

BAB 4

HASIL PENELITIAN

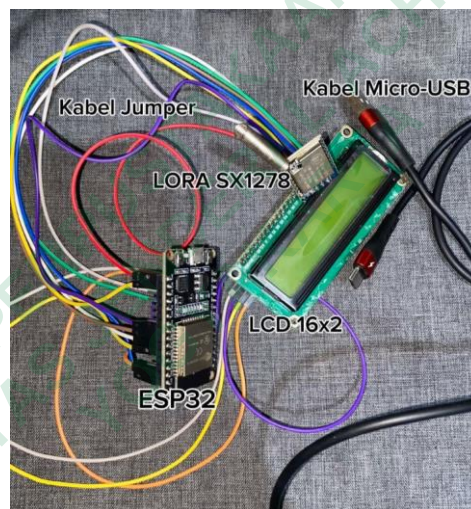
4.1 Implementasi Alat

Tahapan implementasi alat pemantauan arus dan tinggi air berbasis mikrokontroler ESP32 menggunakan komunikasi LoRa dijelaskan secara rinci. Alat ini dirancang untuk bekerja secara otomatis dan *real-time*, serta mampu mengirimkan data dari lokasi pengukuran ke perangkat penerima tanpa bergantung pada koneksi internet. Alat terdiri dari dua bagian utama, yaitu *node* pengirim dan *node* penerima. *Node* pengirim bertugas untuk membaca data dari sensor, memproses data tersebut, mengklasifikasikan kondisi berdasarkan ambang batas yang ditentukan, dan mengirimkan hasilnya melalui komunikasi LoRa. *Node* penerima berfungsi untuk menerima data yang dikirim oleh *node* pengirim dan menampilkannya secara *real-time* melalui LCD 16x2. Dengan alat ini, pengguna dapat memantau kondisi air secara langsung di bagian penerima.

Arsitektur alat secara umum terdiri dari tiga komponen utama: sensor sebagai *input*, mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pemrosesan dan LoRa sebagai media komunikasi nirkabel. Sensor HC-SR04 digunakan untuk mendeteksi tinggi permukaan air sedangkan sensor YF-S201C digunakan untuk mengukur arus air berdasarkan jumlah pulsa aliran. Mikrokontroler ESP32 akan memproses data yang masuk, menentukan status berdasarkan ambang batas (normal, waspada, bahaya) dan mengirimkan data tersebut melalui modul LoRa SX1278 ke *node* penerima. Di sisi penerima, ESP32 menerima data dari LoRa, mengolahnya dan menampilkannya pada LCD 16x2 berbasis I2C secara *real-time*. Arsitektur ini memungkinkan alat bekerja secara mandiri tanpa koneksi internet menjadikannya cocok digunakan di daerah terpencil untuk pemantauan lingkungan. Gambar alat pemantauan bisa dilihat di bawah ini:



Gambar 4. 1 Komponen di Node Pengirim



Gambar 4. 2 Komponen di Node Penerima

4.1.1 Pemasangan Komponen Alat

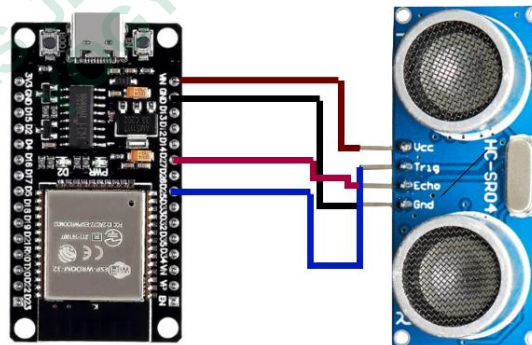
Tahapan implementasi alat dimulai dengan pemasangan komponen-komponen elektronik. Komponen-komponen yang digunakan dalam alat ini antara lain sensor untuk pengukuran, mikrokontroler sebagai pengolah data, modul komunikasi LoRa sebagai media pengiriman data serta perangkat tampilan berupa LCD untuk menampilkan hasil pengukuran. Berikut ini adalah penjelasan mengenai masing-masing komponen:

1. Sensor HC-SR04 (sensor tinggi air)

Sensor HC-SR04 berfungsi untuk mengukur jarak antara sensor dan permukaan air sungai. Sensor ini bekerja dengan prinsip pemantulan gelombang ultrasonik di mana gelombang dikirim ke permukaan air dan pantulannya diterima kembali oleh sensor untuk dihitung durasi waktunya. Data waktu ini kemudian dikonversi menjadi satuan *centimeter* (cm). Sensor diletakkan di tepi sungai sehingga tidak bersentuhan langsung dengan air dan lebih tahan terhadap kelembapan maupun korosi.

Untuk menentukan ketinggian air dari dasar sungai digunakan rumus: ketinggian air = total ketinggian sensor ke dasar sungai – jarak sensor ke permukaan air. Dengan metode ini, alat dapat menghitung tinggi muka air secara akurat tanpa kontak langsung dengan permukaan air. Pemasangan pin dilakukan dengan skema sebagai berikut:

1. Vcc ke 5v
2. Gnd ke gnd
3. Trig ke gpio d25
4. Echo ke gpio d27



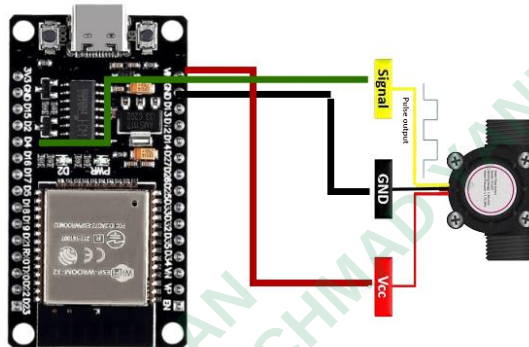
Gambar 4. 3 Rangkaian ESP32 ke Sensor HC-SR04

