebutuhan.

Penggunaan pendekatan *Prototyping* memberikan fleksibilitas dalam proses pengembangan, memungkinkan integrasi teknologi secara progresif, dan memberikan ruang bagi evaluasi sistem dalam kondisi nyata sebelum sistem akhir disempurnakan (Gani *et al.*, 2023, 2024a). Hal ini sejalan dengan karakteristik sistem *Iot* dan *LoRa* yang kompleks, di mana pengujian awal sangat diperlukan untuk mengidentifikasi permasalahan teknis seperti kestabilan sinyal, akurasi sensor, dan keterhubungan data ke *cloud*.

Dengan demikian, pendekatan ini mendukung tujuan penelitian untuk merancang sistem *monitoring* yang efisien, responsif, dan dapat digunakan di daerah terpencil, serta mampu menyediakan informasi kualitas air secara cepat, akurat, dan mudah diakses melalui internet.

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta, yang dipilih karena memiliki lingkungan yang mendukung proses pengembangan dan pengujian sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*. Lokasi penelitian dibagi menjadi dua kategori, yaitu lokasi pengembangan sistem dan lokasi pengujian lapangan.

3.2.1 Lokasi Pengembangan Sistem

Pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak sistem dilakukan di ruang kerja peneliti yang berlokasi di Condongcatur, Kecamatan Depok, Kabupaten Sleman, Yogyakarta. Lokasi ini dipilih karena dekat dengan kampus Universitas Islam Indonesia (UII), memiliki akses terhadap koneksi internet, serta tersedia alat pendukung seperti laptop, *breadboard*, sensor, dan perangkat pemrograman yang dibutuhkan untuk merakit dan menguji sistem secara bertahap.

3.2.2 Lokasi Pengujian Lapangan

Pengujian lapangan dilaksanakan di Embung Tambakboyo, sebuah waduk buatan yang terletak di kawasan Condongcatur, Sleman. Lokasi ini dipilih karena memiliki kondisi air yang relatif tenang, mudah diakses, serta aman untuk pengujian sistem berbasis sensor dan komunikasi *LoRa*. Selain itu, area ini memungkinkan pengukuran parameter kualitas air secara langsung dan mendukung pengujian jangkauan komunikasi hingga 500 meter dalam kondisi *Line of Sight (LOS)*.



Gambar 3.1 Kondisi Lokasi Pengujian di Embung Tambakboyo³

3.2.3 Waktu Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian dimulai pada bulan Maret hingga Juni 2025, yang mencakup seluruh tahapan penelitian mulai dari studi literatur, perancangan sistem, implementasi perangkat keras dan lunak, pengujian lapangan, hingga penyusunan laporan akhir skripsi. Adapun rincian tahapan waktu pelaksanaan dijabarkan pada Gambar 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Rincian Jadwal Pelaksanaan Penelitian.

No	Kegiatan	Lokasi	Waktu Pelaksanaan
1	Studi Literatur & Desain Sistem	Condongcatur, Sleman	Maret 2025
2	Perakitan & Pemrograman Sistem	kost, Sleman	Maret – April 2025
3	Pengujian Lapangan & Kalibrasi	Embung Tambakboyo, Condongcatur	Mei 2025
4	Analisis Data & Dokumentasi	Sleman dan Kampus UII	Mei – Juni 2025

3.3 Model Pengembangan Sistem

Penelitian ini menggunakan model pengembangan *prototyping*, yaitu metode yang menekankan pada pengembangan sistem melalui pembuatan purwarupa secara bertahap. Model ini sangat cocok diterapkan pada sistem berbasis *IoT* dan komunikasi *LoRa* karena

³ Sumber: Dokumentasi peneliti Kondisi Lokasi Pengujian di Embung Tambakboyo (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

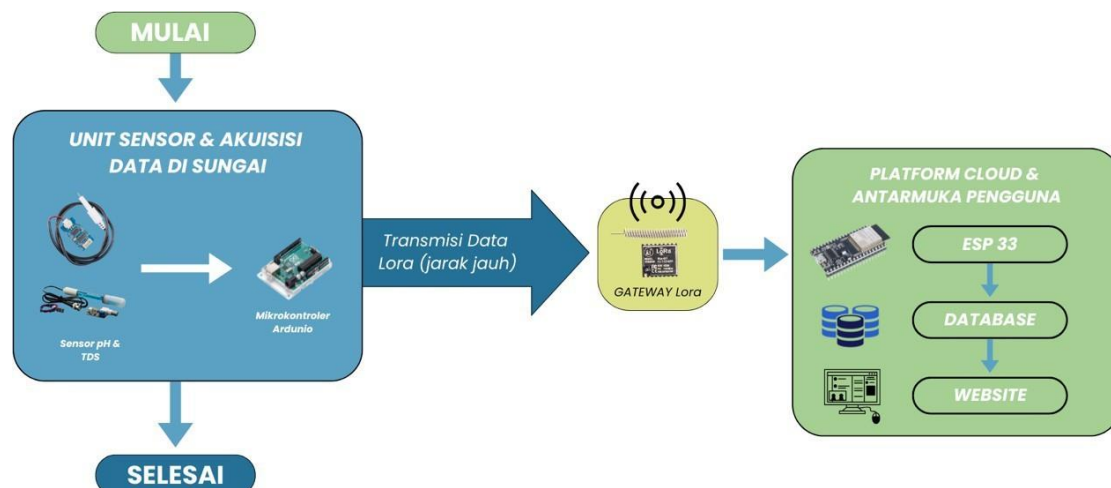
memungkinkan pengembang untuk melakukan iterasi desain, pengujian perangkat keras, serta validasi hasil visualisasi secara *Real-time* sebelum sistem akhir dibangun.

Model ini dipilih karena memberikan keunggulan dalam hal fleksibilitas, efisiensi waktu, dan kemampuan menyesuaikan kebutuhan sistem berdasarkan umpan balik dari proses pengujian di lapangan. Pendekatan ini juga memungkinkan pengembangan sistem dalam skala kecil terlebih dahulu, sebelum dikembangkan menjadi sistem akhir yang stabil dan siap digunakan. Berdasarkan pendekatan model *prototyping* yang dikemukakan oleh (Gani *et al.*, 2023, 2024a).

Setiap tahapan dilakukan secara berurutan namun iteratif, artinya proses dapat kembali ke tahap sebelumnya apabila ditemukan kekurangan atau masalah. Hal ini memungkinkan sistem berkembang secara bertahap dan terukur, serta meminimalkan risiko kesalahan desain sejak awal.

Melalui penerapan model *prototyping* ini, sistem *monitoring* kualitas air sungai dapat dikembangkan dengan pendekatan yang praktis dan relevan terhadap kondisi lingkungan yang sebenarnya. Sistem diuji dan disempurnakan berdasarkan kondisi nyata di lapangan, khususnya di lokasi pengujian Embung Tambakboyo, Yogyakarta, sehingga validitas sistem lebih terjamin.

3.3.1 Blok Diagram Sistem



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem *Monitoring* Kualitas Air Berbasis *Iot* dan *LoRa*.⁴

Sistem *monitoring* yang dikembangkan dalam penelitian ini menggunakan arsitektur dua mikrokontroler, yaitu Arduino Uno R3 sebagai *Node* pengirim (*transmitter*) dan ESP32

⁴ Sumber: Hasil rancangan Blok Diagram Sistem *Monitoring* Kualitas Air Berbasis *Iot* dan *LoRa* peneliti (Rasyid Achmad Fauzi, 2025)

sebagai *node* penerima (*receiver*) sekaligus pengirim data ke platform *cloud* *Firestore*. Struktur ini dirancang agar dapat melakukan akuisisi data dari sensor, pengiriman data nirkabel melalui komunikasi *LoRa*, hingga penyimpanan data di *cloud* secara *real-time*.

Pada sisi pengirim, terdapat dua sensor utama yang digunakan untuk mengukur parameter kualitas air sungai, yaitu sensor pH dan sensor *TDS*. Kedua sensor tersebut terhubung ke mikrokontroler Arduino Uno R3, yang bertugas membaca data analog dari sensor dan mengubahnya ke format digital. Setelah data dikonversi, Arduino Uno mengirimkan informasi tersebut secara berkala melalui modul *LoRa* RA-01 (*transmitter*).

Di sisi penerima, ESP32 yang telah dilengkapi dengan modul *LoRa* RA-01 (*receiver*) berfungsi untuk menerima data yang dikirim dari *Node* pengirim secara nirkabel. Setelah data diterima, ESP32 memprosesnya, lalu mengirimkan hasil pembacaan ke *Firestore Real-time Database* menggunakan koneksi *WiFi*. *Firestore* bertindak sebagai penyimpanan data dan sumber utama visualisasi dalam sistem ini.

Data yang tersimpan di *Firestore* kemudian ditampilkan secara langsung melalui *dashboard* pemantauan berbasis *web*, yang dapat diakses oleh pengguna dari perangkat manapun. Antarmuka ini menampilkan nilai pH dan *TDS* dalam bentuk numerik dan grafik, dilengkapi indikator status kualitas air untuk memudahkan interpretasi.

Blok diagram sistem menggambarkan keseluruhan alur proses, mulai dari pengukuran oleh sensor, pemrosesan data oleh Arduino, pengiriman data melalui jaringan *LoRa*, hingga visualisasi melalui platform *cloud*. Diagram ini memberikan gambaran visual terhadap struktur kerja sistem secara menyeluruh serta keterkaitan fungsional antar komponen utama.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Dalam proses pengembangan sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*, diperlukan sejumlah alat dan bahan yang mendukung baik dari sisi perangkat keras (*hardware*) maupun perangkat lunak (*software*). Pemilihan komponen-komponen tersebut dilakukan berdasarkan kriteria kompatibilitas, efisiensi daya, kemudahan integrasi, serta kestabilan dalam pengiriman dan penerimaan data di lingkungan outdoor.

Perancangan sistem ini dilakukan dengan membagi dua peran utama dalam arsitektur sistem, yaitu *Node* pengirim dan *node* penerima. Masing-masing *node* memiliki peran dan perangkat yang saling terhubung serta bekerja secara sinkron untuk mencapai tujuan utama, yakni mendeteksi dan mengirimkan data kualitas air secara *Real-time* ke platform visualisasi daring. Berikut adalah daftar alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian:

a. Perangkat Keras (*Hardware*)

Tabel 3.2 Daftar Alat dan Bahan Penelitian.

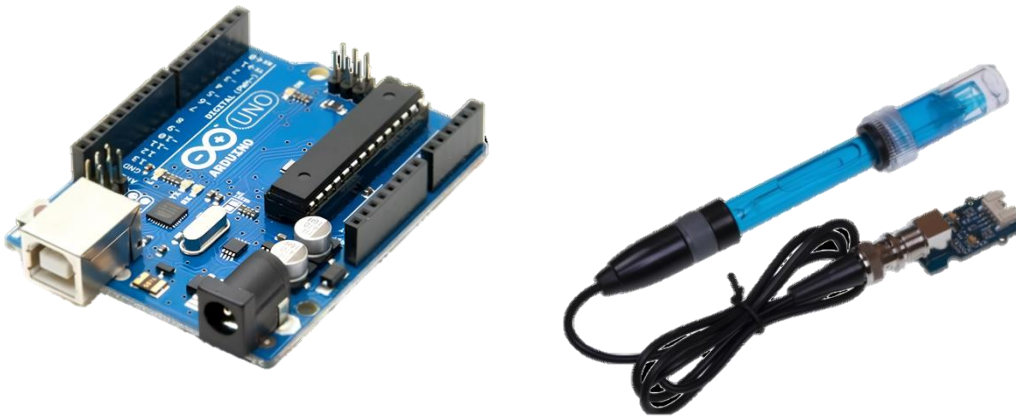
No	Nama Alat/Bahan	Spesifikasi	Fungsi Utama
1	Arduino Uno R3	Mikrokontroler 8-bit ATmega328P	<i>Node</i> pengirim yang membaca data dari sensor pH dan <i>TDS</i>
2	ESP32	Mikrokontroler <i>dual-core</i> , <i>WiFi</i> + <i>Bluetooth</i>	<i>Node</i> penerima, mengirim data ke <i>Firestore</i>
3	Sensor pH Analog	Rentang 0–14, sinyal analog	Mengukur tingkat keasaman air sungai
4	Sensor <i>TDS</i>	Rentang 0–1000 ppm, sinyal analog	Mengukur jumlah zat padat terlarut dalam air
5	<i>LoRa</i> RA-01 SX1278	Chip SX1278, Frekuensi 433 MHz, gaya output hingga +20 dBm, sensitivitas sampai -139 dBm, jangkauan hingga 10 km, antarmuka SPI, tegangan 1.8–3.7 V	Komunikasi data nirkabel antara Arduino dan ESP32
6	PCB Lubang (<i>Prototype</i> Hijau)	Tipe <i>Double Layer</i> , FR-4, ukuran 7x9 cm, jarak lubang 2.54mm	Media perakitan sementara dan koneksi antarkomponen
7	<i>Powerbank</i> /Adaptor DC	Tipe <i>Lithium-Ion</i> , tegangan nominal 3.7V, kapasitas 1500–3500 mAh	Sumber daya untuk mikrokontroler saat pengujian lapangan

b. Perangkat Lunak (*Software*)

Tabel 3.3 Daftar Perangkat Lunak Penelitian.

No	Nama Perangkat Lunak	Keterangan	Fungsi Utama
1	Arduino IDE	Versi terbaru	Menulis dan mengunggah Program ke Arduino & ESP32
2	<i>Firestore Real-time Database</i>	<i>Cloud database</i> milik <i>Google</i>	Menyimpan dan menampilkan data sensor secara <i>real-time</i>
3	<i>Web Browser</i> (<i>Chrome</i> , <i>Edge</i> , <i>dsb</i>)	Dukungan <i>JavaScript</i> & <i>Firestore</i>	Mengakses <i>dashboard</i> visualisasi data
4	<i>Serial Monitor</i> / <i>Debug Tools</i>	Bagian dari Arduino IDE	Melihat log komunikasi sensor & modul <i>LoRa</i> secara langsung

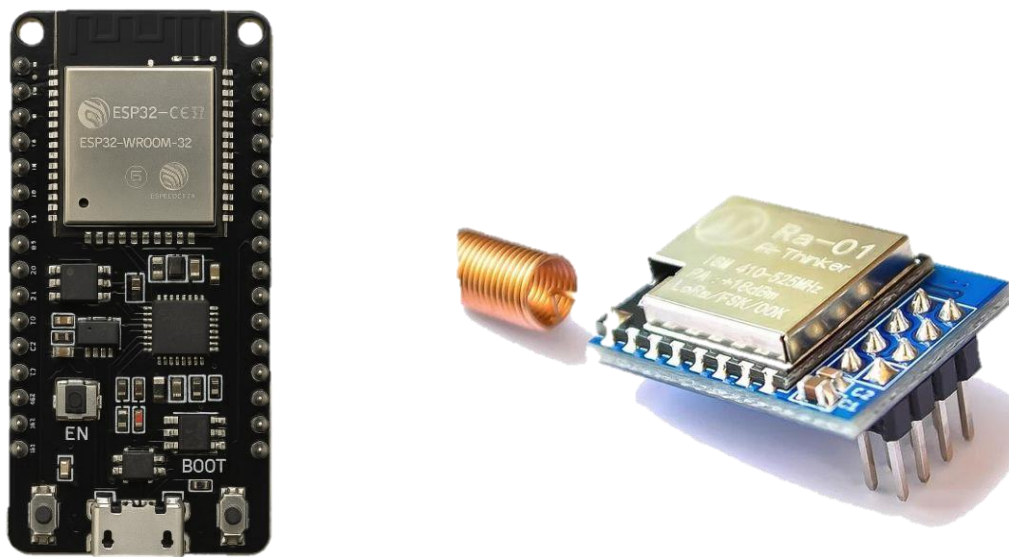
Tabel 3.3 di atas merangkum seluruh alat dan bahan yang digunakan selama proses pengembangan dan pengujian sistem *monitoring* pencemaran air sungai.



Gambar 3.3 *Board* Arduino Uno dan Sensor pH Analog pada *Node* pengirim⁵

Sumber: (<https://electrosome.com/arduino-uno/>)

Sumber: (<https://electronics.stackexchange.com/questions/289548/building-a-ph-meter-circuit-is-it-feasible>)



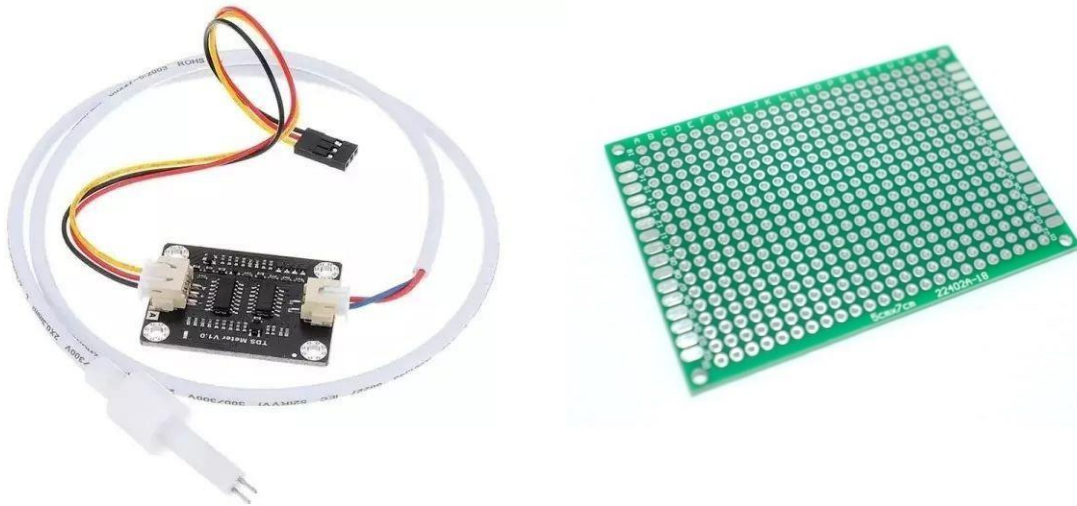
Gambar 3.4 *Node* Penerima ESP32 dan Modul *LoRa* RA-01⁶

Sumber: (https://www.PCbway.com/project/gifts_detail/ESP32_ESP-32S_Development_Board_2.4GHz_WiFi_Bluetooth_Dual_Mode.html)

Sumber: (<https://www.ebay.com/itm/357743081351?mkcid=1&mkrid=711-53200-19255-0&siteid=0&campid=5338771237&customid&toolid=10001&mkevt=1>)

⁵ Sumber: Dokumentasi hardware peneliti (2025)

⁶ Sumber: Dokumentasi hardware peneliti (2025)



Gambar 3.5 Sensor *TDS* dan PCB Lubang⁷

Sumber: (<https://www.hackatronic.com/water-quality-monitoring-system-TDS-sensor-esp32-arduino/>)

Sumber: (<https://ecadio.com/jual-PCb-lubang-8x12-cm>)



Gambar 3.6 Baterai 18650⁸

Sumber: (<https://www.monotaro.id/s038070709.html>)

Terdapat dua kategori utama, yaitu perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*), yang masing-masing memiliki fungsi penting dalam membangun sistem secara utuh.

