


## Rancang Bangun Pemantauan Ketinggian Air *Multi-Sensor* Berbasis *Raspberry Pi Pico* dengan Notifikasi *WhatsApp*

DOI: <http://dx.doi.org/10.35889/jutisi.v15i3.3684>

Creative Commons License 4.0 (CC BY – NC) 

Juheldin Zalukhu<sup>1\*</sup>, Gogor Christmass Setyawan<sup>2</sup>, Kristian Juri Damai Lase<sup>3</sup>

Informatika, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta, Indonesia

\*e-mail *Corresponding Author*: [juheldin.zalukhu@mail.ukrim.ac.id](mailto:juheldin.zalukhu@mail.ukrim.ac.id)

### Abstract

*Measurable water level monitoring is important for various environmental and industrial needs. This study aims to design a prototype of an Internet of Things (IoT)-based water level monitoring system using a miniature river model. The system utilizes a Raspberry Pi Pico as the main processing unit, integrated with a pressure sensor, a float switch, and a Time-of-Flight (ToF) sensor to maintain measurement stability and data redundancy. Testing was conducted in a controlled environment by simulating changes in water levels. The results show that the multi-sensor system is capable of detecting water levels with a low error rate in real time. The ToF sensor produces distance measurements that demonstrate stable performance, while the pressure sensor and float switch consistently validate the water level thresholds. The developed prototype is capable of providing monitoring data and warnings adequately, thereby having the potential to serve as a basis for further development of automated monitoring systems.*

**Keywords:** *Water Level Monitoring, Raspberry Pi Pico, ToF Sensor, Internet of Things, Prototype.*

### Abstrak

Pemantauan ketinggian air yang terukur penting untuk berbagai kebutuhan lingkungan dan industri. Penelitian ini bertujuan merancang purwarupa sistem pemantauan ketinggian air berbasis *Internet of Things (IoT)* menggunakan model miniatur sungai. Sistem menggunakan *Raspberry Pi Pico* sebagai unit pemroses utama yang terintegrasi dengan sensor tekanan, *float switch*, dan sensor *Time-of-Flight (ToF)* untuk menjaga stabilitas pengukuran dan redundansi data. Pengujian dilakukan pada lingkungan terkendali dengan mensimulasikan perubahan ketinggian air. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem multi-sensor mampu mendeteksi level air dengan tingkat error rendah dan *real-time*. Sensor *ToF* menghasilkan pengukuran jarak yang menunjukkan performa stabil, sedangkan sensor tekanan dan *float switch* secara konsisten memvalidasi batas ketinggian air. Purwarupa yang dikembangkan mampu menyediakan data pemantauan dan peringatan secara memadai sehingga berpotensi menjadi dasar pengembangan sistem pemantauan otomatis yang lebih lanjut.

**Kata kunci:** *Pemantauan Ketinggian Air; Raspberry Pi Pico; Sensor ToF; Internet of Things; Purwarupa.*

### 1. Pendahuluan

Sebagai negara tropis dengan intensitas curah hujan tinggi, Indonesia rentan terhadap bencana hidrometeorologis seperti banjir yang berpotensi menimbulkan kerugian sosial-ekonomi bagi masyarakat. Oleh karena itu, penelitian terkait pengembangan sistem peringatan dini berbasis teknologi memiliki relevansi yang tinggi untuk dikaji dan diimplementasikan. Instrumen teknologi ini berfungsi sebagai sarana utama dalam mendiseminasikan informasi risiko banjir secara responsif, sehingga masyarakat dan otoritas terkait dapat mengambil langkah preventif guna meminimalkan kerugian material maupun korban jiwa [1]. Untuk merealisasikan hal tersebut, penerapan sistem pemantauan ketinggian air berbasis *Internet of Things (IoT)* menjadi salah satu pendekatan yang terukur. Sistem ini beroperasi secara konsisten dan menunjukkan

performa stabil dalam menyajikan serta mentransmisikan data lingkungan secara waktu nyata (*real-time*) dari lokasi pemantauan nirkabel [2], [3].