2. Sensor YF-S201C (sensor arus air)

Sensor ini digunakan untuk mengukur kecepatan aliran air. Sensor bekerja berdasarkan jumlah pulsa yang dihasilkan oleh perputaran rotor ketika air mengalir melewati sensor. Pulsa ini kemudian dihitung oleh ESP32 melalui *interrupt*. Jumlah pulsa per detik digunakan untuk menghitung

volume air yang mengalir, yang kemudian dikonversi menjadi kecepatan arus dalam satuan meter per detik (m/s). Pemasangan pin sebagai berikut:

1. Vcc ke 5v
2. Gnd ke gnd
3. Out ke gpio d4



Gambar 4. 4 Rangkaian ESP32 ke YF-S201

3. Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan unit pemrosesan utama dalam alat ini. Mikrokontroler ini bertugas untuk membaca data dari sensor, memproses data, menentukan klasifikasi kondisi sungai, mengemas data menjadi format *string* dan mengirimkan data tersebut melalui LoRa. ESP32 dipilih karena memiliki fitur pemrosesan yang kuat dan hemat daya, serta mendukung banyak antarmuka komunikasi digital.



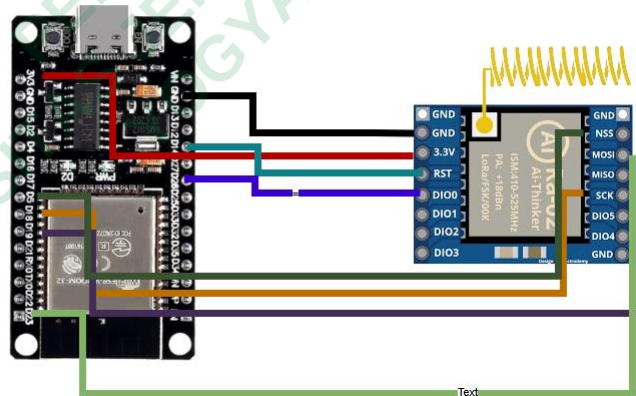
Gambar 4. 5 ESP32

4. Modul LoRa SX1278

LoRa digunakan untuk komunikasi jarak jauh antara *node* pengirim dan *node* penerima tanpa memerlukan koneksi internet. Modul ini bekerja pada frekuensi 433 mhz dan mampu mengirimkan data hingga beberapa kilometer di area terbuka. Modul ini sangat cocok untuk alat pemantauan di daerah terpencil yang minim infrastruktur jaringan. Pemasangan pin sebagai berikut :

a. LoRa Pengirim

1. Vcc ke 3.3 v
2. Gnd ke gnd
3. Sck ke gpio 18
4. Miso ke gpio 19
5. Mosi ke gpio 23
6. Nss / cs ke gpio 5
7. Reset ke gpio 14
8. Dio0 ke gpio 26



Gambar 4. 6 Rangkaian ESP32 ke LoRa Pengirim

b. LoRa Penerima

1. Vcc ke 3.3 v
2. Gnd ke gnd
3. Sck ke gpio 18
4. Miso ke gpio 19
5. Mosi ke gpio 23

6. *Power bank* 10.00 mAh

Untuk memastikan alat dapat berjalan di lokasi tanpa listrik, digunakan *power bank* sebagai sumber daya. Kapasitas besar dari *power bank* memungkinkan alat untuk beroperasi selama beberapa jam hingga hari, tergantung pada konsumsi daya dan kondisi lingkungan.

4.1.2 Perakitan Alat

Setelah komponen disiapkan, alat dirakit menjadi dua bagian utama, yaitu *node* pengirim dan *node* penerima:

1. *Node* pengirim

Terdiri dari sensor HC-SR04, sensor YF-S201C, ESP32, dan LoRa SX1278. Data dari kedua sensor dibaca oleh ESP32, kemudian diproses untuk dikonversi ke satuan pengukuran yang sesuai dan diklasifikasikan berdasarkan ambang batas. Selanjutnya ESP32 mengirimkan data tersebut melalui LoRa ke *node* penerima. *Node* ini dirancang ringkas dan menggunakan *power bank* agar dapat ditempatkan di lapangan secara fleksibel.

2. *Node* penerima

Terdiri dari ESP32, LoRa SX1278, dan LCD 16x2. Data yang diterima dari LoRa kemudian diproses oleh ESP32 dan ditampilkan secara *real-time* di LCD. Penempatan *node* ini dapat berada di lokasi pemantauan untuk memberikan informasi visual.

4.1.3 Pemrograman Mikrokontroler ESP32

Pemrograman dilakukan menggunakan ESP32 dengan bantuan laptop dan kabel USB untuk menghubungkan mikrokontroler ke perangkat pemrograman. Proses ini menggunakan *library* pendukung seperti *LoRa.h*, *Wire.h*, dan *Liquidcrystal_i2c.h*. Program pada masing-masing *node* berbeda sesuai dengan fungsinya:

3. *Node* pengirim

- a) Membaca data dari sensor HC-SR04 dan YF-S201C.
- b) Mengonversi durasi pantulan ultrasonik menjadi tinggi air dalam cm.

- c) Menghitung jumlah pulsa dari sensor arus untuk menentukan kecepatan aliran.
- d) Menggunakan metode *moving average* untuk menyaring fluktuasi data.
- e) Menentukan status air : normal, waspada atau bahaya.
- f) Menggabungkan data menjadi *string* dan mengirimkannya melalui LoRa.