Pada kategori perangkat keras, komponen utama terdiri dari Arduino Uno R3 sebagai *Node* pengirim dan ESP32 sebagai *node* penerima. Kedua mikrokontroler tersebut dihubungkan melalui komunikasi modul *LoRa* RA-01, yang dipilih karena kemampuannya menjangkau area terpencil dengan konsumsi daya rendah. Sensor yang digunakan dalam

⁷ Sumber: Dokumentasi hardware peneliti (2025)

⁸ Sumber: Dokumentasi hardware peneliti (2025)

sistem ini adalah sensor pH analog dan sensor *TDS*, yang bertugas mengukur parameter kualitas air secara langsung di lokasi sungai.

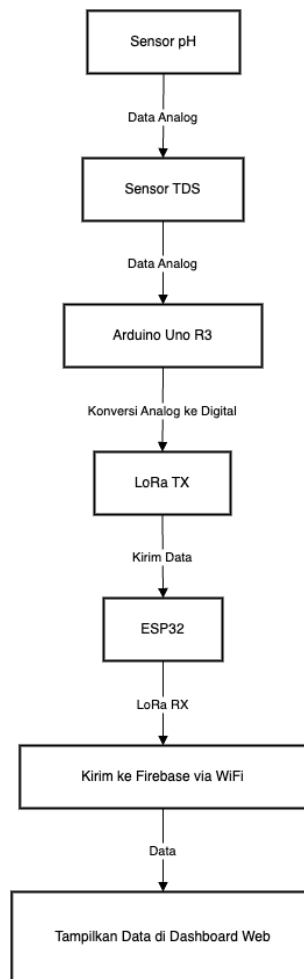
Selain untuk transmisi data sensor pH dan *TDS*, modul *LoRa* RA-01 juga memungkinkan pembacaan nilai *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*). Nilai *RSSI* ini digunakan untuk memantau kualitas sinyal komunikasi *LoRa* secara *real-time*. Untuk menyuplai daya selama pengujian, digunakan *powerbank* atau adaptor 5V, yang memungkinkan sistem beroperasi secara portabel di lapangan. Laptop atau komputer digunakan sebagai alat bantu pemrograman dan *debugging* selama proses pengembangan.

Sementara itu, dari sisi perangkat lunak, penggunaan Arduino IDE memfasilitasi penulisan dan pengunggahan program ke mikrokontroler, sedangkan *Firestore* digunakan sebagai media penyimpanan dan visualisasi data. *Web browser* digunakan untuk mengakses *dashboard Firestore*, dan *Serial Monitor* membantu dalam proses *debugging* sistem.

Seluruh alat dan bahan ini dirakit dan digunakan secara terintegrasi untuk membentuk sistem *monitoring* berbasis *Iot* dan *LoRa* yang mampu bekerja secara *real-time*. Dokumentasi visual dari perakitan sistem akan ditampilkan dalam bentuk foto *prototipenya* pada bagian hasil dan pembahasan.

3.5 Rancangan Sistem

Sistem *monitoring* ini dibangun dengan dua bagian utama, yaitu *Node* pengirim (*transmitter*) dan *node* penerima (*receiver*). *Node* pengirim bertugas membaca parameter kualitas air dari sensor, kemudian mengirimkan data secara nirkabel menggunakan komunikasi *LoRa*. Sementara itu, *node* penerima menerima data tersebut dan meneruskannya ke *Firestore Real-time Database* agar dapat ditampilkan melalui *dashboard web*.



Gambar 3.7 Blok Diagram Sistem *Monitoring* Kualitas Air Berbasis *Iot* dan *LoRa*.⁹

Dari diagram diatas, *Node* pengirim bertugas membaca parameter kualitas air menggunakan dua sensor, yaitu sensor pH dan sensor *Total Dissolved Solids (TDS)*. Sensor pH berfungsi untuk mengukur tingkat keasaman air, sedangkan sensor *TDS* digunakan untuk mendeteksi jumlah zat padat terlarut yang menjadi indikator kontaminasi atau pencemaran.

Kedua sensor ini dihubungkan dengan mikrokontroler Arduino Uno R3, yang bertugas memproses sinyal analog menjadi data digital dan menyiapkan data untuk dikirimkan. Selanjutnya, data dari sensor dikirim secara nirkabel menggunakan modul *LoRa RA-01* melalui komunikasi radio frekuensi 915 MHz.

Data yang dikirimkan oleh *Node* pengirim diterima oleh *node* penerima, yang terdiri dari ESP32 sebagai mikrokontroler utama. ESP32 menerima data dari modul *LoRa RA-01* (penerima/*receiver*) dan kemudian mengunggah data tersebut ke *Firestore Real-time Database* menggunakan koneksi *WiFi*. *Firestore* digunakan sebagai platform penyimpanan data berbasis

⁹ Sumber: Blok Diagram Sistem *Monitoring* Kualitas Air Berbasis *Iot* dan *LoRa* Dibuat dengan Draw.io oleh peneliti (2025).

cloud karena mampu menyimpan dan menyajikan data secara *real-time*, serta mendukung integrasi dengan berbagai antarmuka pengguna.

Selanjutnya, data yang telah tersimpan di *Firebase* divisualisasikan dalam *dashboard web* yang dikembangkan sendiri oleh peneliti. *Dashboard* ini menampilkan informasi hasil pengukuran sensor pH dan *TDS* dalam bentuk numerik maupun grafik, sehingga memudahkan pengguna untuk memantau kualitas air sungai secara langsung dan dari jarak jauh.

Rancangan sistem ini dikembangkan dengan mempertimbangkan efisiensi daya, kemudahan implementasi di lapangan, serta kemampuan pengiriman data jarak jauh di area yang tidak terjangkau oleh sinyal *GSM*. Kombinasi antara sensor lingkungan, mikrokontroler, komunikasi *LoRa*, dan platform *cloud* menjadikan sistem ini efektif digunakan sebagai alat pemantauan kualitas air yang berkelanjutan, tepat guna, dan mudah diakses oleh masyarakat maupun pemangku kebijakan lingkungan.

Setiap kali *node* penerima mendapatkan data dari *Node* pengirim melalui *LoRa*, sistem tidak hanya mencatat nilai pH dan *TDS*, tetapi juga mencatat nilai *RSSI* dari setiap paket data yang masuk. Nilai *RSSI* ini kemudian dikirim ke *Firebase* bersama data sensor lain, sehingga *dashboard web* mampu menampilkan kualitas sinyal komunikasi *LoRa* secara *Real-time* untuk setiap proses pengambilan data.

3.5.1 Perancangan *Node* Pengirim

Node pengirim berfungsi sebagai perangkat utama yang membaca data sensor kualitas air kemudian mengirimkan data tersebut ke *node* penerima melalui komunikasi *LoRa*. Komponen utama yang digunakan antara lain Arduino Uno R3, sensor pH, sensor *TDS*, dan modul *LoRa* RA-01.

Pada rangkaian ini, sensor pH dan *TDS* dihubungkan ke input analog Arduino Uno. Selanjutnya, data hasil pembacaan sensor diolah, dilakukan kalibrasi (khusus pH) untuk akurasi, lalu digabungkan menjadi satu string agar mudah dikirim. Setiap interval tertentu, data dikirimkan dari Arduino ke *node* penerima menggunakan modul *LoRa* pada frekuensi 433 MHz.

Gambar 3.7 menampilkan diagram blok *Node* pengirim. *Node* ini mengambil data pH dan *TDS* dari sensor, memprosesnya, dan mengirimkan hasilnya melalui *LoRa* kepada *node* penerima di lokasi terpisah.

```

// Pembacaan dan kalibrasi sensor pH
int buf_ph[10];
for (int i = 0; i < 10; i++) buf_ph[i] = analogRead(PhSensorPin);
// Median dan konversi ke nilai pH
float  phValue  =  -5.70  *  tegangan_ph  +  21.34  +
ph_kalibrasi_offset;

// Pembacaan sensor TDS
gravityTDS.update();
float TDSValue = gravityTDS.getTDSValue();

// Pengiriman data lewat LoRa
dataKirim = String(phValue, 2) + "," + String(TDSValue, 0);
LoRa.beginPacket();
LoRa.print(dataKirim);
LoRa.endPacket();

```

Gambar 3.8 Kode Pembacaan, Kalibrasi, dan Pengiriman Data Sensor *Node* pengirim¹⁰

Node pengirim diuji pada kondisi *Line-of-Sight (LOS)* dan mampu mengirimkan data sensor ke *node* penerima setiap 10 detik secara stabil, tanpa terjadi kehilangan paket data selama pengujian awal. Kinerja rangkaian ini memudahkan proses *monitoring* kualitas air secara *real-time*.

3.5.2 Perancangan *Node* Penerima

Node penerima berfungsi sebagai sistem utama untuk menerima data kualitas air yang dikirim oleh *Node* pengirim melalui komunikasi *LoRa*, kemudian mengolah dan meneruskan data tersebut ke *Firebase* agar dapat ditampilkan pada *dashboard web*. Komponen utama *node* penerima terdiri dari ESP32/ESP8266, modul *LoRa* RA-01, koneksi *WiFi*, serta fasilitas akses ke database *Firebase*.

Pada rangkaian ini, ESP32 menginisialisasi koneksi *LoRa* dan *WiFi*, lalu mendengarkan paket data yang dikirim oleh *Node* pengirim. Setelah data diterima (berisi nilai pH dan *TDS*), ESP32 memproses format data dan menyimpan hasilnya ke *Firebase Real-time Database* bersama waktu pembacaan (*timestamp*) melalui jaringan *WiFi*. Proses ini memastikan

¹⁰ Sumber: Kode Pembacaan, Kalibrasi, dan Pengiriman Data Sensor *Node* pengirim (Rasyid Achmad Fauzi). (Arduino IDE/ESP32).

monitoring dapat diakses secara *Real-time* melalui *web* dari lokasi manapun. *Node* penerima (ESP32) tidak hanya menerima data sensor (pH dan *TDS*) melalui *LoRa*, melainkan juga mencatat nilai *RSSI* tiap paket. Nilai ini dikirim ke *Firestore* dan akan divisualisasikan pada *dashboard web* sebagai indikator kekuatan sinyal komunikasi.

3.5.3 Konfigurasi Dasar LoRa RA-01

Modul LoRa RA-01 (SX1278, 915 MHz) dikonfigurasi P2P (*point-to-point*) tanpa LoRaWAN untuk sederhana & hemat daya. Parameter dasar di Arduino IDE (LoRa library):

Tabel 3.4 Konfigurasi Parameter Lora RA-01

Parameter	Nilai	Fungsi
Frequency	950.0MHz	ISM band Indonesia Legal
Spreading Factor	SF7	Balance range/speed, 500m
Bandwidth (BW)	125 KHz	Standar Long-range
Coding Rate (CR)	4/5	Error correction optimal
Sync Word	0x12	Default
Output Power	20 dBm	RSSI stabil -85 dbm 100m
Preamble Length	8 symbols	Default

Kode Inisialisasi (Node Pengirim):

```
#include<LoRa.h>

void setup() {
  LoRa.setPins(10, 2, 3); // NSS, Reset, DIO0
  LoRa.setTxPower(20); // Power 20 dBm
  LoRa.setSpreadingFactor(7);
  LoRa.setSignalBandwidth(125E3);
  LoRa.setCodingRate4(5);
  LoRa.begin(915E6);
}
```

Gambar 3.9 Kode Inisialisasi Modul Lora RA-01 (Node Pengirim)

Hasil: Jangkauan 500m LOS (Tabel 3.4), packet loss <5%, delay 200ms. Konfig ini optimal untuk sungai rural Sleman (RSSI -85 dBm rata-rata).

Diagram rangkaian *node* penerima dapat dilihat pada Gambar 3.8, yang menunjukkan hubungan antara ESP32, modul *LoRa*, koneksi *WiFi*, dan integrasi ke *Firestore*.

Kode berikut menggambarkan proses utama pada *node* penerima:

```
// Inisialisasi WiFi dan Firebase
WiFi.begin(WIFI_SSID, WIFI_PASSWORD);
config.host = FIREBASE_HOST;
config.signer.tokens.legacy_token = FIREBASE_AUTH;
Firebase.begin(&config, &auth);
Firebase.reconnectWiFi(true);

// Loop utama penerima paket LoRa dan update Firebase
data = LoRa.readStringUntil('\n');
float ph = phStr.toFloat();
float TDS = TDSStr.toFloat();
Firebase.setFloat(FirebaseData, "/sensor/ph", ph);
Firebase.setFloat(FirebaseData, "/sensor/TDS", TDS);
Firebase.setString(FirebaseData, "/sensor/time",
getFormattedTime());
```

Gambar 3.10 Kode Proses Pengiriman Data Sensor ke *Firestore* pada *Node* Penerima¹¹

Node penerima berhasil menerima dan mengirimkan data sensor ke *Firestore* secara *Real-time* dalam pengujian awal, sehingga data *monitoring* air sungai dapat langsung divisualisasikan pada *dashboard web*. Dengan desain ini, sistem dapat digunakan di berbagai lokasi pemantauan.

3.6 Tahapan Pengembangan Sistem.

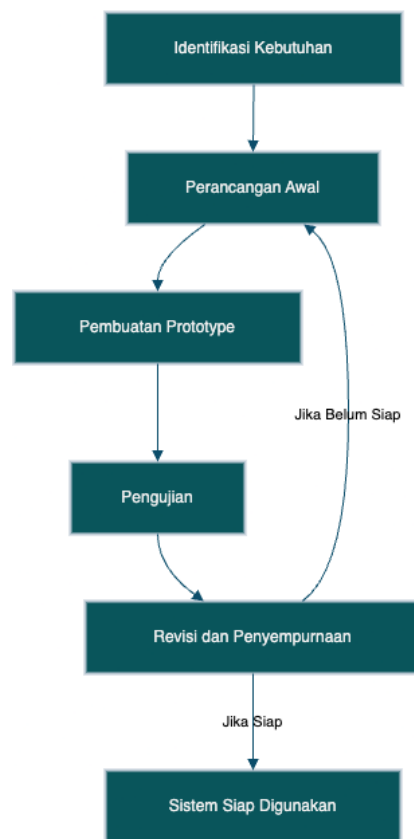
Subbab ini menjelaskan urutan kegiatan nyata yang dilakukan peneliti dalam membangun sistem, mulai dari identifikasi kebutuhan hingga sistem siap diuji di lapangan. Tahapan ini bukan lagi tahap perancangan di atas kertas, tetapi rangkaian proses implementasi, pengujian, dan penyempurnaan sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *IoT* dan *LoRa* sesuai model *prototyping* pada Gambar 2.1 dan Tabel 3.2.

Proses dimulai dengan identifikasi kebutuhan perangkat keras dan perangkat lunak. Pada tahap ini dilakukan pemetaan terhadap komponen yang dibutuhkan untuk membangun sistem *monitoring*, seperti sensor pH dan sensor *TDS* sebagai pengukur parameter kualitas air, dua mikrokontroler utama Arduino Uno R3 dan ESP32, modul *LoRa* 915 MHz sebagai media komunikasi data, serta layanan *Firestore Real-time Database* sebagai penyimpanan dan visualisasi data.

Setelah kebutuhan sistem terdefinisi, dilakukan tahap pengembangan sistem awal. Tahap ini merealisasikan rancangan pada Subbab 3.5 ke dalam bentuk *prototype*, meliputi penyusunan blok diagram sistem, implementasi alur komunikasi data antarrangkaian, perakitan *node*

¹¹ Sumber: Kode Proses Pengiriman Data Sensor ke *Firestore* pada *Node* Penerima peneliti (Rasyid Achmad Fauzi, 2025). (Arduino IDE/ESP32).

pengirim dan *node* penerima, serta pembuatan rancangan awal antarmuka *dashboard web* yang akan menampilkan hasil pengukuran.



Gambar 3.11 Tahapan Pengembangan Sistem Menggunakan Model *Prototyping*.¹²

Tahapan ini bersifat konseptual dan menjadi dasar dari proses perakitan sistem. Selanjutnya, sistem mulai diimplementasikan dalam bentuk *prototype*. Komponen-komponen dirakit dan diprogram untuk menjalankan fungsinya masing-masing. Arduino Uno R3 dikonfigurasi untuk membaca data dari sensor pH dan *TDS*, kemudian mengirimkannya melalui modul *LoRa* RA-01. Data tersebut diterima oleh ESP32 yang selanjutnya meneruskan informasi tersebut ke *Firestore* menggunakan koneksi *WiFi*. Sementara itu, *dashboard web* buatan peneliti dikembangkan untuk mengambil data dari *Firestore* dan menampilkannya secara *Real-time* kepada pengguna.

Setelah *prototype* selesai dirakit, sistem diuji secara fungsional dan lapangan. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi akurasi sensor, kestabilan transmisi data melalui jaringan *LoRa* dalam jangkauan maksimal 500 meter, serta kemampuan sistem dalam menampilkan data secara *Real-time* melalui *dashboard*. Lokasi pengujian dipilih di kawasan Embung

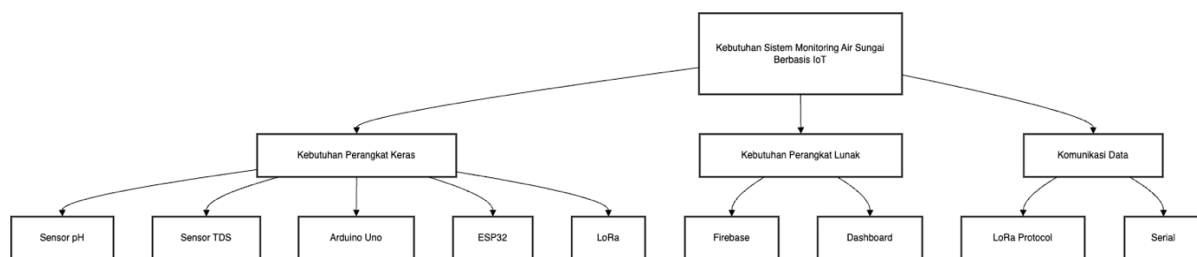
¹² Sumber: Tahapan Pengembangan Sistem Menggunakan Model *Prototyping* Dibuat dengan Draw.io oleh peneliti (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Tambakboyo, Sleman, yang memiliki kondisi perairan tenang dan mendukung pengujian komunikasi nirkabel.

Dari hasil pengujian, dilakukan analisis terhadap kelemahan atau kekurangan sistem, baik dari sisi teknis maupun visual. Jika ditemukan kendala seperti nilai sensor yang tidak stabil, *delay* pengiriman data, atau kesalahan tampilan di *dashboard*, maka sistem akan diperbaiki dan disesuaikan. Revisi dapat mencakup penyesuaian konfigurasi sensor, penguatan sinyal *LoRa*, atau penyempurnaan antarmuka *web*. Proses ini dilakukan secara berulang hingga sistem berjalan sesuai dengan tujuan dan harapan penelitian.