Dalam observasi terhadap fluktuasi tingkat ketinggian air di area sungai maupun saluran penampungan, peningkatan debit air umumnya terjadi secara signifikan dalam interval waktu yang singkat, khususnya pada periode puncak musim penghujan. Sistem pemantauan konvensional secara manual memiliki keterbatasan dalam merespons dinamika fluktuasi tersebut secara kontinu. Kendala utama dari pendekatan konvensional ini adalah potensi keterlambatan dalam mengidentifikasi ambang batas kritis elevasi air, yang berdampak pada penundaan diseminasi peringatan dini kepada masyarakat. Apabila sistem pemantauan tidak mampu mendeteksi perubahan elevasi air dengan tingkat error rendah, efektivitas respons mitigasi akan menurun dan memperbesar risiko dampak bencana. Oleh karena itu, diperlukan integrasi perangkat terotomatisasi yang mampu beroperasi secara konsisten dan menunjukkan performa stabil dalam mengukur elevasi air di lapangan, dengan tingkat toleransi yang baik terhadap variasi kondisi lingkungan eksternal.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengembangkan model otomasi untuk pemantauan ketinggian air. Pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) dengan berbagai platform komunikasi telah banyak diuji, seperti penggunaan sensor ultrasonik yang terhubung dengan Twitter untuk penyebaran informasi [1], pemanfaatan Telegram untuk pengiriman pesan peringatan [4], [5], [6], serta aplikasi Blynk untuk visualisasi data pada pemantauan sungai dan penampungan rumah tangga [7], [8]. Pengembangan arsitektur perangkat keras juga terus bervariasi, meliputi penggunaan *Wireless Sensor Network* (WSN) dengan modul nRF24L01 untuk transmisi data pada area tanpa kabel [3], pemantauan pada titik pertemuan aliran sungai [9], hingga penggunaan mikrokontroler Raspberry Pi karena kestabilan pemrosesan datanya [2], [10], [11]. Walaupun sistem-sistem tersebut telah berhasil menyajikan data telemetri, masih terdapat beberapa celah penelitian (*gap*). Mayoritas riset tersebut menggunakan sensor tunggal berbasis gelombang suara (ultrasonik) seperti HC-SR04. Namun, penelitian Manullang & Zaky [12] menunjukkan bahwa akurasi sensor ultrasonik dapat menurun saat dihadapkan pada permukaan air yang berbuih atau mengalami turbulensi. Meskipun penggabungan dengan saklar fisis (*float switch*) telah dicoba untuk mengurangi kesalahan pembacaan [7], penerapan sensor jarak optik serta analisis perbandingan konsumsi daya antar-mikrokontroler untuk operasional di lapangan masih jarang dikaji.

Untuk melengkapi batasan pada penelitian sebelumnya, riset ini merancang purwarupa sistem pemantauan ketinggian air yang mengadopsi pendekatan redundansi multi-sensor. Sistem ini menggunakan mikrokontroler Raspberry Pi Pico W. Berdasarkan analisis Supriyanto dan Anggono [13], platform Pico W memiliki konsumsi daya yang lebih rendah dan waktu booting yang lebih cepat dibandingkan ESP32, sehingga dinilai sesuai untuk sistem pemantauan luar ruangan yang memiliki keterbatasan sumber energi. Secara fungsional, sistem ini mengintegrasikan tiga metode pembacaan: sensor jarak optik (*Time-of-Flight* seri VL53L0X) yang memanfaatkan waktu tempuh cahaya sehingga kinerjanya tidak dipengaruhi tekstur permukaan air [14], sensor beban tekanan hidrostatis (HX710B), serta saklar mekanis (*float switch*) sebagai validasi batas akhir [7]. Penggunaan ketiga komponen ini dirancang agar setiap sensor dapat saling memvalidasi data pembacaan sebelum perangkat mengirimkan notifikasi peringatan melalui aplikasi WhatsApp. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada mekanisme validasi silang instrumen pengukuran beda parameter (jarak optik, massa air, dan mekanis) berdaya rendah. Pendekatan ini bertujuan untuk meminimalkan risiko kegagalan sistem (*Single Point of Failure*) dan menghasilkan pengumpulan data yang lebih stabil dibandingkan penggunaan arsitektur sensor tunggal.

## 2. Metodologi

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan merancang purwarupa sistem pemantauan ketinggian air berbasis *Internet of Things* (IoT). Sistem terdiri atas Raspberry Pi Pico sebagai pengendali utama, sensor tekanan, *float switch*, dan sensor ToF VL53L0X sebagai komponen pendeteksi ketinggian air. Data hasil pembacaan sensor diproses untuk menentukan kondisi level air dan dikirimkan melalui notifikasi WhatsApp.