Berikut adalah potongan kode dari program mikrokontroler ESP32 yang digunakan sebagai *node* pengirim:

a. Pengukuran Jarak Sensor ke Permukaan Air

Mengukur jarak sensor HC-SR04 ke permukaan air menggunakan prinsip pantulan ultrasonik kemudian dikonversikan menjadi kedalaman air.

```
long duration = pulseIn(echo_pin, HIGH);
float distance = duration * 0.034 / 2;
float kedalaman_air = sensor_height - distance;
```

b. Perhitungan Kecepatan Arus Air

Menghitung *flowrate* berdasarkan pulsa dari sensor arus YF-S201C, yang kemudian dikonversi menjadi kecepatan arus dalam satuan meter per detik.

```
flowrate = pulseCount / 7.5;
float flow_m3s = (flowrate / 1000.0) / 60.0;
float velocity = flow_m3s / river_area;
```

c. Penentuan Status Ketinggian dan Arus Air

Logika yang digunakan untuk menentukan status air berdasarkan nilai kedalaman dan kecepatan arus yang telah dihitung sebelumnya.

```
String status = "";
if (kedalaman_air <= 100 && velocity <= 0.4) {
    status = "normal";
} else if ((kedalaman_air <= 200) || (velocity <=
1.0)) {
    status = "waspada";
} else {
    status = "bahaya";
}
```

d. Pengiriman Data Melalui Modul LoRa

Data dikirim melalui modul LoRa SX1278 menggunakan perintah berikut:

```
LoRa.beginPacket();
```

```
LoRa.print("Status: ");
LoRa.println(status);
LoRa.endPacket();
```

4. *Node* Penerima

- Menerima *string* data dari LoRa.
- Memisahkan nilai tinggi, arus, dan status.
- Menampilkan hasil pada LCD 16x2 dengan pembaruan secara berkala.

Berikut adalah potongan kode dari program mikrokontroler ESP32 yang digunakan sebagai *node* penerima :

a. Inisialisasi LCD dan LoRa

Dilakukan inisialisasi LCD dan konfigurasi pin LoRa. LCD digunakan untuk menampilkan status air secara lokal kepada pengguna.

```
LCD.init();
LCD.backlight();
LCD.setCursor(0, 0);
LCD.print("LoRa receiver");

LoRa.setPins(LoRa_cs, LoRa_rst, LoRa_dio0);
if (!LoRa.begin(433E6)) {
  LCD.setCursor(0, 0);
  LCD.print("LoRa gagal!");
  while (1);
}
```

b. Menerima dan *Parsing* Data LoRa

Membaca paket LoRa yang masuk, mengekstrak *string* data, lalu memisahkan nilai tinggi air dan kecepatan arus.

```
int packetSize = LoRa.parsePacket();
if (packetSize > 0) {
  String receivedData = "";
  while (LoRa.available()) {
    receivedData += (char)LoRa.read();
  }

  int kedalamanIndex =
receivedData.indexOf("kedalaman:");
  int cmIndex = receivedData.indexOf("cm");
  int kecepatanIndex =
receivedData.indexOf("kecepatan:");
  int msIndex = receivedData.indexOf("m/s");
```

```
String tinggiStr =
receivedData.substring(kedalamanIndex + 10, cmIndex);
String arusStr =
receivedData.substring(kecepatanIndex + 10, msIndex);
```

c. Penentuan Status Berdasarkan Nilai Tinggi dan Arus

Tinggi air dan kecepatan arus dikonversi dari *string* menjadi *float*, lalu dilakukan klasifikasi status berdasarkan ambang batas yang ditentukan.

```
float tinggiVal = tinggiStr.toFloat();
float arusVal = arusStr.toFloat();

if (tinggiVal <= 100) statusKedalaman = "normal";
else if (tinggiVal <= 200) statusKedalaman =
"waspada";
else statusKedalaman = "bahaya";

if (arusVal <= 0.4) statusKecepatan = "normal";
else if (arusVal <= 1.0) statusKecepatan =
"waspada";
else statusKecepatan = "bahaya";
```

d. Menampilkan Data ke LCD

Data yang telah diterima dan diproses kemudian ditampilkan ke layar LCD 16x2 untuk memberikan informasi langsung kepada pengguna.

```
LCD.clear();
LCD.setCursor(0, 0);
LCD.print("t:");
LCD.print(tinggiStr);
LCD.print("cm ");
LCD.print(statusKedalaman);

LCD.setCursor(0, 1);
LCD.print("a:");
LCD.print(arusStr.toFloat(), 6);
LCD.print(" ");
LCD.print(statusKecepatan);
```

4.1.4 Alur Kerja Alat

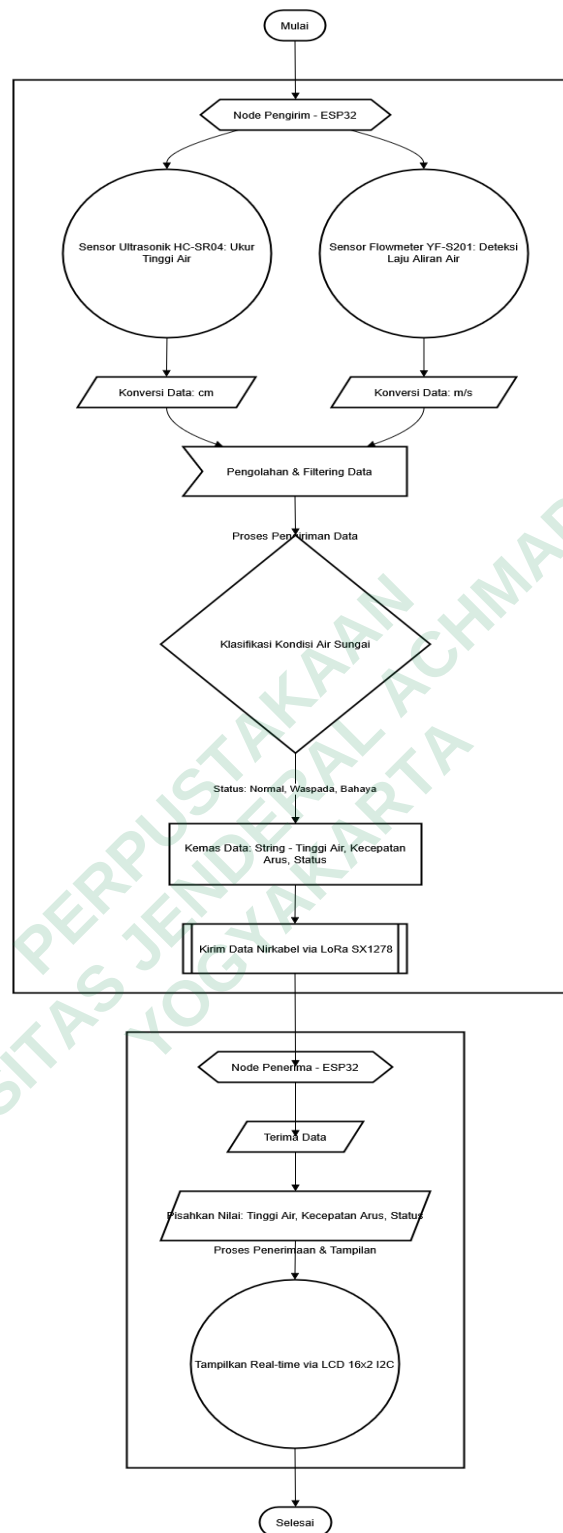
Alur kerja alat pemantauan arus dan tinggi air berbasis mikrokontroler ESP32 ini dimulai dari proses pembacaan data oleh sensor yang terhubung ke *node* pengirim. Sensor ultrasonik HC-SR04 digunakan untuk mengukur tinggi permukaan air, sedangkan sensor Flowmeter Yf-S201 digunakan untuk mendeteksi laju aliran air. Data dari kedua sensor tersebut kemudian dikonversi