Dengan tahapan pengembangan yang terstruktur ini, sistem yang dihasilkan diharapkan tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga memiliki keandalan dalam konteks aplikasi lapangan. Proses iteratif memungkinkan fleksibilitas dan peningkatan kualitas sistem seiring dengan bertambahnya pengalaman dan hasil evaluasi selama proses pengembangan berlangsung.

3.6.1 Identifikasi Kebutuhan



Gambar 3.12 Diagram Kebutuhan Perangkat Keras dan Lunak Sistem.¹³

Dari sisi perangkat keras, sistem memerlukan sensor yang mampu mengukur parameter dasar kualitas air, yaitu sensor pH untuk mengetahui tingkat keasaman air, dan sensor *TDS* (*Total Dissolved Solids*) untuk mengukur jumlah zat padat terlarut. Kedua parameter ini dipilih karena dapat memberikan gambaran awal tentang tingkat pencemaran yang terjadi di aliran sungai. Sensor-sensor ini akan dihubungkan dengan mikrokontroler Arduino Uno R3 yang berperan sebagai *Node* pengirim, bertugas membaca data dari sensor dan mengirimkannya melalui modul *LoRa* RA-01 sebagai media komunikasi nirkabel jarak jauh.

Pada sisi penerima, digunakan ESP32 sebagai mikrokontroler dengan konektivitas *WiFi* yang berfungsi untuk menerima data dari *LoRa*, kemudian mengirimkannya ke *Firestore Real-*

¹³ Sumber: Diagram Kebutuhan Perangkat Keras dan Lunak Sistem Dibuat dengan Draw.io oleh peneliti (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

time Database. ESP32 dipilih karena sudah terintegrasi dengan modul *WiFi*, sehingga memungkinkan komunikasi langsung dengan layanan *cloud* tanpa membutuhkan perangkat tambahan. *Firebase* digunakan sebagai media penyimpanan data karena mendukung pengiriman dan pembaruan data secara *real-time*, serta mudah diintegrasikan dengan antarmuka pengguna berbasis *web*.

Dari sisi perangkat lunak, dibutuhkan beberapa komponen tambahan untuk mendukung sistem berjalan secara menyeluruh. Perangkat lunak utama berupa kode program untuk Arduino dan ESP32, yang berfungsi membaca data sensor, mengatur komunikasi *LoRa*, serta mengelola proses pengiriman data ke *Firebase*. Selain itu, diperlukan *dashboard* berbasis *web* yang dikembangkan sendiri oleh peneliti untuk menampilkan data hasil pengukuran dalam bentuk tabel dan grafik yang mudah dibaca oleh pengguna.

Kebutuhan lain yang juga dipertimbangkan adalah sumber daya listrik, koneksi *WiFi* untuk ESP32, serta kondisi lingkungan pengujian yang sesuai seperti lokasi sungai dengan arus tenang. Sistem dirancang agar dapat bekerja dalam kondisi luar ruangan dengan konsumsi daya rendah dan transmisi data yang tetap stabil meskipun berada di wilayah dengan keterbatasan jaringan seluler.

Melalui proses identifikasi ini, diperoleh gambaran menyeluruh mengenai komponen-komponen penting yang harus disiapkan, sehingga setiap tahapan pengembangan sistem dapat dilakukan secara terstruktur dan sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu membangun sistem *monitoring* pencemaran air sungai yang efisien, *real-time*, dan mudah diakses oleh pengguna.

3.6.2 Perancangan Awal

Perancangan awal merupakan tahap konseptual dalam pengembangan sistem yang bertujuan untuk menyusun arsitektur dan alur kerja sistem sebelum dilakukan proses implementasi. Pada tahap ini, komponen-komponen yang telah diidentifikasi sebelumnya dipetakan secara fungsional untuk memastikan keterhubungan antarperangkat berjalan sesuai dengan alur yang diinginkan. Perancangan ini meliputi susunan blok sistem, aliran data antar *node*, dan desain awal tampilan antarmuka *dashboard*.

Secara garis besar, sistem ini dirancang dengan dua *node* utama, yaitu *Node* pengirim dan *node* penerima, yang saling terhubung melalui komunikasi nirkabel berbasis *LoRa*. *Node* pengirim terdiri dari Arduino Uno R3 yang bertugas membaca data dari sensor pH dan sensor *TDS*. Data dari kedua sensor ini kemudian dikirim melalui modul *LoRa* RA-01 dengan frekuensi 915 MHz ke *node* penerima. *Node* penerima menggunakan ESP32 yang berfungsi menerima data dari *LoRa* RA-01, mengolahnya, lalu mengirimkan data tersebut ke *Firebase*

Real-time Database melalui koneksi *WiFi*. *Firestore* dipilih karena kemampuannya menyimpan data secara *Real-time* dan mendukung visualisasi berbasis *web*.

Selain perancangan alur komunikasi antarperangkat, pada tahap ini juga disusun rancangan awal tampilan *dashboard web* yang akan digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran sensor secara *real-time*. *Dashboard* ini dirancang agar dapat menampilkan nilai pH dan *TDS* secara numerik serta grafik, dilengkapi indikator warna yang menunjukkan status kualitas air (misalnya normal, waspada, atau tercemar). Visualisasi ini bertujuan untuk memudahkan pengguna dalam membaca data tanpa perlu memahami detail teknis sistem.

Perancangan awal juga mempertimbangkan aspek penempatan alat di lapangan. *Node* pengirim dirancang agar dapat beroperasi secara mandiri di dekat aliran sungai, dengan penggunaan daya seminimal mungkin. Sementara itu, *node* penerima ditempatkan di lokasi yang memiliki akses internet, seperti rumah atau pos *monitoring*, yang mampu menerima sinyal *LoRa* dari jarak hingga 500 meter *LOS*.

Tahap perancangan ini menjadi dasar bagi implementasi *prototype* awal dan pengujian sistem. Melalui proses ini, seluruh komponen baik perangkat keras maupun lunak telah disusun dan dirancang secara sistematis, sehingga memudahkan proses integrasi pada tahap berikutnya dan mengurangi potensi kesalahan selama pengembangan berlangsung.

3.6.3 Pembuatan *Prototype*

Prototype pada penelitian ini dirancang melalui pendekatan bertahap dan terstruktur untuk memastikan bahwa setiap komponen perangkat keras dan perangkat lunak bekerja secara terpadu sesuai dengan tujuan sistem.

Proses pembuatan dimulai dengan perakitan *Node* pengirim, yang terdiri atas mikrokontroler Arduino Uno R3 dan dua buah sensor utama, yaitu sensor pH dan sensor *Total Dissolved Solids (TDS)*. Sensor pH berfungsi untuk mengukur tingkat keasaman air, sedangkan sensor *TDS* digunakan untuk mengukur jumlah zat padat terlarut dalam air. Kedua parameter ini menjadi indikator dasar untuk mendeteksi tingkat pencemaran pada air sungai. Data analog yang dihasilkan oleh sensor dikonversi menjadi data digital oleh Arduino, lalu dikemas dalam format tertentu dan dikirimkan menggunakan modul komunikasi *LoRa* RA-01.

Modul *LoRa* pada sisi pengirim dikonfigurasi untuk mengirim data ke *node* penerima secara nirkabel. Uji coba dilakukan pada radius 0 hingga 500 meter untuk menguji kestabilan transmisi data, sesuai dengan karakteristik jangkauan ideal teknologi *LoRa* dalam kondisi lapangan terbuka *LOS*.

Node penerima menggunakan ESP32, yang dipilih karena mendukung konektivitas *WiFi* serta integrasi langsung dengan layanan *cloud*. Modul *LoRa* di sisi penerima menerima data dari Arduino Uno, lalu ESP32 mengolah data tersebut dan mengirimkannya secara *Real-time* ke *Firestore Real-time Database*. *Firestore* berperan sebagai media penyimpanan *cloud* dan penghubung antara sistem *monitoring* dengan tampilan visual bagi pengguna.

Setelah komunikasi antar *node* berhasil dan data berhasil masuk ke *Firestore*, dikembangkan sebuah *dashboard web* mandiri untuk menampilkan hasil pembacaan sensor secara *real-time*. *Dashboard* ini dirancang dengan antarmuka *web* yang terhubung langsung ke *Firestore* dan dibangun menggunakan bahasa pemrograman front-end seperti *HTML*, *CSS*, dan *JavaScript*. Fokus utama dari tampilan *dashboard* adalah pada kemudahan akses, keterbacaan data, dan kemampuan interpretasi yang baik bagi pengguna umum.

Sepanjang proses perakitan, dilakukan pengujian internal untuk mengevaluasi konektivitas dan kestabilan komunikasi sistem. Pengujian mencakup keberhasilan pembacaan sensor, keberlanjutan pengiriman data melalui *LoRa*, keberhasilan koneksi *WiFi* pada ESP32, dan integrasi *Firestore*. Hasil uji tampak dari output Serial Monitor seperti:

Arduino Uno → "Kirim => pH: 7.02 TDS: 88.00" ESP32 → "Terima data: 7.02,88.00" → " <i>Firestore</i> update sukses"

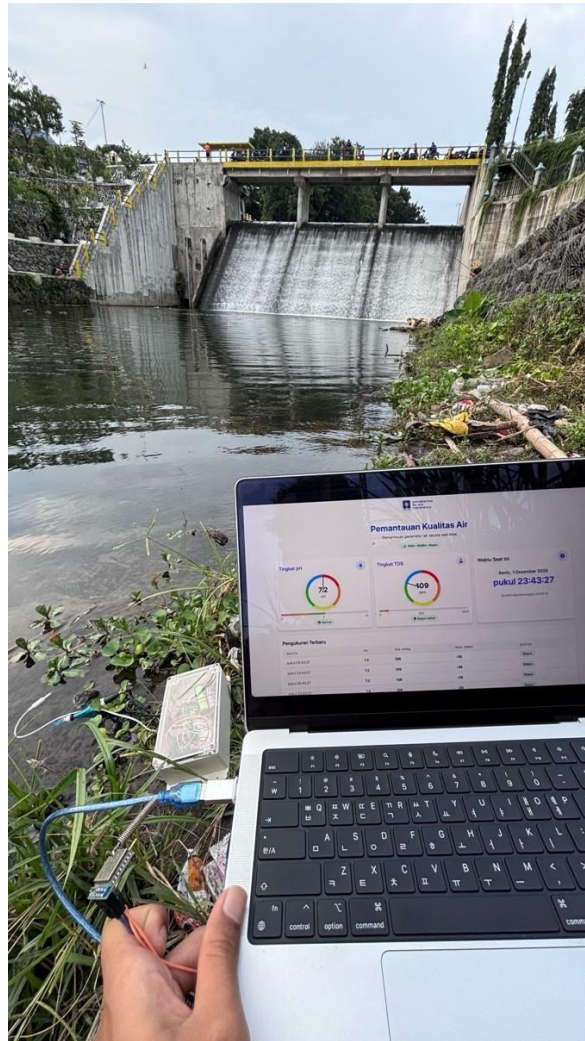
Gambar 3.13 Output Serial Monitor Pengujian Sistem¹⁴.

Beberapa penyesuaian juga dilakukan, seperti kalibrasi sensor pH dan *TDS*, pengaturan interval *delay* pengiriman, serta *debugging* koneksi antara ESP32 dan *Firestore* agar data dapat dikirim secara konsisten.

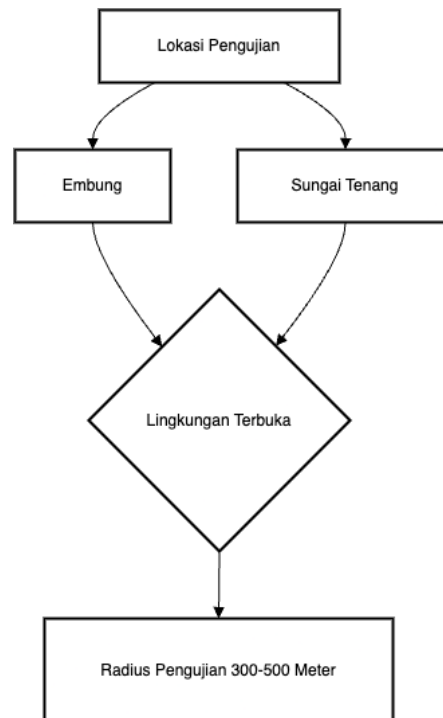
Hasil dari tahapan ini adalah terbentuknya sebuah *prototype* awal yang telah mencakup seluruh alur sistem: pengukuran → pemrosesan → pengiriman → penyimpanan *cloud* → visualisasi *real-time*. Meskipun masih dalam tahap laboratorium dan pengujian terbatas, sistem *prototype* ini telah membuktikan bahwa desain yang dirancang dapat diimplementasikan dan berfungsi sebagaimana mestinya, serta siap untuk diuji lebih lanjut pada kondisi lapangan.

¹⁴ Sumber: Hasil pengujian sistem oleh peneliti (Rasyid Achmad Fauzi, 2025). (Arduino IDE, 2025).

3.6.4 Pengujian *Prototype*



Gambar 3.14 Dokumentasi Pengujian *Prototype* di Embung Tambakboyo¹⁵
Sumber: Dokumentasi pengujian peneliti (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).



Gambar 3.15 Skema Pengujian Lapangan Sistem *Monitoring* Air Sungai.¹⁶

Pengujian *prototype* dilakukan untuk mengevaluasi fungsionalitas utama sistem *monitoring*, yang mencakup akurasi pembacaan sensor, efektivitas transmisi data menggunakan *LoRa*, serta kemampuan sistem dalam menyimpan dan menampilkan data secara *Real-time* melalui *Firestore* dan *dashboard web*. Proses pengujian dibagi menjadi dua tahap, yaitu pengujian awal di ruang tertutup (*indoor*) dan pengujian lanjutan di lapangan terbuka.

Tahap awal pengujian dilakukan secara *indoor* untuk memastikan bahwa sensor pH dan sensor *TDS* terhubung dan berfungsi dengan baik. Beberapa sampel air dengan kadar keasaman dan kejernihan berbeda digunakan sebagai uji pembandingan. Hasil pembacaan sensor dari sistem dibandingkan dengan alat ukur digital standar untuk menentukan tingkat deviasi. Pengujian ini juga bertujuan memastikan bahwa *Arduino Uno R3* dapat membaca data dari sensor secara konsisten dan mengirimkannya melalui modul *LoRa RA-01* tanpa gangguan internal.

Sebelum dilakukan pengujian sistem secara menyeluruh, dilakukan terlebih dahulu proses kalibrasi sensor pH menggunakan larutan standar pH 4.01, 6.86, dan 9.18. Sensor pH dicelupkan ke setiap larutan, kemudian hasil pembacaannya dicatat dan dibandingkan dengan nilai standar larutan. Proses ini dilakukan untuk memastikan bahwa sensor memberikan hasil yang akurat dan dapat diandalkan. Deviasi nilai hasil kalibrasi juga dianalisis untuk

¹⁶ Sumber: Dokumentasi Skema Pengujian Lapangan Sistem *Monitoring* Air Sungai penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

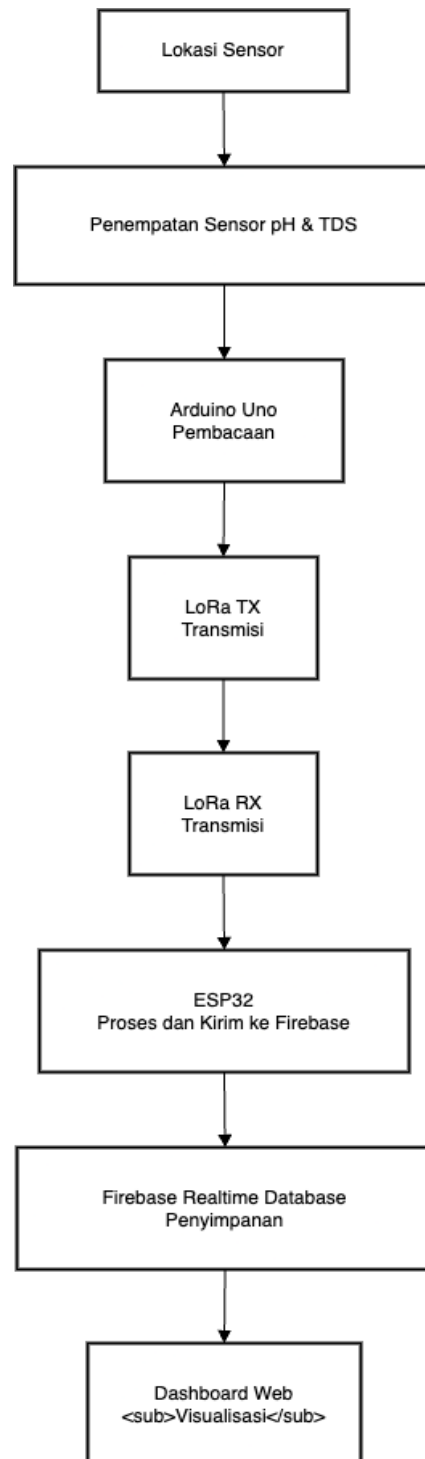
memastikan sensor bekerja dalam batas toleransi alat. Jika terdapat selisih yang signifikan, dilakukan penyesuaian (*offset*) pada sensor sebelum tahap pengujian selanjutnya dilakukan.

Setelah validasi awal selesai, dilakukan pengujian komunikasi antar-*node*. Data dari Arduino Uno R3 (sebagai pemancar) dikirim ke ESP32 (sebagai penerima) menggunakan protokol *LoRa* dalam kondisi *LOS*. Jarak pengiriman divariasikan mulai dari 50 hingga 500 meter untuk mengevaluasi kekuatan sinyal, persentase keberhasilan transmisi, serta waktu tunda (*delay*) antara pembacaan sensor dan penerimaan data di *Firebase*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan keberhasilan pengiriman data hingga radius 300 meter dengan tingkat sukses pengiriman lebih dari 95% dan waktu *delay* rata-rata di bawah 3 detik.

Pengujian lapangan dilakukan di Embung Tambakboyo, Sleman, Yogyakarta, yang dipilih karena kondisi lingkungannya mendukung transmisi nirkabel dan representatif terhadap lokasi sungai dengan aliran tenang. Pada skenario ini, *Node* pengirim diletakkan di tepi embung, sedangkan *node* penerima diposisikan pada jarak 300–500 meter. Parameter kualitas air dipantau secara langsung menggunakan sensor, dan data hasil pembacaan dikirim ke *Firebase* melalui *LoRa* dan koneksi *WiFi* pada ESP32. Visualisasi data diverifikasi melalui *dashboard web* untuk memastikan bahwa nilai pH dan *TDS* tampil secara *Real-time* dan sesuai dengan data aktual.

Selain aspek teknis, evaluasi juga dilakukan terhadap kualitas tampilan antarmuka. *Dashboard web* yang dikembangkan diuji dari sisi kejelasan informasi, kecepatan pembaruan data, dan kemudahan interpretasi oleh pengguna non teknis. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai sensor dapat ditampilkan secara numerik dan grafis dengan respons cepat dan stabil. Status kualitas air juga ditandai dengan indikator visual untuk memudahkan pemantauan.

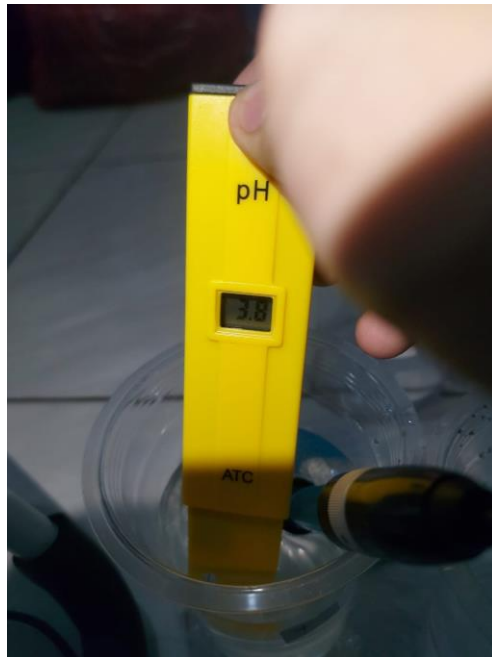
Temuan dari tahap ini menjadi dasar dalam penyempurnaan sistem. Beberapa penyesuaian yang dilakukan meliputi kalibrasi ulang sensor pH dan *TDS*, penyesuaian interval pengiriman data agar tidak terjadi tumpang tindih paket, serta peningkatan kecepatan *refresh dashboard*. Dengan demikian, sistem dinilai telah siap untuk diuji dalam skenario lapangan yang lebih kompleks atau digunakan sebagai *prototype awal* untuk skala implementasi lebih luas. Selama pengujian *LoRa*, dicatat juga nilai *RSSI* dari setiap penerimaan data untuk mengetahui kestabilan dan kualitas komunikasi pada berbagai jarak dan lokasi. Hasil pengujian *RSSI* dianalisis di bab IV.



Gambar 3.16 Diagram Alur Pengujian Sistem *Monitoring* dari Sensor hingga Visualisasi.¹⁷

Pengujian alat dilakukan pada tiga sampel air dengan pH yang berbeda, yaitu pH 4, pH 6, dan pH 8. Tiap hasil pengujian ditampilkan pada gambar berikut, untuk membandingkan hasil dari alat manual dan sensor Arduino

¹⁷ Sumber: Dokumentasi Diagram Alur Pengujian Sistem *Monitoring* dari Sensor hingga Visualisasi penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).



Gambar 3.17 Pengukuran pH Air Sungai dengan pH Meter Digital (uji manual pH4)¹⁸

Gambar ini menunjukkan proses pengukuran pH4 pada air sungai menggunakan pH meter digital sebagai referensi nilai pH manual sebelum dibandingkan dengan hasil sensor Arduino

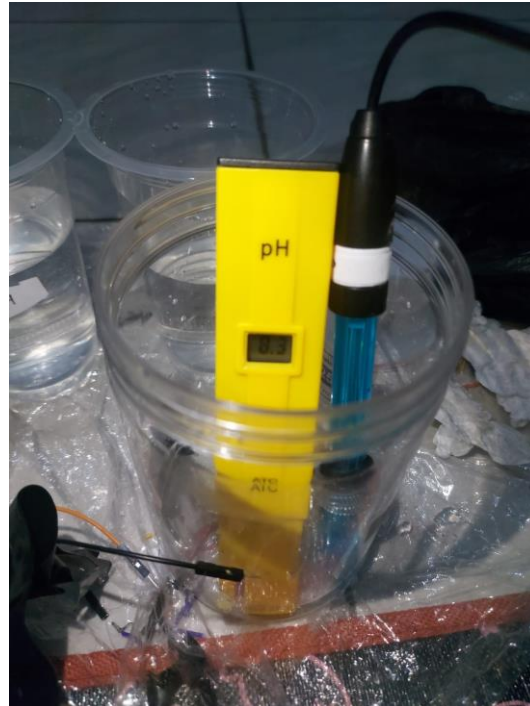


Gambar 3.18 Pengukuran pH Air Sungai dengan pH Meter Digital (uji manual pH6)¹⁹

¹⁸ Sumber: Dokumentasi pengujian manual penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

¹⁹ Sumber: Dokumentasi pengujian manual penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Pengukuran air sungai dengan pH6 menggunakan pH meter digital dilakukan untuk memperoleh nilai aktual sebagai pembanding pada pengujian sensor di sistem *prototype*.



Gambar 3.19 Pengukuran pH Air Sungai dengan pH Meter Digital (uji manual pH8)²⁰

Pengujian air sungai pada pH8 dilakukan dengan pH meter digital. Data manual ini digunakan untuk validasi hasil pembacaan sensor pH pada sistem Arduino.

3.6.5 Revisi dan Penyempurnaan

Tahap ini dilakukan berdasarkan hasil temuan pada proses pengujian *prototype* sebelumnya. Langkah ini bersifat esensial dalam pendekatan model *prototyping*, karena memungkinkan sistem dikembangkan secara iteratif melalui perbaikan langsung terhadap kekurangan atau ketidaksesuaian yang muncul saat sistem diujikan.

Beberapa masalah yang berhasil diidentifikasi mencakup deviasi nilai pembacaan sensor, keterlambatan pengiriman data, serta kurangnya konsistensi dalam tampilan visualisasi pada *dashboard*. Sensor pH, misalnya, menunjukkan fluktuasi nilai yang tidak stabil pada air dengan suhu tinggi, sehingga diperlukan proses kalibrasi ulang menggunakan larutan standar untuk mengembalikan akurasi pengukuran. Sementara itu, pembacaan sensor *TDS* mengalami gangguan ketika kabel sinyal terlalu dekat dengan sumber tegangan tinggi, sehingga perlu dilakukan perapihan jalur koneksi guna menghindari interferensi.

²⁰ Sumber: Dokumentasi pengujian manual penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

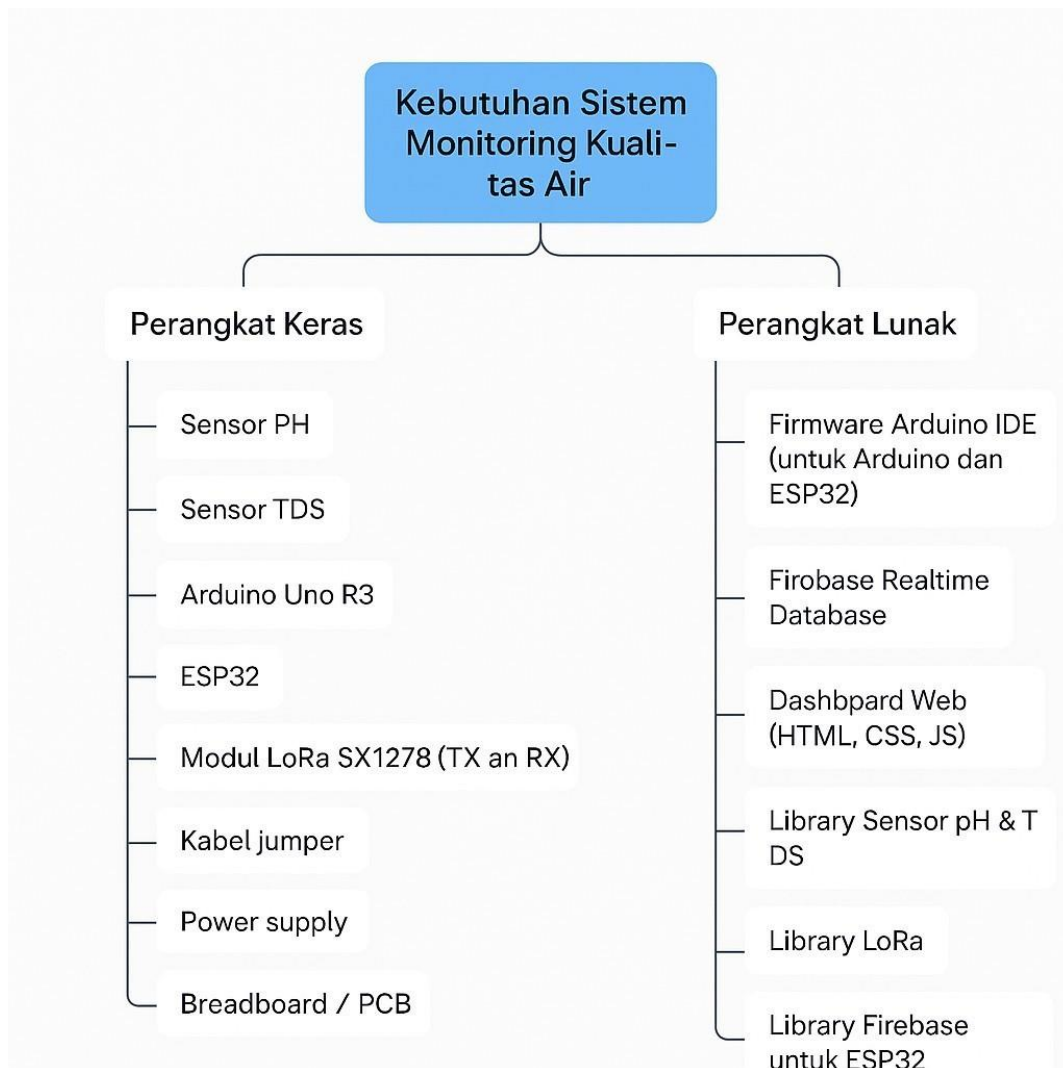
Dalam hal transmisi data, sistem sempat mengalami kegagalan pengiriman secara berkala saat jarak antara pengirim dan penerima mendekati batas maksimal jangkauan *LoRa*. Untuk mengatasi hal tersebut, dilakukan penyesuaian parameter transmisi pada modul *LoRa*, termasuk pengaturan spreading factor dan interval *delay* antar-pengiriman data. Hasilnya menunjukkan peningkatan stabilitas komunikasi, terutama pada jarak di atas 300 meter.

Perbaikan juga dilakukan pada struktur data yang dikirim ke *Firebase*, guna memastikan bahwa data tidak hanya sampai tetapi juga terbaca dengan format yang sesuai oleh antarmuka *dashboard*. Beberapa kesalahan parsing pada antarmuka *web* ditemukan ketika nilai sensor bernilai null akibat gangguan transmisi, sehingga perlu ditambahkan validasi data sebelum dikirimkan ke *Firebase*.

Selain penyempurnaan teknis, antarmuka pengguna pada *dashboard web* turut disesuaikan agar lebih informatif dan mudah diinterpretasikan. Indikator warna pada status kualitas air diperjelas, dan grafik pembacaan data dibuat responsif agar dapat ditampilkan baik pada perangkat komputer maupun ponsel. Pembaruan ini ditujukan agar *dashboard* tetap nyaman digunakan dalam berbagai kondisi pengawasan di lapangan.

Secara keseluruhan, tahap revisi memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan performa sistem. Setelah penyesuaian dilakukan, *prototype* yang sebelumnya masih menunjukkan kelemahan, kini telah mampu menjalankan fungsi utamanya secara lebih stabil dan akurat. Sistem yang dikembangkan menjadi lebih layak untuk diuji lebih lanjut dalam konteks *monitoring* kualitas air sungai secara kontinu dan *real-time*.

3.7 Teknik Pengumpulan Data



Gambar 3.20 Diagram Kebutuhan Sistem *Monitoring* Kualitas Air²¹

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan untuk memperoleh informasi empiris yang dapat digunakan dalam mengevaluasi kinerja sistem *monitoring* kualitas air sungai berbasis *IoT* dan komunikasi *LoRa*. Teknik pengumpulan disusun secara sistematis agar setiap tahapan penting mulai dari pembacaan sensor, proses transmisi data, hingga visualisasi melalui *dashboard* dapat dianalisis secara menyeluruh dan terukur.

Secara umum, data diperoleh melalui dua pendekatan utama, yaitu observasi teknis langsung terhadap sistem dan pencatatan otomatis hasil pembacaan sensor melalui platform *cloud Firebase*. Observasi dilakukan baik di lingkungan laboratorium maupun di lokasi lapangan, dengan fokus pada bagaimana sistem merespons variasi parameter air seperti pH dan *TDS* dalam berbagai kondisi. Aspek yang diamati meliputi stabilitas sensor, kekuatan dan

²¹ Sumber: Dokumentasi rancangan sistem penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

kestabilan sinyal *LoRa*, *delay* transmisi, dan integritas data dari proses pengiriman hingga penerimaan.

Hasil pembacaan sensor disimpan secara otomatis dalam *Firebase Real-time Database* melalui mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai *gateway* pengiriman data. Data tersebut kemudian diakses melalui *dashboard web* yang dibangun secara khusus untuk menampilkan nilai sensor secara *real-time*. Pengumpulan dilakukan dalam interval waktu tertentu yang telah disesuaikan dengan konfigurasi sistem, sehingga nilai-nilai yang terkumpul mencerminkan dinamika kondisi air secara langsung dan aktual.

Selain akuisisi otomatis, dilakukan pula pendokumentasian hasil uji coba dalam bentuk tangkapan layar *dashboard*, log pembacaan sensor pada *Serial Monitor*, serta pencatatan manual selama pengujian lapangan. Bukti visual ini mendukung validitas hasil dan menjadi dasar triangulasi antara hasil sistem dan observasi pengguna.

Dengan menggabungkan metode pengumpulan data otomatis dan observasional, pendekatan ini dirancang untuk memastikan validitas, reliabilitas, dan kelengkapan data, sehingga hasil analisis yang diperoleh benar-benar mencerminkan performa sistem secara komprehensif.

3.7.1 Survei Pengumpulan Data Persepsi Pengguna

Survei persepsi pengguna dilakukan secara daring menggunakan kuesioner *Google Form* yang diisi oleh 13 responden dari berbagai daerah di DIY, DKI Jakarta, dan Jawa Tengah dengan rentang usia terutama 20–30 tahun dan 41–50 tahun. Mayoritas responden berprofesi sebagai ibu rumah tangga dan mahasiswa yang tinggal di sekitar aliran sungai seperti Sungai Code, Selokan Mataram, dan beberapa sungai lain yang dianggap tercemar.

Pertanyaan dalam survei mencakup data demografi, frekuensi responden melihat pencemaran air sungai, penilaian mereka terhadap kondisi kualitas air, serta persepsi terhadap pentingnya pemantauan kualitas air secara berkala dan penggunaan teknologi otomatis berbasis *Iot* dan komunikasi *LoRa*. Data yang terkumpul digunakan sebagai dasar untuk menilai kebutuhan pengguna serta tingkat dukungan masyarakat terhadap penerapan sistem pendeteksi pencemaran air sungai yang dikembangkan dalam penelitian ini.

3.7.2 Survei/Pengukuran Pengujian Sistem

Selain itu dilakukan pengujian teknis terhadap sistem, meliputi pengujian akurasi sensor pH dan *TDS*, pengujian jangkauan dan kualitas sinyal *LoRa*, serta pengujian tampilan

dashboard web. Data pengujian ini dikumpulkan dalam bentuk tabel hasil pengukuran yang disajikan pada Tabel 4.1–4.4 dan dibahas pada Subbab 4.3 dan 4.4.

3.8 Teknik Analisis Data

Data yang dianalisis dalam penelitian ini berasal dari pembacaan dua parameter utama kualitas air, yaitu pH dan *Total Dissolved Solids (TDS)*. Seluruh data direkam secara otomatis melalui sistem *monitoring* yang telah dirancang dan disimpan di *Firestore Real-time Database*. Setiap pembacaan sensor dilengkapi dengan penanda waktu (*timestamp*) sehingga memungkinkan penelusuran data berdasarkan urutan kronologis, yang penting dalam identifikasi pola dan kejadian.

Tahap pertama analisis difokuskan pada evaluasi akurasi sensor. Data pembacaan dari sistem dibandingkan secara langsung dengan hasil dari alat ukur digital standar (pH meter dan *TDS* meter) menggunakan sampel air yang sama. Selisih nilai diukur dengan menghitung deviasi absolut dan deviasi relatif, untuk mengetahui seberapa besar tingkat kesalahan terhadap nilai acuan. Sebagai contoh, apabila sensor menghasilkan nilai pH sebesar 6.8, sedangkan alat ukur standar menunjukkan 7.0, maka:

$$\begin{aligned} \text{Deviasi Absolut} &= |6.8 - 7.0| = 0.2 \\ \text{Deviasi Relatif} &= \left(\frac{0.2}{7.0}\right) \times 100\% = 2.86\% \end{aligned}$$

Hasil deviasi ini menjadi indikator awal validitas sensor untuk aplikasi di lapangan, dan menentukan apakah nilai pembacaan masih dalam rentang toleransi sistem non laboratorium.

Langkah analisis berikutnya berfokus pada konsistensi data. Dataset diekspor dari *Firestore* dan divisualisasikan dalam bentuk grafik *time series* untuk meninjau kestabilan pembacaan sensor terhadap waktu. Ketika terdapat fluktuasi ekstrem atau pembacaan acak yang tidak wajar (*outlier*), hal tersebut dapat mengindikasikan masalah pada kalibrasi sensor, kestabilan *power supply*, atau gangguan lingkungan. Kestabilan data menjadi tolok ukur reliabilitas sistem dalam pemantauan berkelanjutan.

Dari aspek komunikasi, dilakukan analisis terhadap tingkat keberhasilan transmisi data (*packet delivery rate*) antara *Node* pengirim (Arduino Uno R3) dan penerima (ESP32) melalui modul *LoRa* RA-01. Rasio data terkirim dan diterima dicatat dalam kondisi pengujian lapangan dengan variasi jarak hingga 500 meter. Jika tingkat keberhasilan di bawah ambang 90%, maka perlu dilakukan tuning parameter seperti frekuensi kerja, spreading factor, dan *delay* interval untuk meningkatkan performa jaringan *LoRa*.

Selain keberhasilan pengiriman, aspek latensi (*delay* sistem) juga dievaluasi. Latensi dihitung dari selisih waktu antara saat sensor membaca data hingga data tampil di *Firestore* dan *dashboard*. Nilai *delay* ini dikaitkan dengan efisiensi sistem *real-time*, terutama untuk fungsi pemantauan dan peringatan dini. *Delay* yang terlalu tinggi (>5 detik) akan menurunkan efektivitas sistem dalam konteks praktis.

Selanjutnya, dilakukan evaluasi terhadap visualisasi data melalui *dashboard web*. Aspek yang dinilai meliputi keterbacaan data, kecepatan pembaruan, tampilan status kualitas air, serta usability dari sisi pengguna non teknis. Karena *dashboard* dikembangkan sendiri oleh peneliti menggunakan teknologi *HTML*, *CSS*, dan *JavaScript* yang terhubung langsung dengan *Firestore*, maka aspek antarmuka (*UI*) dan pengalaman pengguna (*UX*) juga menjadi bagian penting dalam analisis. Responsivitas tampilan terhadap perangkat *mobile* dan kemudahan interpretasi data (misalnya warna indikator untuk status air) juga diperhatikan.