oleh mikrokontroler ESP32 ke dalam satuan *centimeter* (cm) untuk tinggi air dan meter per detik (m/s) untuk kecepatan arus.

Setelah proses konversi data diolah dan difilter untuk mengurangi *noise* atau fluktuasi pengukuran yang tidak stabil. Selanjutnya ESP32 melakukan klasifikasi terhadap kondisi air sungai berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan yaitu status normal, waspada atau bahaya. Hasil klasifikasi beserta nilai pengukuran kemudian dikemas dalam bentuk data *string* dan dikirimkan secara nirkabel melalui modul LoRa SX1278 ke *node* penerima.

Node penerima yang juga menggunakan mikrokontroler ESP32 akan menerima data tersebut, memisahkan nilai-nilai yang diterima (tinggi air, kecepatan arus, dan status), lalu menampilkannya secara *real-time* melalui LCD 16x2 menggunakan komunikasi i2c. Dengan demikian alat memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi sungai secara langsung dan tanpa ketergantungan pada jaringan internet.

Proses operasional alat pemantauan arus dan tinggi air berbasis mikrokontroler ESP32 dijelaskan secara rinci dalam diagram alir pada gambar 4.3. Diagram ini merinci interaksi antara komponen-komponen kunci, meliputi pembacaan data sensor, proses konversi dan klasifikasi data oleh mikrokontroler ESP32, hingga mekanisme pengiriman data nirkabel melalui modul LoRa SX1278 dan visualisasi pada tampilan lokal.



Gambar 4. 9 Alur Kerja Alat

4.2 Hasil Pengukuran dan Pengujian Alat

Pengujian alat dilakukan untuk menilai kemampuan alat dalam mendeteksi tinggi permukaan air dan kecepatan arus, mengirimkan data melalui komunikasi LoRa serta menampilkan informasi pada LCD *node* penerima. Proses pengujian dilaksanakan secara bertahap dengan berbagai kondisi waktu dan lingkungan. Beberapa kali pengambilan data telah dilakukan guna memastikan alat bekerja secara stabil dan akurat.

Namun demikian dalam penulisan ini hanya ditampilkan dua sampel hasil pengukuran yang dipilih secara khusus berdasarkan representasi kondisi lingkungan yang relevan, kejelasan data yang dihasilkan, serta kestabilan pembacaan sensor. Kedua sampel ini dianggap cukup menggambarkan performa alat dalam dua kondisi utama, yaitu saat kondisi air normal dan saat kondisi air meningkat setelah hujan. Pengujian pada kondisi air normal dilakukan pada pagi hari pukul 10.00 hingga 12.00 WIB, sedangkan pengujian pada kondisi air meningkat dilaksanakan pada sore hari pukul 16.30 hingga 18.00 WIB. Kedua pengujian tersebut dilaksanakan pada bulan Mei 2025.

4.2.1 Hasil Pembacaan Sensor

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kemampuan alat dalam membaca tinggi air dan kecepatan arus air sungai secara otomatis. Pengukuran dilakukan pada dua waktu berbeda yaitu pagi hari saat kondisi normal dan sore hari setelah hujan, ketika volume dan arus air meningkat. Sensor yang digunakan adalah HC-SR04 untuk mengukur tinggi air dan YF-S201C untuk mengukur kecepatan arus air. Hasil pembacaan dibandingkan dengan pengukuran manual sebagai acuan validasi. Berikut hasil pengukuran berdasarkan masing-masing parameter :

1. Tinggi Air

Sensor HC-SR04 digunakan untuk mendeteksi tinggi permukaan air dari posisi alat yang dipasang menggantung. Hasil pembacaan sensor menunjukkan nilai yang sangat dekat dengan pengukuran manual menggunakan alat ukur meteran, baik pada pagi maupun sore hari.