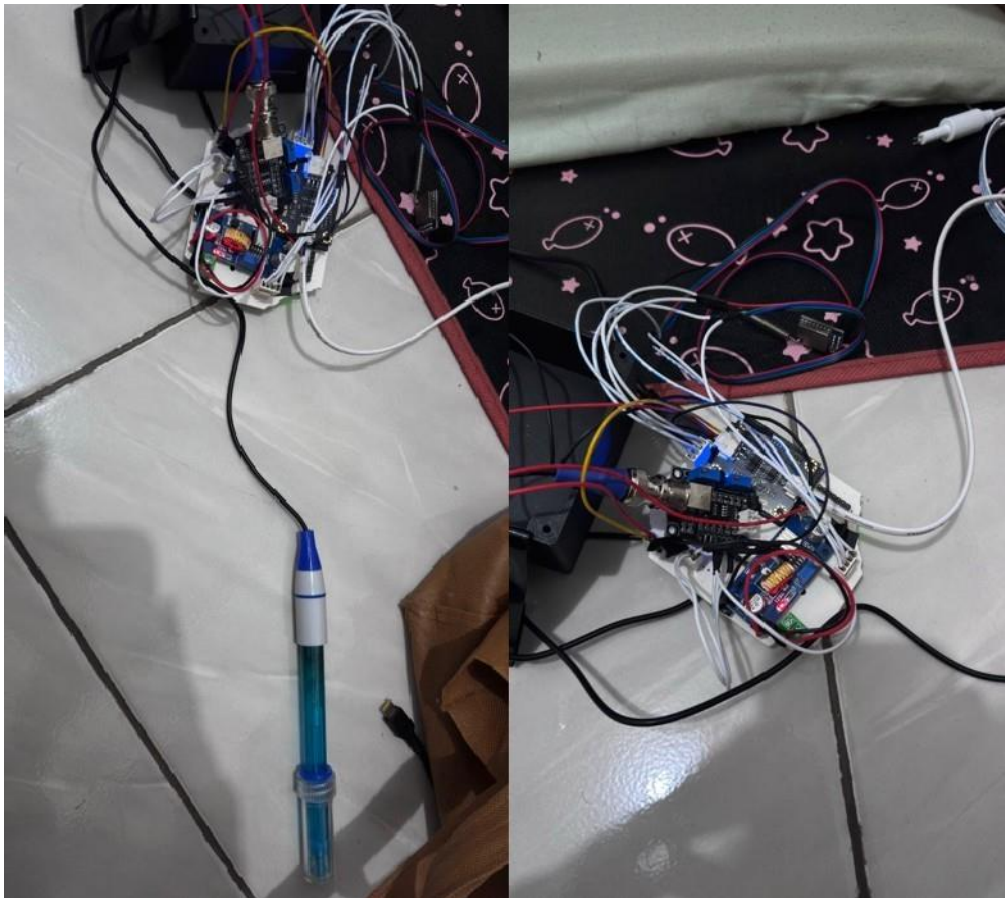
Seluruh hasil analisis digunakan untuk menjawab rumusan masalah utama, khususnya terkait tiga aspek inti: akurasi pembacaan sensor, keandalan sistem transmisi, dan efektivitas visualisasi data. Jika ditemukan kelemahan dalam salah satu aspek tersebut, hasil analisis menjadi dasar dalam revisi sistem di tahap berikutnya. Dengan demikian, teknik analisis data dalam penelitian ini tidak hanya bersifat evaluatif, tetapi juga menjadi dasar strategis dalam pengembangan sistem *monitoring* kualitas air yang lebih optimal dan aplikatif.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Gambaran Umum Sistem

Sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini dirancang untuk memantau kualitas air sungai secara *Real-time* dengan memanfaatkan teknologi *Internet of Things (Iot)* dan komunikasi *LoRa (Long Range)*. Sistem ini bertujuan untuk memberikan solusi *monitoring* yang hemat daya, fleksibel, dan dapat diterapkan pada wilayah dengan keterbatasan infrastruktur jaringan seperti sungai di daerah *rural*.



Gambar 4.1 Implementasi *Node Sensor (Node pengirim)*.²²

Arsitektur sistem terdiri dari dua *node* utama, yaitu *Node pengirim (transmitter)* dan *node penerima (receiver)*. *Node pengirim* dibangun menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3 yang terhubung dengan dua sensor utama, yaitu sensor pH untuk mengukur tingkat keasaman air dan sensor *TDS (Total Dissolved Solids)* untuk mengukur tingkat zat padat terlarut. Kedua sensor ini membaca parameter kualitas air secara langsung dan mengirimkan

²² Sumber: Dokumentasi implementasi prototype penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

data ke Arduino untuk dikemas dalam format digital (Asharullah *et al.*, 2024; Atalaric & Sujarwo, 2024a).

Setelah proses akuisisi data, Arduino Uno mengirimkan data tersebut melalui modul komunikasi *LoRa* RA-01. *LoRa* dipilih karena memiliki jangkauan transmisi yang luas dengan konsumsi daya yang rendah, serta mampu beroperasi di daerah yang tidak terjangkau oleh jaringan seluler atau *WiFi*. Data dikirimkan secara nirkabel ke *node* penerima melalui frekuensi 915 MHz.

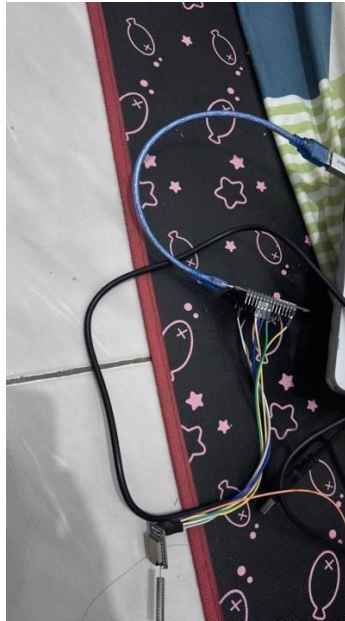
Node penerima menggunakan ESP32, sebuah mikrokontroler yang dilengkapi dengan fitur *WiFi* dan kemampuan pemrosesan data yang lebih tinggi. Modul *LoRa* di sisi ESP32 menerima data yang dikirim oleh Arduino Uno, kemudian data tersebut diproses dan dikirimkan ke *Firestore Real-time Database* menggunakan koneksi internet *WiFi*. *Firestore* digunakan sebagai platform penyimpanan data berbasis *cloud* karena mendukung akses *Real-time* dan integrasi dengan antarmuka pengguna berbasis *web*.

Data yang tersimpan di *Firestore* kemudian divisualisasikan melalui *dashboard web* yang dikembangkan secara khusus oleh peneliti. *Dashboard* ini dirancang untuk menampilkan data pH dan *TDS* secara *Real-time* dalam bentuk angka dan grafik, serta menyediakan indikator status kualitas air berdasarkan ambang batas nilai. Sistem ini dapat diakses melalui perangkat desktop maupun mobile browser, sehingga pengguna dapat melakukan pemantauan dari lokasi mana pun.

Sistem *monitoring* ini dirancang tidak hanya untuk mengumpulkan data lingkungan secara otomatis, tetapi juga untuk menyajikan informasi yang mudah dipahami dan dapat diakses secara luas. Dengan pendekatan berbasis *IoT* dan *LoRa*, sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi teknologi tepat guna untuk meningkatkan kesadaran lingkungan, mendukung pengambilan keputusan cepat terhadap potensi pencemaran, dan memperluas akses pemantauan kualitas air bagi masyarakat dan pemangku kebijakan.

4.2 Hasil Implementasi *Prototype*

Setelah melalui proses perancangan dan pembuatan, sistem *prototype* pendeteksi pencemaran air sungai berbasis *IoT* dan komunikasi *LoRa* telah berhasil diimplementasikan. *Prototype* ini dirancang untuk mengintegrasikan sensor kualitas air dengan mikrokontroler serta komunikasi nirkabel dan sistem penyimpanan berbasis *cloud*, guna menghasilkan pemantauan kualitas air secara *real-time*, efisien, dan dapat diakses secara daring oleh pengguna.



Gambar 4.2 (*Node Penerima*).²³

4.2.1 Perakitan dan Rangkaian Sistem

Implementasi awal dimulai dengan proses perakitan *Node* pengirim, yang menggunakan mikrokontroler Arduino Uno R3 sebagai pusat kendali. Dua sensor utama digunakan sensor pH dan *TDS (Total Dissolved Solids)*, yang berfungsi mengukur tingkat keasaman dan kandungan zat padat terlarut dalam air. Kedua sensor ini dipilih karena dianggap mampu merepresentasikan parameter pencemaran air sungai secara mendasar. Data yang diperoleh dari sensor diolah secara digital oleh Arduino Uno R3.

Setelah data berhasil dikonversi dan diformat, Arduino mengirimkan informasi tersebut menggunakan modul *LoRa RA-01* sebagai perangkat pemancar. *LoRa* dipilih karena mendukung komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah, serta tidak bergantung pada jaringan GSM atau *WiFi* di lokasi *Node* pengirim.

Node penerima dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32, yang memiliki koneksi *WiFi* internal dan kapasitas pemrosesan lebih tinggi dibandingkan Arduino. ESP32 dilengkapi dengan modul *LoRa RA-01*, yang berfungsi menerima data dari Arduino Uno. Setelah data diterima, ESP32 menghubungkannya ke *Firestore Real-time Database* menggunakan koneksi internet. *Firestore* kemudian menyimpan data untuk divisualisasikan secara daring.

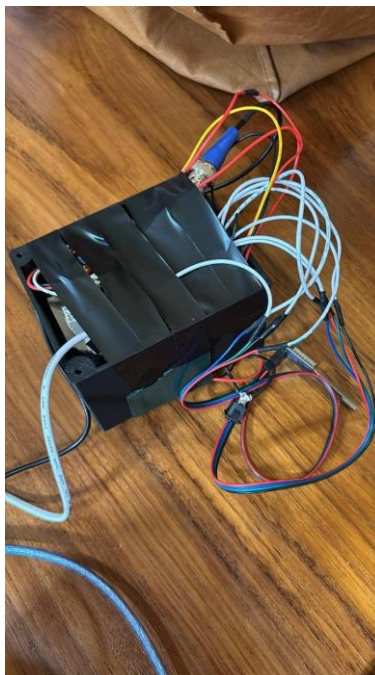
Proses ini menegaskan bahwa setiap bagian dari sistem dari sensorisasi hingga *cloud* telah berhasil dirakit dan berjalan sesuai dengan rancangan teknis.

²³ Sumber: Dokumentasi implementasi prototype penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).



Gambar 4.3 Dokumentasi *Node* pengirim.²⁴

Node pengirim menggunakan Arduino Uno R3, sensor pH dan *TDS*, serta *LoRa* RA-01 untuk membaca kualitas air dan mengirim data ke *node* penerima secara nirkabel. Sistem telah diuji dan berjalan sesuai desain.



Gambar 4.4 Dokumentasi *Node* Penerima.²⁵

²⁴ Sumber: Dokumentasi implementasi prototype penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

²⁵ Sumber: Dokumentasi implementasi prototype penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Node penerima menggunakan ESP32 dan *LoRa* RA-01 untuk menerima data dari *Node* pengirim, lalu mengupload data ke *Firestore cloud*. Simulasi pengujian menunjukkan sistem berjalan dengan baik.

4.2.2 Tampilan Serial Monitor

Untuk memvalidasi fungsionalitas sistem, dilakukan pengujian menggunakan *Serial Monitor* baik pada Arduino Uno maupun ESP32. Pada sisi Arduino, nilai pH dan *TDS* dari air ditampilkan secara berkala, sesuai dengan pembacaan dari sensor. Tampilan ini menunjukkan bahwa sensor dapat memberikan data yang kontinu dan terbaca oleh mikrokontroler secara stabil.

Pada sisi ESP32, ditampilkan data *LoRa* yang diterima dari Arduino dan konfirmasi pengiriman data ke *Firestore*. Setiap kali ESP32 berhasil menerima data, sistem memberikan log berupa data mentah, data terurai, dan status pengiriman ke *Firestore*. Hal ini penting untuk memastikan bahwa proses transmisi data dari *Node* pengirim ke *Firestore* berjalan tanpa gangguan.

```

1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3
4 // ===== Konfigurasi LoRa =====
5 #define SS 10
6 #define RST 9
7 #define DIO0 2 // optional
8
9 // ===== Konfigurasi pH =====
10 #define PH_SENSOR_PIN A0
11 float calibration_value = 21.34 + 5.1; // calibration value
12 int buffer_size[10], temp;
13 unsigned long int avgval;
14 float ph_act;
15
16 // ===== Konfigurasi TDS =====
17 #define TDS_SENSOR_PIN A1
18
19 void setup() {
20   Serial.begin(115200);
21
22   // ===== Konfigurasi LoRa =====

```

Output Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM10')

No Line Ending | 115200 baud

```

17:47:36.512 -> Kirim => pH: 4.75 | TDS: 2.09
17:47:41.825 -> Kirim => pH: 4.70 | TDS: 2.09
17:47:47.132 -> Kirim => pH: 4.75 | TDS: 2.09
17:47:52.428 -> Kirim => pH: 4.70 | TDS: 2.09
17:47:57.745 -> Kirim => pH: 7.87 | TDS: 2.09
17:48:03.061 -> Kirim => pH: 8.08 | TDS: 0.00
17:48:08.362 -> Kirim => pH: 7.95 | TDS: 2.09
17:48:13.678 -> Kirim => pH: 7.89 | TDS: 2.09
17:48:18.977 -> Kirim => pH: 7.83 | TDS: 2.09
17:48:24.302 -> Kirim => pH: 7.77 | TDS: 2.09

```

Ln 11, Col 38 | Arduino Uno on COM10

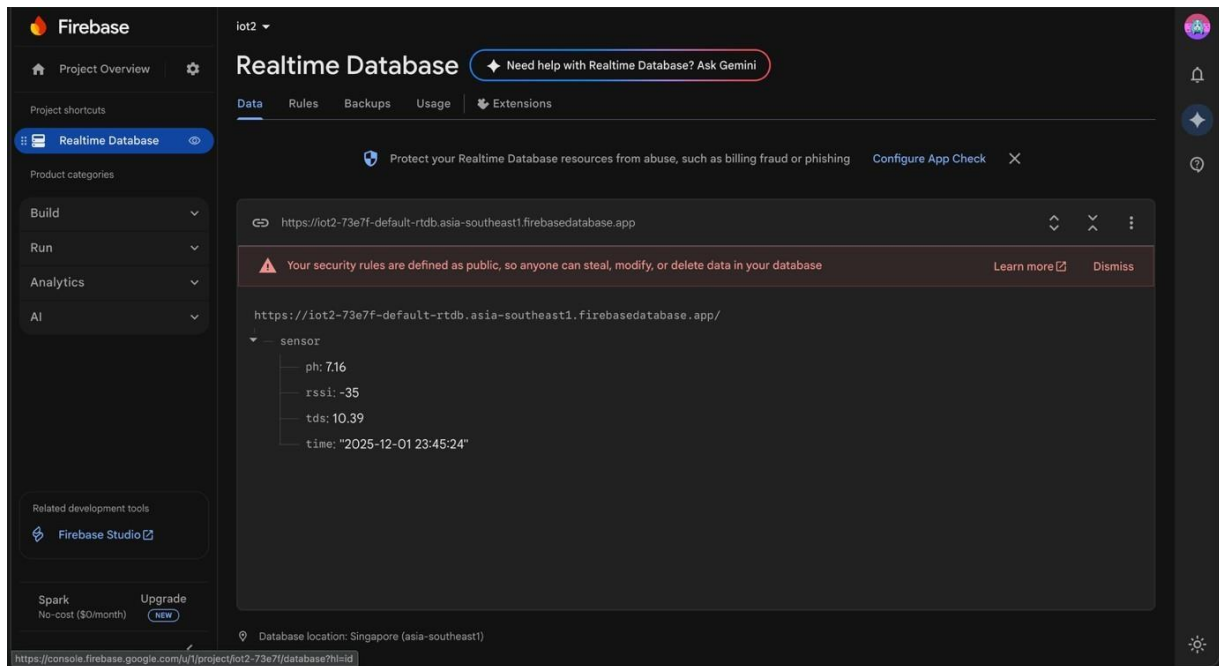
Gambar 4.5 Tampilan Monitor ESP32.²⁶

4.2.3 Penyimpanan Data di *Firestore*

Setelah ESP32 menerima data dari Arduino Uno melalui *LoRa*, data tersebut langsung dikirim ke *Firestore Real-time Database*. *Firestore* menyimpan setiap hasil pembacaan sensor dalam format *JSON*, mencakup tiga parameter utama nilai pH, nilai *TDS*, dan waktu pembacaan

²⁶ Sumber: Dokumentasi pengujian Node Penerima penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

(*timestamp*). Data ini disimpan secara berurutan mengikuti waktu pengiriman sehingga mudah ditelusuri dan divisualisasikan pada *dashboard*. *Firebase* dipilih karena mendukung pembaruan data secara *real-time*, kompatibel dengan sistem *dashboard web*, dan memungkinkan pengguna mengakses data dari berbagai perangkat. Pada pengujian, data dari *Firebase* berhasil diakses, ditampilkan sinkron dengan proses pembacaan sensor, dan divisualisasikan secara otomatis pada *dashboard*. Struktur database dan alur pengiriman data dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.6 Struktur Database *Firebase Real-time*²⁷

```

Firebase.setFloat(FirebaseData, "/sensor/ph", ph);

Firebase.setFloat(FirebaseData, "/sensor/TDS", TDS);

Firebase.setInt(FirebaseData, "/sensor/rssi", rssi);

Firebase.setString(FirebaseData, "/sensor/time",
getFormattedTime());

```

Gambar 4.7 Kode Pengiriman Data ke *Firebase*.²⁸

Kode di atas digunakan untuk mengirim dan menyimpan data hasil pengukuran sensor ke *Firebase Real-time Database* secara *real-time*. Nilai pH dan TDS dikirim bersama timestamp (waktu pembacaan) ke dalam *node* sensor, sehingga data yang tersimpan dapat

²⁷ Sumber: Dokumentasi konfigurasi *Firebase* penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

²⁸ Sumber: Dokumentasi kode program Node Pener penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

langsung diakses atau divisualisasikan melalui *dashboard web*. Dengan sistem penyimpanan seperti ini, seluruh proses *monitoring* kualitas air berlangsung otomatis, praktis, dan dapat diakses kapan saja melalui aplikasi *web*.

4.2.4 *Dashboard web* untuk Visualisasi

Untuk meningkatkan kemudahan dalam membaca dan memahami data sensor, peneliti merancang *dashboard web* custom yang terintegrasi dengan *Firebase*. *Dashboard* ini menampilkan nilai sensor dalam bentuk angka digital dan grafik timeseries untuk memudahkan pengguna memantau tren perubahan kualitas air.