2. Arus Air

Sensor YF-S201C berfungsi membaca kecepatan aliran air dalam satuan m/s. Nilai kecepatan sangat kecil saat pagi hari, menunjukkan aliran yang hampir tidak terdeteksi, dan meningkat secara signifikan pada sore hari setelah hujan. Hasil pengukuran dapat dilihat di tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4. 1 Hasil Pembacaan Sensor Dan Pengukuran Manual

Waktu pengujian	Metode pengukuran	Tinggi air (cm)	Kecepatan arus (m/s)
Pagi	Sensor	53,07	0,000096
Pagi	Manual	53	-
Sore	Sensor	133,01	1,127239
Sore	Manual	133	-

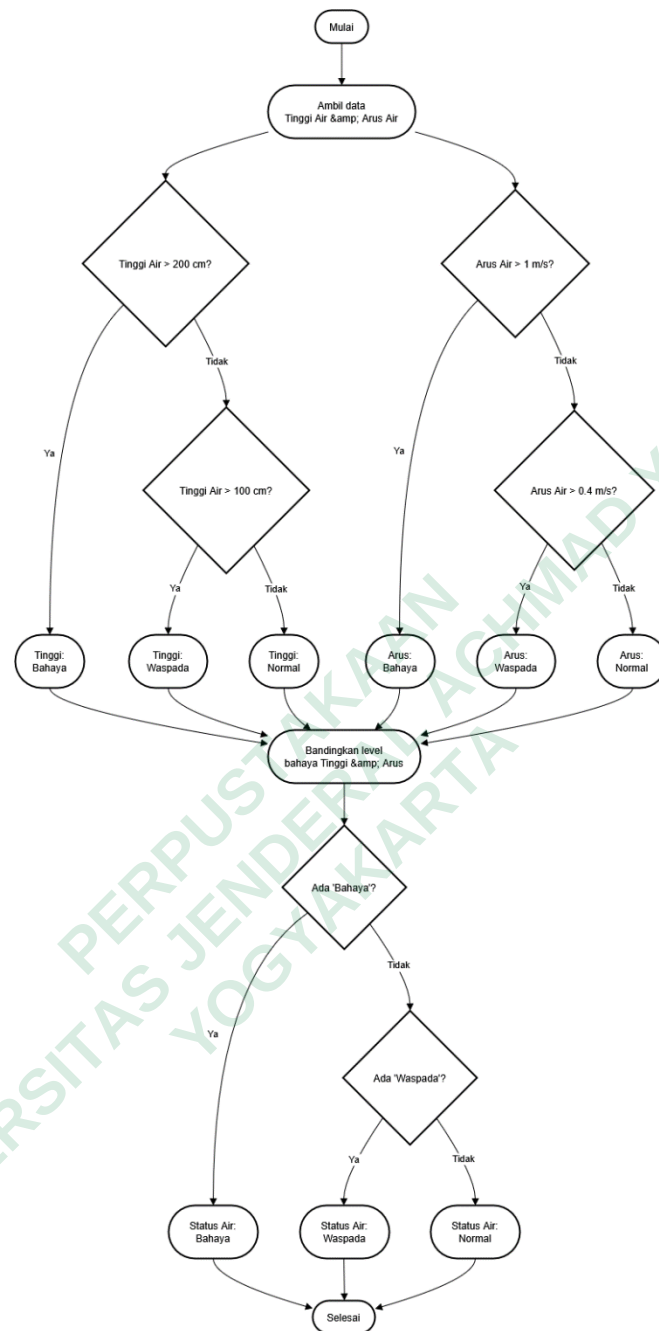
4.2.2 Klasifikasi Status Berdasarkan Data

Klasifikasi status kondisi air dilakukan dengan menggunakan ambang batas parameter tinggi air dan kecepatan arus air yang telah ditentukan berdasarkan perancangan alat. Klasifikasi ini bertujuan untuk mengelompokkan kondisi air menjadi tiga kategori, yaitu normal, waspada dan bahaya yang masing-masing memberikan indikasi tingkat risiko terhadap potensi banjir atau peningkatan arus air. Ambang batas klasifikasi ditentukan seperti pada tabel 4.2 berikut:

Tabel 4. 2 Ambang Batas Klasifikasi Kondisi Air

Parameter	Normal	Waspada	Bahaya
Tinggi air (cm)	0 - 100	100 – 200	> 200
Arus air (m/s)	0 – 0,4	0,5 – 1	> 1

Proses klasifikasi digunakan untuk menentukan tingkat kewaspadaan terhadap potensi banjir dengan tiga kategori, yaitu Normal, Waspada, dan Bahaya. Diagram alir berikut menunjukkan logika pengambilan keputusan dalam proses klasifikasi tersebut:



Gambar 4. 10 Ambang Batas Klasifikasi

Alat yang dirancang mampu melakukan klasifikasi secara otomatis berdasarkan data pengukuran sensor yang diperoleh di lapangan. Proses ini dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan tinggi dan arus air dengan ambang batas yang telah ditentukan. Hasil klasifikasi dari dua sesi pengujian yang dilakukan ditampilkan dalam tabel 4.3 berikut:

Tabel 4. 3 Hasil Klasifikasi Status Berdasarkan Sensor

Waktu pengujian	Tinggi air	Arus air	Status tinggi	Status arus	Status umum	Indeks BMKG SAR
Pagi hari	53,07	0,000096	Normal	Normal	Normal	Rendah
Sore hari	133,01	1,127239	Waspada	Bahaya	Waspada / bahaya	Tinggi

Dari hasil di atas, dapat dijelaskan bahwa:

1. Pada pengujian pagi hari, tinggi air berada pada nilai 53,07 cm dan kecepatan arus sebesar 0,000096 m/s. Kedua nilai tersebut masih berada dalam rentang normal, sehingga alat secara otomatis mengkategorikan kondisi air sebagai “normal”.
2. Pada pengujian sore hari, tinggi air meningkat menjadi 133,01 cm yang termasuk kategori waspada, dan kecepatan arus meningkat menjadi 1,127239 m/s yang sudah masuk kategori bahaya. Karena salah satu parameter telah melebihi batas aman, maka alat memberikan status gabungan waspada/bahaya sebagai peringatan dini terhadap potensi risiko yang mungkin terjadi.

Proses klasifikasi ini penting karena akan menentukan informasi yang dikirim oleh alat ke *node* penerima serta informasi visual yang ditampilkan kepada pengguna melalui layar LCD. Alat akan memperbarui status secara *real-time* setiap kali terjadi perubahan data sensor sehingga memungkinkan pemantauan yang cepat dan tepat.

4.2.3 Tampilan Hasil di *Node* Penerima

Setelah proses pengukuran dan klasifikasi dilakukan oleh *node* pengirim, data akan dikirimkan melalui modul komunikasi LoRa SX1278 ke *node* penerima. Di sisi penerima, informasi ditampilkan secara langsung melalui LCD 16x2 yang telah dipasang. Tujuan dari tampilan ini adalah agar pengguna dapat memantau kondisi tinggi dan arus air secara *real-time* di lokasi tanpa harus mengakses jaringan internet.

LCD menampilkan tiga informasi utama, yaitu:

1. Tinggi air dalam satuan centimeter (cm) dan klasifikasinya.

2. Kecepatan arus dalam satuan meter per detik (m/s) dan klasifikasinya.
Berikut adalah contoh tampilan pada LCD berdasarkan hasil pengujian:
Tampilan pada kondisi pagi hari (status: normal):

T : 53,07 cm normal

A : 0,000096 m/s normal

Tampilan ini menunjukkan bahwa tinggi dan arus air berada dalam kondisi aman, sehingga tidak memerlukan tindakan khusus dari pengguna.

Tampilan pada kondisi sore hari setelah hujan (status: waspada/bahaya):

T : 133,01 cm waspada

A : 1,127239 m/s bahaya

Tampilan ini menunjukkan terdapat peningkatan signifikan pada tinggi dan arus air. Status waspada/bahaya memberikan peringatan kepada pengguna bahwa kondisi air sudah mencapai batas yang berpotensi membahayakan sehingga perlu dilakukan pemantauan lebih lanjut



Gambar 4. 11 Tampilan LCD Node Penerima Pada Waktu Pagi Hari



Gambar 4. 12 Pengukuran Tinggi Air Secara Manual



Gambar 4. 13 Tampilan LCD Node Penerima Pada Waktu Sore Hari

Pada gambar 4.8 ini di bawah ini proses pengukuran tinggi air, digunakan batang bambu berukuran kecil sebagai alat bantu ukur. Hal ini dilakukan karena kondisi arus air yang sangat deras tidak memungkinkan dilakukannya pengukuran secara langsung dari dasar sungai.



Gambar 4. 14 Pengukuran Tinggi Air Secara Manual

Tampilan data pada LCD terbukti mampu memberikan informasi dengan jelas dan cepat. Alat bekerja tanpa koneksi internet, sehingga sangat cocok diterapkan di daerah terpencil yang tidak memiliki jaringan komunikasi konvensional. Hasil ini menunjukkan bahwa alat telah berfungsi sesuai

dengan tujuan utama penelitian yaitu merancang alat pemantauan arus dan tinggi air yang dapat beroperasi secara mandiri, efisien dan *real-time*.

4.2.4 Laju Pertumbuhan Ketinggian Air dan Arus Air

Laju pertumbuhan digunakan untuk mengetahui seberapa cepat ketinggian dan arus air meningkat dalam selang waktu tertentu. Analisis ini penting dalam alat peringatan dini karena kenaikan yang cepat dapat menandakan risiko banjir, luapan sungai, atau kerusakan lingkungan di sekitar bantaran sungai.

A. Tinggi Air

Laju pertumbuhan ketinggian air merupakan parameter yang menunjukkan seberapa cepat permukaan air mengalami kenaikan dalam kurun waktu tertentu. Informasi ini penting dalam alat peringatan dini banjir karena memberikan gambaran mengenai tren kenaikan air yang berkelanjutan.

1. Rumus Laju Pertumbuhan Ketinggian

Perhitungan laju pertumbuhan tinggi air menggunakan rumus dasar perubahan tinggi terhadap waktu sebagai berikut:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1}$$

Dengan keterangan:

- | | | |
|----|-----------------------|-------------------------------------|
| a) | h_1 | : tinggi air pada waktu awal (cm) |
| b) | h_2 | : tinggi air pada waktu akhir (cm) |
| c) | t_1 | : waktu awal pengukuran (jam) |
| d) | t_2 | : waktu akhir pengukuran (jam) |
| e) | $\Delta h / \Delta t$ | : laju kenaikan tinggi air (cm/jam) |

2. Perhitungan Laju Ketinggian Air

Berdasarkan data pengujian yang telah dilakukan :

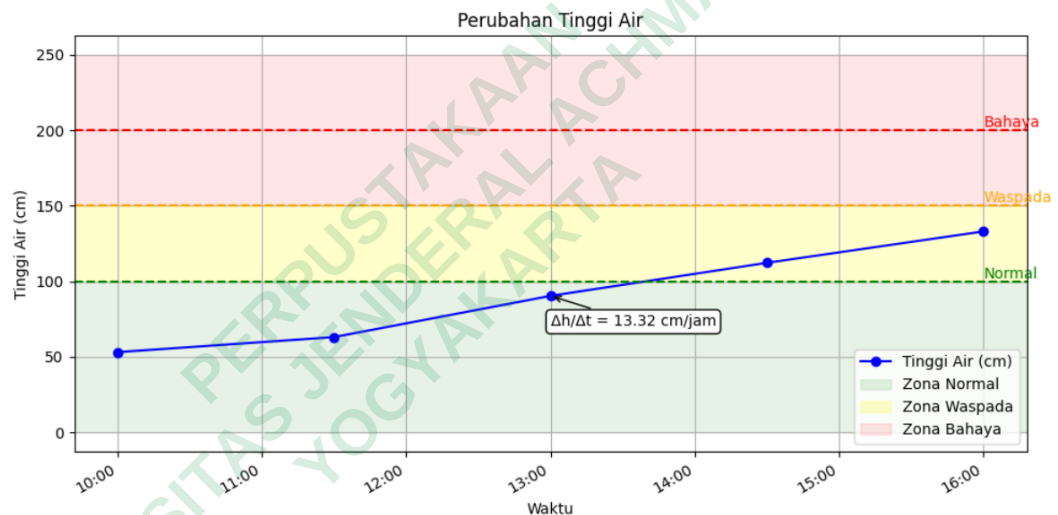
- Tinggi air pada pagi hari (h_1) : 53,07 cm
 - Tinggi air pada sore hari (h_2) : 133,01 cm
- Selisih waktu pengukuran ($t_2 - t_1$) : 6,5 jam (dari pukul 10.00 hingga 16.30 WIB)