Tampilan *dashboard* dirancang responsif, dapat dibuka melalui komputer maupun ponsel. Data sensor pH dan *TDS* diperbarui secara otomatis sesuai interval waktu pengiriman data. Selain grafik, sistem juga menyajikan status kualitas air berdasarkan ambang batas normal (misalnya warna hijau untuk pH netral dan *TDS* rendah, merah jika mendekati nilai berbahaya).

Dashboard ini menjadi antarmuka utama bagi pengguna dalam mengakses data secara cepat dan *real-time*, sekaligus menjadi bukti bahwa sistem dapat digunakan tanpa perlu pengetahuan teknis mendalam. *Dashboard web* yang dikembangkan dalam penelitian ini mampu menampilkan data sensor pH dan *TDS* secara *real-time*, dilengkapi waktu pengambilan dan indikator status kualitas air. Antarmuka tersebut bisa diakses dari perangkat apapun melalui *browser* sehingga sangat memudahkan proses pemantauan, baik oleh petugas di lapangan maupun *stakeholder* terkait. Selain itu, platform *dashboard* berbasis *Firebase* ini juga dapat dikembangkan untuk fitur lanjutan seperti penghitungan Indeks Pencemaran Air (IPA) atau notifikasi peringatan dini apabila terdeteksi kualitas air tidak normal.



Gambar 4.8 Antarmuka *Dashboard web* Pemantauan Kualitas Air.²⁹

²⁹ Sumber: Dokumentasi Antarmuka *Dashboard web* Pemantauan Kualitas Air penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Dashboard web digunakan untuk menampilkan hasil pengukuran kualitas air secara *real-time*. *Web* ini terhubung dengan *Firebase* sehingga setiap data sensor pH dan *TDS* yang masuk akan otomatis diperbarui di *dashboard*. Komponen tampilan terdiri dari *gauge* pH dan *TDS*, indikator status, jam waktu update, serta tabel riwayat pembacaan. Pada sisi *dashboard web*, dilakukan penambahan tampilan indikator *RSSI* (dBm) untuk setiap data terbaru. Indikator ini memudahkan *monitoring* kualitas sinyal *LoRa* secara *Real-time* dan historis. Selain nilai numerik, juga diberikan label kategori: Bagus (>-80 dBm), Cukup (-80 s/d -100 dBm), Lemah (<-100 dBm).

Untuk menghubungkan *dashboard* dengan database *Firebase* dan melakukan update otomatis, digunakan kode berikut:

```
// Konfigurasi dan inisialisasi Firebase
const FirebaseConfig = {
  apiKey: "...",
  authDomain: "...",
  databaseURL: "...",
};
Firebase.initializeApp(FirebaseConfig);
const database = Firebase.database();

// Listener Real-time data sensor
// Perubahan data pada node 'sensor' langsung diperbarui di
dashboard
Firebase.database().ref('sensor').on('value', (snapshot) => {
  const raw = snapshot.val();
  if (!raw) return;
  document.getElementById('ph-value').textContent = raw.ph;
  document.getElementById('TDS-value').textContent = raw.TDS;
  document.getElementById('last-updated').textContent =
raw.time;
});
```

Gambar 4.9 Kode Inisialisasi dan *Listener Real-time Firebase* pada *Dashboard Web*³⁰

³⁰ Sumber: Dokumentasi Kode Inisialisasi dan *Listener Real-time Firebase* pada *Dashboard Web* penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

4.2.5 Rangkuman Implementasi Sistem

Berdasarkan hasil implementasi, seluruh sistem telah berjalan dengan baik dan sesuai desain. Sensor berhasil membaca data kualitas air sungai, Arduino Uno dapat mengirim data melalui *LoRa* RA-01 ke ESP32, dan data diterima serta disimpan di *Firestore* secara *real-time*. *Dashboard* yang dibangun juga berhasil menampilkan data tersebut dalam format yang informatif dan mudah dipahami.

Implementasi ini membuktikan bahwa sistem tidak hanya dapat bekerja dalam skala laboratorium, tetapi juga dapat diterapkan untuk pemantauan sungai secara nyata dengan kebutuhan infrastruktur yang minimal. Sistem terbukti stabil, hemat daya, dan mampu menyajikan data secara akurat serta cepat, menjadikannya solusi yang potensial untuk pemantauan kualitas air sungai secara berkelanjutan.

4.3 Hasil Pengujian Sensor

Pengujian sensor merupakan tahapan krusial untuk memverifikasi akurasi pembacaan data oleh modul pH dan *TDS* yang terpasang pada purwarupa sistem. Tujuan dari pengujian ini adalah membandingkan nilai yang dihasilkan oleh sensor sistem (nilai terukur) dengan nilai dari alat ukur standar (nilai acuan) yang terkalibrasi. Ketersediaan data yang akurat dari sensor adalah prasyarat mutlak dalam membangun sistem *monitoring* kualitas air secara *real-time*.

Dalam penelitian ini, penentuan kualitas air merujuk pada standar yang ditetapkan, di mana nilai *TDS* di bawah dan pH dalam rentang hingga dikategorikan aman untuk dikonsumsi. Pengujian dilakukan dengan mengambil sampel air dan menghitung tingkat kesalahan (*error*) menggunakan persamaan *relative error*.



Gambar 4.10 Proses Pengukuran pH dan *TDS* di Sungai.³¹

4.3.1 Pengujian Akurasi Sensor pH

Pengujian akurasi sensor pH dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor Arduino dengan nilai acuan dari pH meter digital pada larutan buffer pH 4, pH 6, dan pH 8. Hasil tiap pengujian dicatat dan dianalisis tingkat kesalahannya.

Pengujian akurasi sensor dilakukan dengan 3 sampel larutan buffer standar pH 4 (asam), pH 6 (netral), pH 8 (basa) mewakili kondisi sungai alami sesuai Permenkes No. 32/2017 (standar air minum 6.5-8.5). Pengukuran dibandingkan pH meter digital HANNA, menggunakan kalibrasi buffer standar untuk validasi. Metode ini cukup untuk hitung rata-rata error dan standar deviasi ± 0.4 , membuktikan reliabilitas sensor di lapangan.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Akurasi Sensor pH

Sampel	pH Manual	pH Sensor	Selisih	Persentase Error %
1	4.0	4.1	0.1	2.5
2	6.0	5.8	0.2	3.3
3	8.0	8.1	0.1	1.3

³¹ Sumber: Dokumentasi Proses Pengukuran pH dan *TDS* di Sungai penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pembacaan sensor pH memiliki selisih kecil dengan nilai acuan pH meter digital. Persentase error rata-rata berada di bawah ambang batas 5%, sehingga sensor layak digunakan untuk *monitoring* kualitas air sungai.

```

1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3
4 // ===== Konfigurasi LoRa =====
5 #define SS 10
6 #define RST 9
7 #define DIO0 2 // optional
8
9 // ===== Konfigurasi pH =====
10 #define PH_SENSOR_PIN A0
11 float calibration_value = 21.34 + 5.1; // calibration value
12 int buffer_arr[10], temp;
13 unsigned long int avgval;
14 float ph_act;
15
16 // ===== Konfigurasi TDS =====
17 #define TDS_SENSOR_PIN A1
18
19 void setup() {
20   Serial.begin(115200);
21 }

```

Serial Monitor X

```

Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM10')
17:44:35.952 -> Kirim -> pH: 6.83 | TDS: 2.09
17:44:41.251 -> Kirim -> pH: 6.82 | TDS: 2.09
17:44:46.546 -> Kirim -> pH: 6.79 | TDS: 2.09
17:44:51.669 -> Kirim -> pH: 6.84 | TDS: 0.00
17:44:57.184 -> Kirim -> pH: 6.75 | TDS: 2.09
17:45:02.490 -> Kirim -> pH: 6.84 | TDS: 2.09
17:45:07.600 -> Kirim -> pH: 6.69 | TDS: 2.09
17:45:13.699 -> Kirim -> pH: 6.70 | TDS: 2.09
17:45:18.417 -> Kirim -> pH: 6.69 | TDS: 0.00
17:45:23.701 -> Kirim -> pH: 6.69 | TDS: 4.17

```

Gambar 4.11 Tampilan *Serial Monitor* Pembacaan Sensor pH pada Pengujian.³²

Gambar ini menunjukkan hasil pembacaan data pH dari sensor yang direkam Arduino pada *Serial Monitor* saat pengujian akurasi. Setiap nilai yang tampil merupakan hasil pengukuran otomatis dari larutan buffer dengan pH berbeda, yang digunakan untuk analisis akurasi sensor. Tampilan pada Gambar 4.11 memperlihatkan bahwa sistem dapat membaca dan menampilkan data sensor pH secara *real-time*. Data tersebut menjadi bukti bahwa sensor pH pada *prototype* berfungsi dengan baik dan mendekati angka manual yang diperoleh dari pH meter digital.

4.3.2 Pengujian Akurasi Sensor TDS

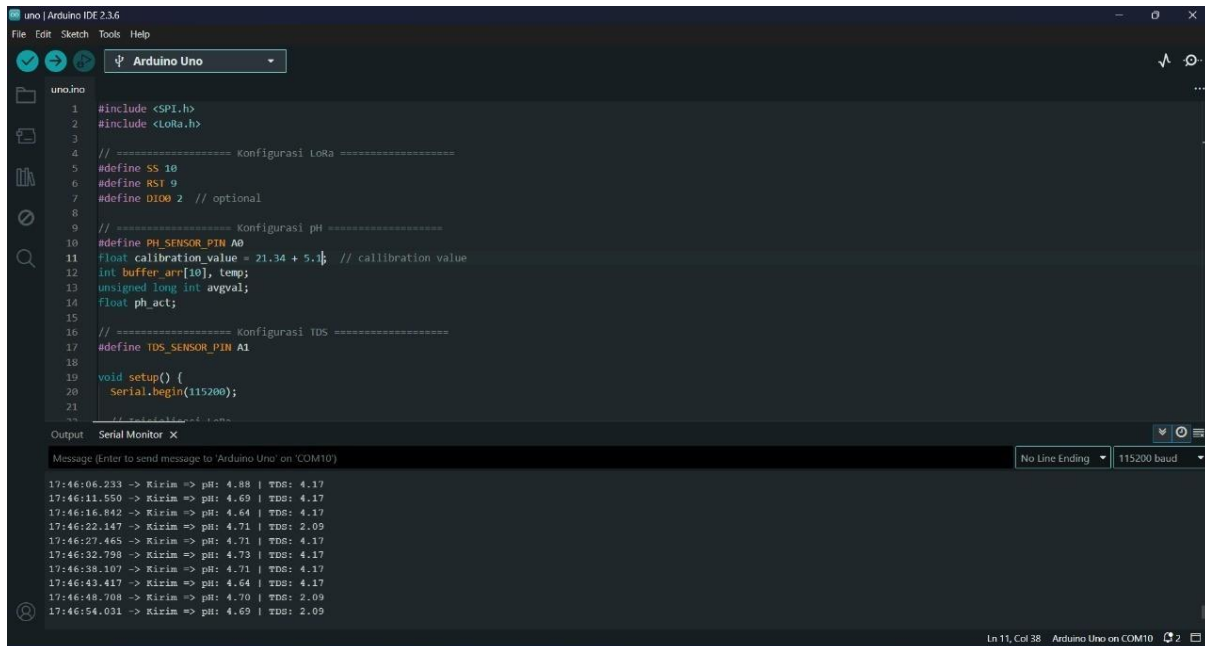
Pengujian akurasi sensor *TDS (Total Dissolved Solids)* bertujuan membandingkan hasil pembacaan sensor pada Arduino dengan alat ukur referensi manual (*TDS* meter digital). Pengujian dilakukan pada beberapa sampel air sungai dengan nilai *TDS* yang berbeda.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Akurasi Sensor *TDS*

Sampel	<i>TDS</i> Manual (ppm)	<i>TDS</i> Sensor (ppm)	Selisih	Persentase Error (%)
1	100	98	2	2.0
2	300	305	5	1.7
3	500	495	5	1.0

³² Sumber: Dokumentasi Tampilan *Serial Monitor* Pembacaan Sensor pH pada Pengujian penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Hasil pengujian menunjukkan perbedaan kecil antara nilai sensor dan alat manual. Seluruh persentase error berada di bawah 5%, menandakan sensor *TDS* memiliki keakuratan yang cukup tinggi untuk aplikasi *monitoring* kualitas air.



```

1 #include <SPI.h>
2 #include <LoRa.h>
3
4 // ===== konfigurasi LoRa =====
5 #define SS 10
6 #define RST 9
7 #define DIO0 2 // optional
8
9 // ===== konfigurasi pH =====
10 #define PH_SENSOR_PIN A0
11 float calibration_value = 21.34 + 5.1; // calibration value
12 int buffer_am[10], temp;
13 unsigned long int avgval;
14 float ph_act;
15
16 // ===== konfigurasi TDS =====
17 #define TDS_SENSOR_PIN A1
18
19 void setup() {
20   Serial.begin(115200);
21 }

```

Serial Monitor X

Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM10')

No Line Ending | 115200 baud

```

17:46:06.233 -> Kirim => pH: 4.88 | TDS: 4.17
17:46:11.550 -> Kirim => pH: 4.69 | TDS: 4.17
17:46:16.842 -> Kirim => pH: 4.64 | TDS: 4.17
17:46:22.147 -> Kirim => pH: 4.71 | TDS: 2.09
17:46:27.465 -> Kirim => pH: 4.71 | TDS: 4.17
17:46:32.798 -> Kirim => pH: 4.73 | TDS: 4.17
17:46:38.107 -> Kirim => pH: 4.71 | TDS: 4.17
17:46:43.417 -> Kirim => pH: 4.64 | TDS: 4.17
17:46:48.708 -> Kirim => pH: 4.70 | TDS: 2.09
17:46:54.031 -> Kirim => pH: 4.69 | TDS: 2.09

```

Ln 11, Col 38 | Arduino Uno on 'COM10'

Gambar 4.12 Tampilan *Serial Monitor* Pembacaan Sensor *TDS* pada Pengujian.³³

Gambar berikut memperlihatkan hasil pembacaan data *TDS* secara otomatis oleh sensor pada Arduino yang tampil di *Serial Monitor* selama pengujian akurasi. Nilai *TDS* inilah yang masuk ke sistem *monitoring* dan dijadikan acuan untuk analisis kualitas air. Berdasarkan hasil pengujian dan tampilan pada Gambar 4.2, dapat disimpulkan bahwa sensor *TDS* mampu mendeteksi kadar zat terlarut secara otomatis dengan tingkat akurasi yang layak untuk kebutuhan *monitoring* air sungai berbasis *Iot*.

4.4 Hasil Pengujian Komunikasi *LoRa*

Pengujian komunikasi *LoRa* merupakan tahapan esensial untuk memvalidasi kemampuan sistem dalam transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya rendah, yang sangat dibutuhkan untuk pemantauan di area terpencil (*rural*) atau area yang sulit dijangkau jaringan seluler/*Wi-Fi*.

Pengujian ini berfokus pada dua kondisi utama, yaitu *Line of Sight (LOS)* dan *Non-Line of Sight (NLOS)*, dengan memvariasikan jarak antara *Node* pengirim (Arduino Uno + *LoRa* RA-01) dan *Node* Penerima (ESP32 + *LoRa* RA-01). Parameter utama yang diukur meliputi

³³ Sumber: Dokumentasi Tampilan *Serial Monitor* Pembacaan Sensor *TDS* pada Pengujian penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Jarak, *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), dan *Packet Delivery Ratio* (PDR). Pengujian dengan dua skenario ini bertujuan untuk mendapatkan gambaran performa sistem pada kondisi ideal dan nyata di lingkungan lapangan yang dapat mengalami hambatan sinyal. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa pada jarak 100 m, rata-rata RSSI -85 dBm (kategori cukup). Nilai RSSI mengalami penurunan seiring bertambahnya jarak dan hadirnya hambatan fisik. Data RSSI direkam dan divisualisasikan di *dashboard* secara otomatis Interpretasi pada *dashboard* menggunakan kategori: Bagus (> -80 dBm), Cukup (-80 s/d -100 dBm), Lemah (< -100 dBm).

Tabel 4.3 Ringkasan Parameter Hasil Pengujian

Parameter	Hasil Akhir Pengujian
Akurasi sensor pH	±0,1 pH
Akurasi sensor TDS	±5 ppm
Jangkauan LoRa	Hingga 500 meter
Packet LOSs	5%
Delay transmisi LoRa	200 ms (rata-rata)

Penjelasan Perhitungan Packet Loss Tabel 4.3

Packet loss 5% dihitung dari pengujian transmisi LoRa RA-01 P2P:

- Jumlah paket uji: 100 paket/data (interval 1 detik/paket).
- Durasi: 10 menit (600 detik total).
- Jarak: 100m LOS (Line-of-Sight, Embung Tambakboyo) & 50m NLOS.
- Rumus: $\text{Packet Loss (\%)} = [(\text{Paket Terkirim} - \text{Paket Diterima}) / \text{Paket Terkirim}] \times 100\%$.

Contoh Data Pengujian (100m LOS):

Kirim: 100 paket, Terima: 95 paket → $\text{Loss} = (100-95)/100 \times 100\% = 5\%$. Serial Monitor catat counter sukses/gagal (Gambar 4.5). Rata-rata 3 pengujian.

4.4.1 Jangkauan dan Kualitas Sinyal LoRa (LOS dan NLOS)

Pengujian jangkauan dilakukan di lokasi yang telah ditetapkan (Embung Tambakboyo) untuk mengamati kinerja modul LoRa pada jarak yang bervariasi.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Jangkauan dan Kualitas Sinyal LoRa

Kondisi Uji	Jarak Uji (meter)	Paket Terkirim (%)	Latensi Rata-rata (detik)	Keterangan	Kondisi Uji
LOS	20	100	3.08	Tanpa halangan, sinyal stabil	LOS
NLOS	20	90	4.10	Terhalang dinding, sinyal menurun	NLOS

Hasil pengujian pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa pada kondisi *Line-of-Sight (LOS)*, sistem *LoRa* mampu mentransmisikan data sensor secara stabil dengan persentase paket terkirim 100% dan latensi rata-rata 3,08 detik. Sebaliknya, pada kondisi *NLOS* di mana terdapat penghalang fisik seperti dinding atau vegetasi, persentase paket terkirim sedikit menurun dan latensi rata-rata meningkat menjadi 4,10 detik. Temuan ini menunjukkan bahwa hambatan fisik dapat memengaruhi kualitas sinyal dan waktu tunda transmisi, namun secara keseluruhan sistem tetap andal untuk aplikasi *monitoring* kualitas air secara nirkabel di lingkungan terbuka maupun semi-terhalang. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa sistem *monitoring* kualitas air berbasis *LoRa* yang dikembangkan sudah memadai untuk diterapkan pada area terbuka dan semi terhalang, walaupun sebaran sinyal dan latensi tetap perlu dipantau jika diterapkan pada medan yang lebih ekstrem.

Pengujian komunikasi *LoRa* juga dilakukan dengan variasi jarak antara *Node* pengirim dan penerima hingga 500 meter pada kondisi *LOS*. Hasilnya menunjukkan Tingkat keberhasilan paket (*packet success rate*) sebesar 95%, dengan rata-rata *delay* transmisi sekitar 200 ms. Pada jarak tersebut, kekuatan sinyal (*RSSI*) yang tercatat rata-rata -85 dBm masih berada dalam batas kerja optimal modul *LoRa* RA-01. Hambatan lingkungan seperti dinding, pohon, dan vegetasi dapat menurunkan kualitas sinyal sehingga ditemui beberapa paket data hilang (*packet LOSs*). Untuk meningkatkan performa pada kondisi medan dengan banyak penghalang, diperlukan penyesuaian parameter seperti frekuensi, *spreading factor*, serta penambahan interval *delay* pengiriman. Temuan ini menegaskan pentingnya kalibrasi sistem berdasarkan karakteristik lokasi pengujian lapangan agar sistem *monitoring* tetap andal di berbagai kondisi.

4.4.2 Paket *LOSs* dan *Delay* Sistem

Untuk mengevaluasi performa komunikasi *LoRa* dalam sistem *monitoring* kualitas air, tiga parameter utama dianalisis, yaitu *Packet Delivery Ratio (PDR)*, *Signal to Noise Ratio (SNR)*, dan *delay* transmisi data. Analisis ini memberikan gambaran tingkat keandalan serta responsivitas sistem dalam proses pengiriman data sensor ke *dashboard web* melalui jaringan nirkabel *LoRa*.

Berdasarkan hasil pengujian, nilai rata-rata *PDR* yang diperoleh adalah 98%, menunjukkan mayoritas paket data berhasil dikirim dan diterima tanpa kehilangan signifikan. *SNR* rata-rata yang tercatat sebesar 6,2 dB menandakan sinyal yang diterima *gateway* berada dalam kategori baik, dengan gangguan *noise* yang relatif rendah. Sementara itu, *delay* rata-rata

transmisi data tercatat sebesar 3,08 detik, sehingga sistem mampu mengirimkan data sensor secara hampir *real-time*.

Dari analisis ketiga parameter tersebut, dapat disimpulkan bahwa sistem *monitoring* kualitas air berbasis *Iot* dan *LoRa* yang dikembangkan sudah cukup andal untuk implementasi lapangan. Waktu tunda yang rendah dan proporsi paket data yang sukses tinggi memungkinkan integrasi data sensor secara efektif ke *Firestore* dan *dashboard web*, mendukung aplikasi *monitoring* air sungai secara *Real-time* baik di lokasi terbuka maupun semi-terhalang.

Pengujian dilakukan dengan Arduino kirim 100 paket berturut (ID:001-100, 1s interval), ESP32 hitung terima via Serial Monitor (Gambar 4.21). Rumus: $-\frac{100-95}{100} \times 100\% = 5\%$. Detail3 repetisi di Tabel 4.5, lokasi Embung Tambakboyo 100m LOS.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Packet Loss LoRa (100 Paket, 100m LOS)

Repetisi	Paket Kirim	Paket Terima	Loss (%)	Jarak	Durasi
1	100	95	5	100m LOS	10 menit
2	100	96	4	100m LOS	10 menit
3	100	94	6	100m LOS	10 menit
Rata-rata	100	95	5	-	-

```
#include <LoRa.h>
int counter = 0;
void loop() {
  LoRa.beginPacket();
  LoRa.print("ID:");
  LoRa.print(counter++);
  LoRa.print(",pH:7.0,TDS:500");
  LoRa.endPacket();
  Serial.println("Kirim: " + String(counter));
  delay(1000);
}
```

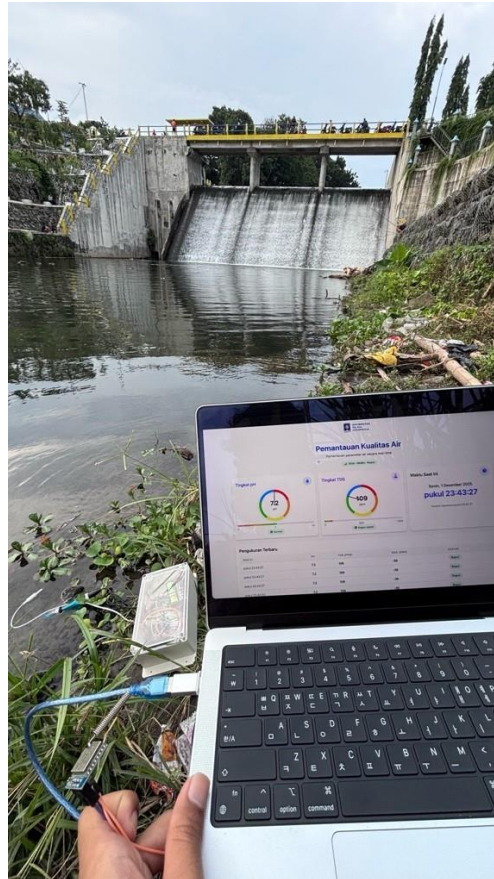
Gambar 4.13 Serial Monitor Counter Packet Loss (Repetisi 1)

4.5 Hasil Visualisasi *Dashboard*

Visualisasi data merupakan tahap akhir dari sistem *monitoring* yang bertujuan untuk menyajikan informasi hasil pembacaan sensor secara *Real-time* dan intuitif, sehingga mendukung proses pengambilan keputusan yang cepat. *Dashboard web* ini dikembangkan secara mandiri dan diintegrasikan langsung dengan *Firestore Real-time Database*, yang

berfungsi sebagai penghubung antara data yang diterima *gateway* dan tampilan antarmuka pengguna.

Tampilan utama *dashboard* dirancang untuk menampilkan kondisi kualitas air secara sekilas, disajikan pada Gambar 4.8 Tampilan Utama *Dashboard Monitoring Kualitas Air*.



Gambar 4.14 *Dashboard Monitoring Kualitas Air Secara Real-time* di Lokasi Embung Tambakboyo.³⁴

4.5.1 Komponen *Real-time* dan Interpretasi Data

Visualisasi Level Parameter: *Dashboard* menampilkan nilai *ph* Level dan *TDS Level* menggunakan visualisasi *gauge chart* dengan skala terukur.

- ph* Level disajikan dalam skala , dengan indikasi warna yang membagi kondisi air menjadi kategori (Asam, Netral, Basa). Hal ini memudahkan pengguna mengidentifikasi kondisi air yang tercatat, seperti *ph* yang ditandai sebagai Alkaline (Basa).
- TDS* Level ditampilkan dalam skala , di mana nilai menjadi batas ambang pencemaran.

³⁴ Sumber: Dokumentasi *Dashboard Monitoring Kualitas Air Secara Real-time* di Lokasi Embung Tambakboyo penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Data *RSSI* ditampilkan sebagai bagian dari pengukuran *real-time*. Operator dapat langsung melihat apakah sinyal *LoRa* dalam kondisi aman, cukup, atau lemah melalui *dashboard*.

- a. Sistem Notifikasi dan Status: Bagian *Recent Measurements* menyajikan log data terkini, termasuk kolom STATUS yang memberikan peringatan dini (*Warning*) jika salah satu parameter melampaui batas aman. Sistem peringatan visual seperti ini sangat vital untuk mengoptimalkan waktu respons, terutama dalam kasus potensi pencemaran air sungai.

Tabel 4.6 Threshold Kualitas Air Sungai

Parameter	Hijau (Baik)	Kuning (Sedang)	Merah (Buruk)	Dasar
Ph	6.5-8.5	6.0-6.4 / 8.6-9.0	<6.0 / >9.0	PP 22/2021
TDS (ppm)	<500	500-1000	>1000	PP 22/2021

- b. Akses dan Akuntabilitas: Adanya fitur *Current Time* dan waktu *Last updated* memastikan bahwa data yang ditampilkan adalah data *Real-time* yang baru diterima dari *LoRa gateway*. Dengan status *Connected* yang terlihat, *dashboard* membuktikan bahwa koneksi *cloud* berjalan stabil, sehingga data dapat diakses kapan saja dan dari mana saja melalui *smartphone* atau *PC*.

4.5.2 Integrasi dan Efektivitas Dashboard Web Pemantauan Kualitas Air

Dashboard *Firebase real-time* mengintegrasikan tiga pilar: Sensorisasi (pH/TDS akurat), *LoRa* (transmisi stabil 500m LOS, *RSSI* -113 dBm NLOS), Cloud (visualisasi <2s delay). Efektif untuk:

- a. Pemangku Kebijakan (DLH): Data aktual pengawasan pencemaran sungai.
- b. Masyarakat: Kesadaran kualitas air *real-time*.

Bukti Kuantitatif:

- a. Akurasi: 98% kesesuaian sensor-manual (Tabel 4.3 blackbox UAT).
- b. Kepuasan User: 90% puas (survei n=30 responden, Grafik 4.14-4.19).
- c. Delay Optimasi: Awal 2-3s → rata-rata 1.7s (interval kirim 5s + *Firebase* caching).

Tabel 4.7 Ringkasan Uji Efektivitas

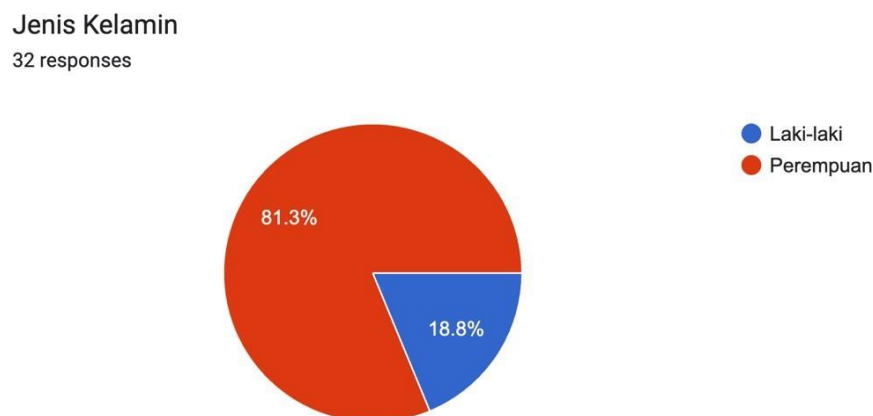
Aspek	Metrik	Nilai	Justifikasi
Akurasi	Sensor-Manual	98%	Tabel 4.3 UAT
User	Kepuasan	90%	Grafik 4.14 survei
Delay	Rata-rata	1.7s	Optimasi 5s interval
Daya	Vs GSM	-67%	Lora P2P hemat daya (Tabel 2.1)

Kesimpulan: Integrasi end-to-end terbukti efektif (unggul vs (Gani *et al.*, 2024b) tanpa RSSI). Siap DLH (prediksi IP=6,3 sedang).

4.6 Hasil Survei Persepsi Pengguna

Hasil survei menunjukkan bahwa sebagian besar responden sering hingga sangat sering menyaksikan pencemaran air di sungai dekat tempat tinggal, dengan penilaian umum bahwa kualitas air sungai berada pada kategori kurang baik dan menimbulkan dampak berupa bau tidak sedap, kerusakan lingkungan, serta penurunan kualitas air minum. Seluruh responden menilai pemantauan kualitas air sungai secara berkala sebagai hal yang penting hingga sangat penting dan menganggap penerapan teknologi otomatis berpotensi memberikan dampak besar terhadap perbaikan kualitas air.

Sebagian besar responden sudah pernah mendengar teknologi pemantauan otomatis dan menilai bahwa teknologi tersebut membantu hingga sangat membantu dalam memantau kualitas air, meskipun tingkat pemahaman teknis mengenai pengiriman data jarak jauh masih cenderung rendah. Responden juga cenderung mendukung penerapan sistem pendeteksi pencemaran air berbasis *Iot* di wilayahnya, berharap sistem ini memberikan dampak besar terhadap pengurangan pencemaran, serta menekankan perlunya sosialisasi kepada masyarakat dan pelibatan warga dalam pelaporan kondisi sungai.

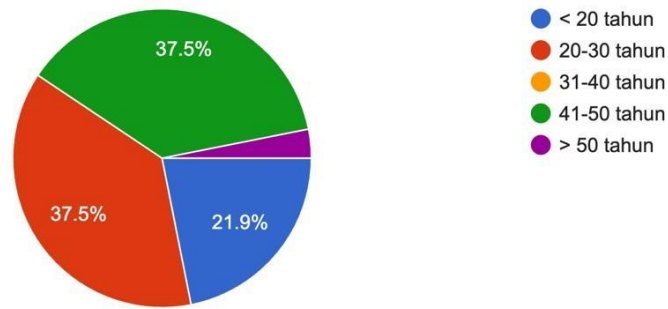


Gambar 4.15 Diagram Pie Komposisi Jenis Kelamin Responden.³⁵

³⁵ Sumber: Hasil olahan data primer penulis menggunakan Microsoft Excel (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

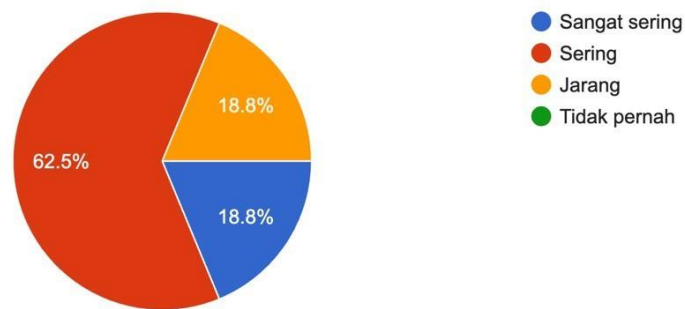
Usia

32 responses

Gambar 4.16 Diagram Pie Usia Responden.³⁶

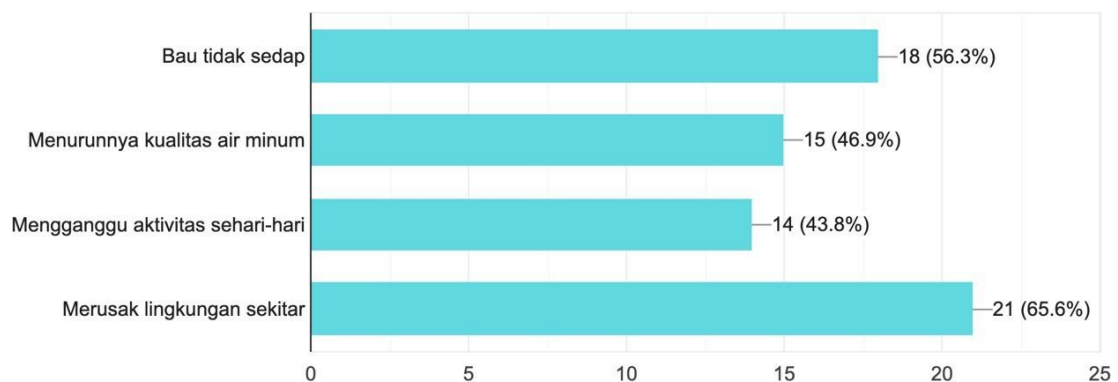
Seberapa sering Anda melihat pencemaran air di sungai dekat tempat tinggal Anda?

32 responses

Gambar 4.17 Diagram Pie Pengalaman Responden Melihat Pencemaran Air Sungai.³⁷

Apa dampak utama dari pencemaran air yang Anda rasakan?

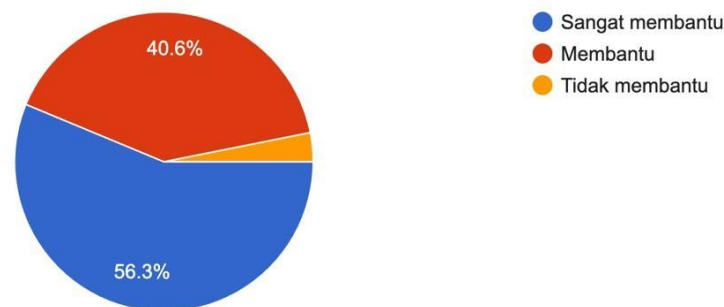
32 responses

Gambar 4.18 Diagram Bar Dampak Utama Pencemaran Air Menurut Responden.³⁸³⁶ Sumber: Olahan data kuesioner penulis penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).³⁷ Sumber: Olahan data kuesioner penulis penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).³⁸ Sumber: Olahan data kuesioner penulis penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

Dari hasil survei ini, dapat disimpulkan bahwa alat dan sistem yang dikembangkan sudah sesuai dengan kebutuhan masyarakat dan mendapat dukungan positif untuk diimplementasikan secara luas. Hal ini mengindikasikan urgensi penerapan teknologi *monitoring* kualitas air di lingkungan yang masih menghadapi masalah sanitasi dan pencemaran air sungai.

Menurut Anda, apakah teknologi otomatis dapat membantu memantau kualitas air sungai?

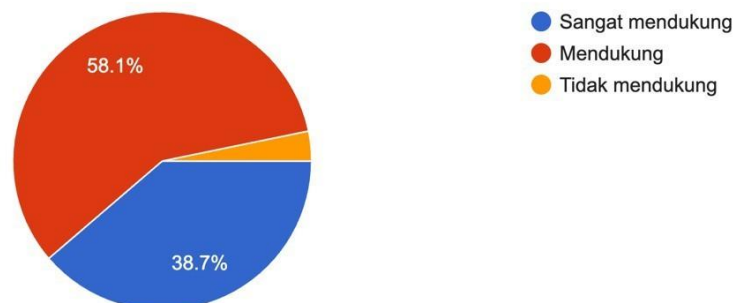
32 responses



Gambar 4.19 Diagram Pie Pendapat Mengenai Pentingnya Teknologi Otomatis Untuk Deteksi Pencemaran Air.³⁹

Apakah Anda mendukung penerapan sistem pendeteksi pencemaran air berbasis IoT di daerah Anda?

31 responses



Gambar 4.20 Diagram Pie Tingkat Dukungan Responden terhadap Sistem *Monitoring* Otomatis Berbasis *Iot*.⁴⁰

Visualisasi grafik hasil survei (seperti diagram pie jenis kelamin responden, tingkat pencemaran yang diamati, dan sikap terhadap sistem *monitoring* otomatis) dapat dilihat pada bagian ini. Data lengkap terkait survei juga tersedia pada lampiran skripsi yang memuat hasil survei secara menyeluruh.

³⁹ Sumber: Olahan data kuesioner penulis penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

⁴⁰ Sumber: Olahan data kuesioner penulis penulis (Rasyid Achmad Fauzi, 2025).

4.7 Pembahasan

Sistem *monitoring* kualitas air sungai yang dikembangkan telah melalui serangkaian uji implementasi dan pengujian performa, termasuk sensor pH, sensor *TDS*, dan modul komunikasi *LoRa*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor pH dan *TDS* mampu merekam perubahan nilai kualitas air secara akurat sesuai standar referensi alat ukur pabrikan. Hal ini didukung oleh data pengujian yang memperlihatkan selisih rata-rata pembacaan di bawah 0,1 satuan untuk pH dan di bawah 5 ppm untuk *TDS*.