$$\Delta h = 133,01 - 53,07 = 79,94 \text{ cm}$$

$$\Delta h / \Delta t = \frac{79,94}{6,5} = 12,29 \text{ cm / jam}$$

3. Analisis Data Pengukuran

Nilai laju pertumbuhan tinggi air sebesar 12,29 cm/jam mengindikasikan adanya peningkatan permukaan air yang cukup signifikan dalam waktu singkat. Kenaikan ini disebabkan oleh curah hujan yang terjadi pada sore hari dan menunjukkan bahwa kondisi air perlu diawasi secara lebih intensif karena berpotensi menimbulkan bahaya banjir jika tren kenaikan berlanjut.



Gambar 4. 9 Grafik Laju Kecepatan Tinggi Air

B. Arus Air

Laju pertumbuhan kecepatan arus air digunakan untuk mengetahui seberapa cepat aliran air bertambah kuat dalam selang waktu tertentu. Hal ini penting untuk mendeteksi potensi bahaya akibat peningkatan kecepatan aliran yang signifikan terutama setelah hujan deras.

1. Rumus Laju Perubahan Kecepatan Arus Air

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1}$$

Dengan keterangan:

- a) v_1 : kecepatan arus air awal (m/s)
- b) v_2 : kecepatan arus air akhir (m/s)
- c) t_1 : waktu awal pengukuran (jam)
- d) t_2 : waktu akhir pengukuran (jam)
- e) $\Delta h/\Delta t$: laju kenaikan tinggi air (cm/jam)

2. Perhitungan Laju Arus Air

Berdasarkan hasil pengukuran sensor:

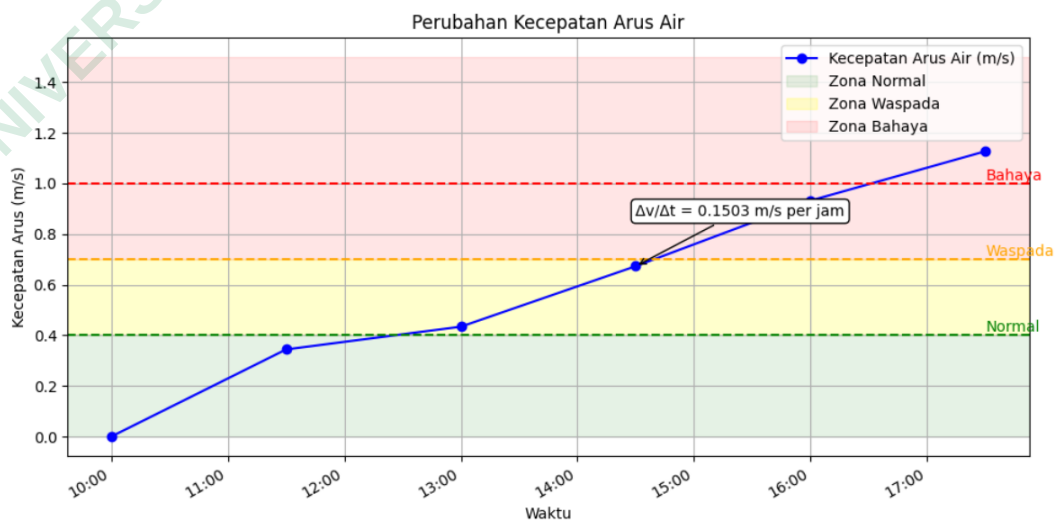
- a) Kecepatan arus pagi hari (v_1): 0,000096 m/s
- b) Kecepatan arus sore hari (v_2): 1,127239 m/s
- c) Selisih waktu (Δt): 6,5 jam

$$\Delta v = 1,127239 - 0,000096 = 1,127143 \text{ m/s}$$

$$\Delta v/\Delta t = \frac{1,127143}{6,5} = 0,1734 \text{ m / s per jam}$$

3. Analisis Data Pengukuran

Laju peningkatan kecepatan arus air sebesar 0,1734 m/s per jam menunjukkan bahwa kecepatan aliran meningkat drastis dalam waktu singkat.



Gambar 4. 10 Grafik Laju Kecepatan Arus Air

4.2.5 Kalibrasi dan Penyesuaian Nilai *Error* pada Pemantauan

Dalam implementasi alat pemantauan arus dan tinggi air berbasis mikrokontroler ESP32 dengan komunikasi LoRa potensi kesalahan pembacaan sensor dapat disebabkan oleh faktor lingkungan seperti gelombang air mendadak akibat hujan deras, benda mengambang seperti daun atau ranting serta riak air karena angin. Untuk menjaga akurasi sistem dalam mendeteksi kondisi sungai secara otomatis diterapkan metode kalibrasi dan penyaringan data. Sensor YF-S201C dikalibrasi menggunakan *flowmeter* standar dengan debit 5, 10 dan 15 liter/menit, yang menghasilkan rata-rata *error* margin sebesar 4,00%. Selain itu metode *moving average* digunakan untuk meredam fluktuasi data sesaat agar pembacaan lebih stabil. Sensor HC-SR04 juga diuji terhadap gangguan fisik di mana pembacaan tinggi air cenderung lebih rendah saat ada benda mengambang. Oleh karena itu sistem menerapkan ambang toleransi yakni notifikasi hanya dikirim bila kondisi ekstrem terjadi terus-menerus selama lebih dari 5 detik.

Pengujian komunikasi LoRa dilakukan pada dua skenario lingkungan: area terbuka dan area dengan hambatan fisik seperti bangunan serta vegetasi lebat. Hasilnya menunjukkan bahwa penghalang lingkungan menyebabkan penurunan kualitas sinyal tercermin dari nilai RSSI yang lebih rendah dan peningkatan potensi kehilangan paket data (*packet loss*). Pengujian ini memberikan gambaran akurat mengenai kinerja transmisi LoRa dalam kondisi nyata di lapangan. Dengan kombinasi kalibrasi sensor, *filtering* data dan pengujian LoRa di berbagai kondisi alat ini mampu mengklasifikasikan status kewaspadaan (normal, waspada, bahaya) secara andal serta mendukung sistem peringatan dini terhadap banjir secara *real-time* tanpa ketergantungan pada jaringan internet.

4.2.6 Pengujian Komunikasi LoRa

Pengujian dilakukan pada radius 100 m, 200 m dan 300 m dengan berbagai penghalang seperti tembok, pohon, dan medan terbuka. Hasil menunjukkan bahwa komunikasi tetap stabil hingga >250 meter pada kondisi semi-terbuka tanpa internet. Pengaturan parameter LoRa secara langsung

mempengaruhi kecepatan dan reliabilitas transmisi data yang mana SF tinggi memperlambat pengiriman namun meningkatkan jangkauan.

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kinerja modul LoRa SX1278 sebagai media komunikasi nirkabel antara *node* pengirim dan *node* penerima. Fokus pengujian meliputi jarak jangkauan sinyal, stabilitas koneksi, serta ketahanan komunikasi terhadap gangguan daya pada perangkat penerima. Pengujian dilakukan dalam dua skenario berbeda:

a. Skenario Pemutusan Daya pada *Node* Penerima

Dalam pengujian ini, daya pada *node* penerima sengaja diputus untuk mensimulasikan kondisi gangguan atau kehilangan sumber listrik. Setelah itu dilakukan pengamatan terhadap jangkauan maksimum sinyal LoRa yang masih dapat terdeteksi. Hasilnya menunjukkan bahwa dalam kondisi tersebut, alat masih mampu menjangkau jarak hingga 200 meter. Ini menunjukkan bahwa sinyal LoRa tetap dapat dipancarkan dan diterima ulang setelah *node* penerima diaktifkan kembali meskipun daya sempat terputus. Bisa dilihat gambar di bawah ini :



Gambar 4. 15 Tampilan LCD Dihidupkan Kembali Jarak Lebih 200 Meter

b. Skenario Operasi Normal (daya tersambung penuh)

Dalam kondisi normal di mana daya pada *node* penerima tersambung secara terus-menerus, komunikasi antara *node* pengirim dan *node* penerima berjalan stabil tanpa gangguan. Jangkauan maksimum yang berhasil dicapai dalam kondisi ini adalah 2,3 kilometer di area terbuka tanpa penghalang sinyal yang signifikan. Selama pengujian tidak

ditemukan adanya *delay*, kehilangan data maupun gangguan transmisi lainnya.



Gambar 4.16 Tampilan LCD Jika Tersambung Penuh

4.3 Ringkasan Hasil Penelitian

Berdasarkan proses implementasi dan pengumpulan data, alat pemantauan arus dan tinggi air berbasis mikrokontroler ESP32 ini mengaplikasikan dua jenis sensor yang dipasang mengikuti kondisi fisik sungai. Sensor ultrasonik HC-SR04 dipasang tepi sungai mengarah ke permukaan air untuk mengukur jarak antara sensor dan permukaan air secara *real-time*. Sensor ini tidak menyentuh air secara langsung dan mampu mendeteksi fluktuasi ketinggian air berdasarkan waktu pantulan gelombang ultrasonik. Sementara itu sensor arus YF-S201C ditempatkan mendatar dan sejajar dengan aliran air pada dasar sungai guna mengukur kecepatan aliran air berdasarkan jumlah pulsa dari rotor internal yang berputar akibat dorongan air. Penempatan ini memungkinkan sensor arus untuk menangkap kekuatan aliran aktual yang terjadi di dasar aliran di mana kecepatan cenderung lebih stabil. Skema ini mencerminkan konfigurasi alat yang realistis dan mempertimbangkan aspek lingkungan sungai untuk memastikan akurasi dan efisiensi pengukuran. Data dari kedua sensor kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 dan ditransmisikan melalui komunikasi LoRa ke perangkat penerima yang menampilkannya secara *real-time* melalui layar LCD sekaligus

mengklasifikasikan kondisi sungai berdasarkan ambang batas yang telah ditentukan.

Sebagai bagian dari analisis performa alat dilakukan perhitungan laju pertumbuhan ketinggian air dan kecepatan arus untuk mengetahui perubahan kondisi air dalam rentang waktu tertentu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dalam rentang 6,5 jam tinggi air meningkat dari 53,07 cm menjadi 133,01 cm dengan laju kenaikan sebesar 12,29 cm per jam. Sementara itu kecepatan arus meningkat dari 0,000096 m/s menjadi 1,127239 m/s dengan laju pertumbuhan sekitar 0,1734 m/s per jam. Informasi ini menunjukkan pentingnya alat untuk mendeteksi pertumbuhan volume dan arus air yang cepat sebagai indikator awal potensi banjir.

Selain itu alat juga menerapkan pendekatan kalibrasi dan penyesuaian terhadap *error value* guna menghadapi kondisi lingkungan yang dinamis seperti gangguan dari benda mengambang, riak air akibat angin, atau lonjakan air mendadak. Hasil pengujian menunjukkan bahwa keberadaan benda seperti dahan dapat memengaruhi pembacaan sensor HC-SR04. Oleh karena itu alat dilengkapi metode penyaringan data berbasis *moving average* dan ambang waktu (misalnya gangguan harus berlangsung lebih dari 5 detik) agar alat tidak mengirimkan informasi yang menyesatkan. Penyesuaian ini menjadikan alat lebih cerdas dan stabil dalam mengenali kondisi sungai yang sebenarnya.