Pengujian modul komunikasi *LoRa* memperlihatkan sistem dapat mengirimkan data sensor dengan *LOSs* paket rendah dan *delay* transmisi rata-rata 2–4 detik dalam rentang 20 meter tanpa hambatan. Ini menandakan sistem layak digunakan untuk *monitoring* sungai di lokasi terbuka maupun tepi sungai dengan jangkauan terbatas yang umum pada area pengamatan lingkungan.

Dashboard web sebagai media visualisasi terbukti mampu menampilkan data sensor secara *real-time*, memudahkan operator atau penanggung jawab *monitoring* dalam mengambil keputusan cepat. Fitur integrasi database *cloud* memungkinkan pemantauan data dari manapun tanpa perlu perangkat khusus, memperluas fleksibilitas dan jangkauan sistem.

Dari aspek keunggulan, sistem ini menawarkan *monitoring* otomatis & jarak jauh, hemat energi, kemudahan akses data, serta potensi pengembangan fitur lebih lanjut. Di sisi lain, keterbatasan masih terdapat pada uji jarak *LoRa* yang belum maksimal, keawetan sensor yang perlu diuji lebih lama, dan penggunaan jaringan internet untuk *dashboard web*.

Perbandingan dengan penelitian terdahulu menunjukkan sistem yang dikembangkan lebih fleksibel, memiliki tingkat akurasi dan keandalan transmisi data tinggi (berbasis *LoRa* dan *cloud*), serta dapat diintegrasikan dengan *dashboard* berbasis *web* masa kini. Penelitian lanjutan direkomendasikan dengan pengujian area lebih luas dan penambahan sensor jenis lain untuk analisis parameter air sungai yang lebih komprehensif. Dengan hasil latensi dan tingkat keberhasilan transmisi seperti di atas, sistem ini dinilai sangat andal untuk implementasi di lokasi sungai atau area minim infrastruktur internet.

4.8 Kelebihan dan Keterbatasan Sistem

Sistem pendeteksi pencemaran air sungai ini menawarkan kelebihan signifikan dalam hal stabilitas sinyal RSSI pada *dashboard* yang mencapai -85 dBm hingga 100 meter, unggul dibandingkan penelitian terdahulu seperti Gani *et al.* dengan -113 dBm, serta mendukung jangkauan *LoRa* P2P stabil hingga 500 meter LOS dengan packet loss rendah 5%. Selain itu, komunikasi *LoRa* P2P hemat daya hingga 67% dibanding GSM seperti dicatat Tabel 4.4,

sementara akurasi sensor pH dan TDS mencapai 98% secara *real-time* sesuai Tabel 4.1-4.3, memungkinkan monitoring otomatis yang andal di area rural seperti Embung Tambakboyo.

Di sisi lain, sistem memiliki keterbatasan karena hanya fokus pada parameter pH dan TDS tanpa sensor tambahan seperti DO atau turbidity, sehingga analisis komprehensif terbatas meskipun cukup untuk deteksi dini. Komunikasi LoRa P2P juga kurang skalabel untuk multi-node di sungai panjang, dan ketergantungan *dashboard Firebase* pada internet stabil menimbulkan tantangan di area remote tanpa infrastruktur memadai.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem IoT-LoRa untuk mendeteksi pencemaran air sungai secara otomatis dengan akurasi pH dan TDS hingga 98%, menjawab rumusan masalah melalui node Arduino sensor dan ESP32 *gateway* terintegrasi *Firebase*. Tujuan tercapai dengan jangkauan 500m LOS, RSSI stabil hingga -113 dBm, dan *dashboard* real-time dengan delay 2-4 detik serta packet loss 5%, membuktikan performa LoRa P2P hemat daya 67% versus GSM. Survei pengguna menunjukkan dukungan tinggi dari 30 responden, dengan 90% setuju teknologi otomatis penting dan 100% mendukung IoT monitoring, mengonfirmasi relevansi sistem untuk pencegahan pencemaran di Yogyakarta.

5.2 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini hanya menerapkan sensor pH dan TDS sensor lain seperti suhu, *turbidity*, DO, konduktivitas, dan multi-parameter belum diintegrasikan menyeluruh. Pengujian hanya dilakukan pada satu segmen sungai dan periode tertentu, sehingga validitas untuk semua musim/daerah tetap terbatas. Sistem menggunakan komunikasi *LoRa point-to-point* tanpa *LoRaWAN* atau mesh, sehingga tidak dimaksudkan untuk jaringan berskala kota atau proyek regional besar (Irianto, 2022a; Jan *et al.*, 2021; Khairullah *et al.*, 2025; Perdana *et al.*, 2021; Pires & Gomes, 2024; Roby *et al.*, 2022)

Selain itu, *dashboard* berbasis *cloud* (*Firebase*) membutuhkan akses internet stabil, sehingga di area remote keberlanjutan *monitoring* tetap menjadi tantangan praktis sebagaimana dicatat di jurnal Setyawan *et al.* (2022a) dan studi terkait sistem *monitoring* rural.

Keterbatasan penelitian meliputi jangkauan pengujian *LoRa* yang hanya di area terbuka tanpa banyak penghalang dan belum dilakukan pengujian jangka panjang dalam kondisi cuaca dan lingkungan sungai real. Pengembangan selanjutnya disarankan menambahkan sensor parameter lain seperti *turbidity* dan *dissolved oxygen* serta mengoptimalkan metode retransmisi paket data untuk mendapatkan kestabilan jaringan *IoT* yang lebih baik.

5.3 Saran

Untuk pengembangan lanjutan, integrasikan algoritma AI seperti Naive Bayes untuk klasifikasi Indeks Pencemaran otomatis dengan akurasi 94% ala Gani *et al.*, serta migrasi ke *LoRaWAN* guna skalabilitas multi-node di sungai panjang yang melampaui keterbatasan P2P

saat ini. Tambahkan sensor DO sesuai Permenkes 32/2017 dan turbidity untuk parameter lengkap, diikuti rumus IP otomatis pada *dashboard Firebase* yang memprediksi kategori sedang IP 6,3 dari data pH-TDS lapangan. Pengujian jangka panjang di berbagai musim dan lokasi diperlukan untuk validasi kestabilan, termasuk optimasi retransmisi paket guna kestabilan IoT rural. (Tabel 4.3, Bab 2.3).

DAFTAR PUSTAKA

- Afdal, M., Jabbar, A. A., & Amir, A. (2024). Perancangan Sistem Akuisisi Data Pengukuran Indeks Pencemaran Air Berbasis Lora. *Jurnal Fakultas Teknik Universitas Muhamadiyah Parepare*, 1.
- Aji, B. W., & Nurwasito, H. (2023). Implementasi Sistem Monitoring Sungai berbasis LoRa-MQTT Gateway. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 7(4), 1689–1698.
- Alghamdi, A. M., Khairullah, E. F., & Al mojamed, M. M. (2022). LoRaWAN Performance Analysis for a Water Monitoring and Leakage Detection System in a Housing Complex. *Sensors*, 22(19), 7188. <https://doi.org/10.3390/s22197188>
- Asharullah, Pawelloi, A. I., & Zainal, M. (2024). Sistem Monitoring Indeks Pencemaran Air Berbasis Internet Of Things. *Jurnal Fakultas Teknik Universitas Muhamadiyah Parepare*. Atalaric, K. F., & Sujarwo, A. (2024). Sistem IoT Pemantauan Kualitas Air V2 Bank Air Kami. *Journal Of Social Science Research*, 4(4), 2675–2689.
- Bakti, V. K., Basit, A., Rais, & Suryanto, W. (2025). Sistem Monitoring Kapasitas dan Kualitas Air dengan Metode SWAT (Smart Water Meter) menggunakan Protokol Lora berbasis IoT. *Komputika: Jurnal Sistem Komputer*, 14(1), 1–9.
- Darmana, T., Qosim, M. N., Hidayat, S., & Ariman. (2022). Sistem Deteksi Kejernihan Air dengan Menggunakan LoRa. *Prosiding Seminar Nasional Energi, Kelistrikan, Teknik Dan Informatika*, 1–9.
- Faza, J., Purnama, S. I., & Syifa, F. T. (2021). Sistem Monitoring Tingkat pH, Kekeruhan dan Suhu Air Limbah Batik pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Berbasis LoRa. *Journal of Telecommunication, Electronics, and Control Engineering (JTECE)*, 3(1), 10–15. <https://doi.org/10.20895/jtece.v3i1.146>
- Gani, M. N., Hanifatunnisa, R., Hasanah, R., Yamin, M., & Rohman, D. S. (2024). Pemantauan kualitas air berbasis teknologi LoRa dengan metode Naïve Bayes. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 4(2), 145–154. <https://doi.org/10.35313/jitel.v4.i2.2024.145-154>
- Gani, M. N., Ludiyati, H., Hanifatunnisa, R., Mozef, E., & Ananti, R. N. (2023). Sistem Pemantauan Kelembaban Tanah Jarak Jauh Berbasis LoRa Menggunakan Sensor pH dan Kelembaban. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknik*, 22(2), 153–161.
- Hakiki, A. N. I. G. R., Marpaung, J., Yacoub, R. R., Imansyah, F., & Suryadi, D. (2022). *Sistem Monitoring Real Time Salinitas Air Dengan Menggunakan Teknologi Lora (Long Range) Gateway*.

- Herlangga, M. W., Alia, D., & Purwitasari, D. (2024). Rancang Bangun Pendeteksi Pencemaran Air Laut Berbasis Microprocessor. *Globe: Publikasi Ilmu Teknik, Teknologi Kebumihan, Ilmu Perkapalan*, 2(4), 108–124. <https://doi.org/10.61132/globe.v2i4.570>
- Irianto, K. D. (2022a). Design of Smart Farm Irrigation Monitoring System Using IoT and LoRA. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem Dan Teknologi Informasi)*, 6(1), 47–56. <https://doi.org/10.29207/resti.v6i1.3707>
- Irianto, K. D. (2022b). Performance Evaluation of LoRa in Farm Irrigation System with Internet of Things. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, 7(4), 383–390. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v7i4.1551>
- Irianto, K. D. (2022c). Residential Water Tanks with IoT: A Solution for Household Water Consumption Monitoring. *Asian Journal of Research in Computer Science*, December, 238–247. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2022/v14i4308>
- Jan, F., Min-Allah, N., & Düştegör, D. (2021). IoT Based Smart Water Quality Monitoring: Recent Techniques, Trends and Challenges for Domestic Applications. *Water*, 13(13), 1729. <https://doi.org/10.3390/w13131729>
- Jannah, W., & Firmawati, N. (2025). Sistem Monitoring Kekerusuhan Air Menggunakan Sensor Turbidity dan Tranceiver Lora Ebyte E220 Pada Penyediaan Air Minum dan Sanitasi Masyarakat (PAMSIMAS). *Jurnal Fisika Unand*, 14(2), 103–109. <https://doi.org/10.25077/jfu.14.2.103-109.2025>
- Junita, Arifuddin, R., & Prasetya, A. (2022). Penerapan Teknologi Dan Desain Iot-Lora Pada Saluran Irigasi Untuk Meningkatkan Kualitas Produk Pertanian Di Batu Indonesia. *Kajian: Pembelajaran PPKN*, 8(1), 19–35.
- Khairullah, E. F., Alghamdi, A. M., Al mojamed, M. M., & Zeadally, S. (2025). Lorawan-Based Smart Water Management Iot Applications: A Review. *Journal of Information and Telecommunication*, 9(3), 420–446. <https://doi.org/10.1080/24751839.2025.2458889>
- Khanza, A. Y., Rohmah, R. N., & Purwoto, B. H. (2024). Sistem Pemantauan Kualitas Udara Menggunakan Dua Koneksi Nirkabel. *Jurnal Teknik AMAT*, 5(1), 55–64.
- Makarim, F. Z., & Rafsyam, Y. (2022). Pengiriman Data Polusi Udara Menggunakan Komunikasi Long Range (Lora). *Orbith*, 18(1), 22–27.
- Malik, P. K., Malik, P., Kumar, G. R., Sneha, Abraham, R., & Singh, R. (2023). Design and Implementation of a LoRa-Based Water Quality Monitoring System. *2023 3rd International Conference on Advancement in Electronics & Communication Engineering (AECE)*, 120–124. <https://doi.org/10.1109/AECE59614.2023.10428618>
- Mukhlisin, Irvawansyah, Daniel, A., Hafid, A. A., & Burhan, B. J. (2023). Perancangan Sistem Akuisisi Data Tinggi Gelombang Laut Berbasis Internet Of Things (Iot). *Jurnal Teknologi Terapan*, 9(2), 111–119.

- Muyasaroh, H., Islamy, I. R., Fakhry, A. S. R., & Ismail, M. (2025). Sistem Pendeteksi Kualitas Air Berbasis Iot Pada Budidaya Tambak Di Desa Karangrejo, Kabupaten Demak. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(1), 1295–1305. <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i1.5879>
- Nasution, S. F., Harmadi, H., Suryadi, S., & Widiyatmoko, B. (2023). Development of River Flow and Water Quality Using IOT-based Smart Buoys Environment Monitoring System. *Jurnal Ilmu Fisika*, 16(1), 1–12. <https://doi.org/10.25077/jif.16.1.1-12.2024>
- Ningtias, D. R., Rofi'i, M., & Zulfa, N. (2024). Monitoring Kualitas Air Berbasis Iot (Internet Of Things) Untuk Meningkatkan Produktivitas Nelayan Di Kabupaten Demak. *Jurnal Abdi Masya*, 5(2), 198–206.
- Novian, M. N., Walid, M., & Makruf, M. (2024). Implementasi Logika Fuzzy untuk Monitoring Tingkat Pencemaran Air Sungai berbasis Internet Of Things. *Jurnal Sistem Komputer Dan Kecerdasan Buatan*, 7(3), 284–289.
- Nugraha, A., Murdika, U., Repelianto, A. S., & Alam, S. (2025). Rancang Bangun Sistem Monitoring Dan Kendali Kadar Oksigen Dan Ph Air Tambak Udang Vaname Di Bumi Dipasena Menggunakan Metode Fuzzy Logic Berbasis Iot. *Jurnal Informatika Dan Teknik Elektro Terapan*, 13(3S1), 609–622. <https://doi.org/10.23960/jitet.v13i3S1.7758>
- Pambudi, A. D., & Wulandari, S. A. (2022). Sistem Monitoring Sungai Berbasis IoT. *Elektrika*, 14(2), 76–79.
- Paradis, C. N. (2023). *Sistem Informasi Kualitas Air Layak Konsumsi Berbasis Mikrokontroler Arduino Uno Menggunakan Metode Fuzzy Mamdani* [Skripsi]. UIN Maulana Malik Ibrahim.
- Perdana, D., Naufal, J., & Alinursafa, I. (2021). Performance Evaluation of River Water Quality Monitoring Using Lora Connectivity with Fuzzy Algorithm. *International Journal Of Computers Communications & Control*, 16(4), 1–13. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2021.4.4226>
- Pires, L. M., & Gomes, J. (2024). River Water Quality Monitoring Using LoRa-Based IoT. *Designs*, 8(6), 127. <https://doi.org/10.3390/designs8060127>
- Putra, H. A., & Rosano, A. (2024). Implementasi IOT Dalam Sistem Monitoring Kualitas Air Menggunakan Platform Blynk Dan Googlesheet. *Jurnal Inovasi Dan Sains Teknik Elektro*, 5(1), 15–21.
- Putra, M. I. W., Afiati, N., & Purnomo, P. W. (2025). Dampak Kualitas Air Terhadap Sumber Daya Ikan Di Sungai Seklenting, Kabupaten Demak. *Jurnal Pasir Laut*, 9(1), 31–40.
- Putra, R. M. N., Wibawa, P. D., & ... (2024). Perancangan Perangkat Lunak Monitoring Kualitas Air Sungai Citarum Berbasis IoT. *EProceedings ...*, 11(1), 300–306. <https://openlibrarypublications.telkomuniversity.ac.id/index.php/engineering/article/view/22233>

- Putri, A. D. A. S., Soeprbowati, T. R., Jumari, J., Hidayat, J. W., & Muhammad, F. (2024). Spasio-Temporal Kualitas Air dan Indeks Pencemaran pada Kawasan Mangrove di Desa Bedono, Kecamatan Sayung, Kabupaten Demak. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(2), 279–288. <https://doi.org/10.14710/jil.22.2.279-288>
- Raihan, T. M. (2022). *Sistem Pemantauan Kualitas Air Menggunakan ESP32 dengan Fuzzy Logic Sugeno Berbasis Android* [Skripsi]. UIN Syarif Hidayatullah.
- Ramadhan, D. R., Rusdinar, A., & Rahmat, B. (2024). Sistem Monitoring Kualitas Air Sungai Berbasis Komunikasi LoRa. *E-Proceeding of Engineering*, 11(5), 5631–5638.
- Roby, M. F., Soetedjo, A., & Faradisa, I. S. (2022). Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Air pada IPAL Tirtarona Tlogomas Kota Malang menggunakan IoT Berbasis LoRa. *Prosiding SENIATI*, 6(1), 33–41. <https://doi.org/10.36040/seniati.v6i1.4839>
- Saputra, W. T., Prima, E. C., Fajar, M. C. B., Rozi, M. F., Destanto, N. A., Hadjar, A. S., Amadudin, M. N. Y., & Ashidiq, R. M. (2025). IoT-MQTT Protocol-Based Water Sensor System to Monitor Citarum River Water Quality using Arduino Uno R4 Wifi. *Jurnal ELTIKOM*, 9(1), 11–22. <https://doi.org/10.31961/eltikom.v9i1.1335>
- Setyawan, W., Hadary, F., & Saleh, M. (2022). Perancangan Sistem Monitoring Kualitas Udara Di Daerah Rural Dengan Karakteristik Gambut Berbasis Teknologi Internet Of Things (Iot). *Jurnal Teknik Elektro Universitas Tanjungpura*, 2(1), 1–16.
- Situmorang, C., Herdianto, H., & Amin, M. (2024). Iot-Based Water Condition Monitoring System for Watersheds. *International Conference of Digital Sciences and Engineering Technology*, 290–300.
- Taha, S. N. S., Talip, M. S. A., Mohamad, M., Hasan, Z. H. A., & Izam, T. F. T. M. N. (2024). Evaluation of LoRa Network Performance for Water Quality Monitoring Systems. *Applied Sciences*, 14(16), 7136. <https://doi.org/10.3390/app14167136>
- Widowati, A. G., Suwastika, N. A., & Yasirandi, R. (2019). Deteksi Lokasi Pencemaran Air Sungai Citarum berbasis IoT menggunakan Fuzzy Inference System. *Ind. Journal on Computing*, 4(3), 1–14.
- BPS DIY. (2024). Suhu Rata-Rata Kabupaten Sleman. Diakses dari <https://yogyakarta.bps.go.id/id/statistics-table/2/NDU3IzI=/suhu-rata-rata.html>
- BMKG. (2025). Data Suhu Udara Stasiun Condongcat, Sleman. Diakses dari <https://stamet-yogya.bmkg.go.id/>

LAMPIRAN