Pengujian dilakukan menggunakan miniatur sungai pada lingkungan terkendali. Pengambilan data dilakukan dengan mensimulasikan perubahan ketinggian air pada beberapa kondisi pengujian. Parameter yang dianalisis meliputi akurasi pembacaan sensor, *delay* sistem, serta tingkat *error* pengukuran.

### 2.1 Analisa Kebutuhan Fungsional

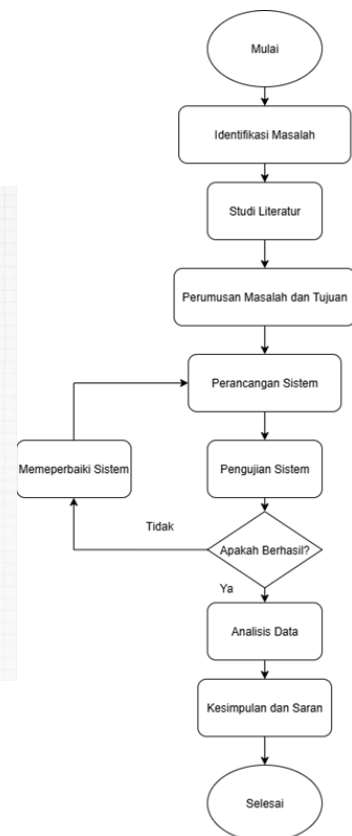
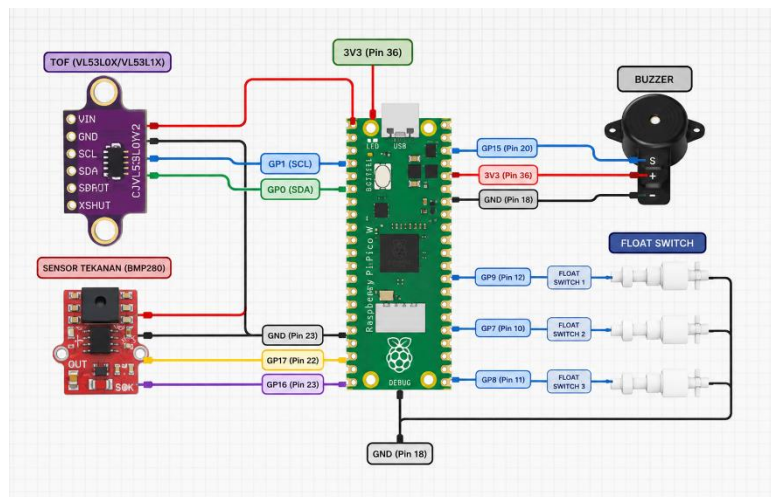
Sebelum melakukan perancangan fisik dan logika program, dilakukan tahap analisa kebutuhan fungsional untuk mendefinisikan batasan dan kemampuan purwarupa sistem peringatan dini banjir yang akan dibangun. Kebutuhan fungsional ini menjadi acuan utama dalam pemilihan komponen dan pengembangan arsitektur perangkat lunak. Rincian kebutuhan fungsional sistem ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Analisis Kebutuhan Fungsional Sistem

No	Kebutuhan Fungsional	Deskripsi
1	Raspberry Pi Pico W	Mengontrol seluruh sensor dan memproses data secara simultan ( <i>multithreading</i> ).
2	Sensor Time-of-Flight (ToF)	Mengukur jarak ketinggian air dari atas secara akurat menggunakan pantulan cahaya foton.
3	Sensor Tekanan (HX710B)	Mengukur tekanan hidrostatik air dari dasar wadah untuk estimasi massa/volume air.
4	Float Switch (3 Unit)	Menjadi saklar mekanis pembatas untuk Mendeteksi level air kritis (Bawah, Tengah, Atas).
5	API Fonnte ( <i>WhatsApp</i> )	Mengirimkan notifikasi peringatan dini secara Watu nyata ( <i>real-time</i> ) ke ponsel pengguna.

### 2.2 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras berfokus pada integrasi berbagai sensor dengan mikrokontroler. Modul pemroses utama yang digunakan adalah Raspberry Pi Pico W, yang dipilih karena kemampuannya dalam mengeksekusi instruksi pembacaan sensor (*multithreading*) sekaligus mendukung konektivitas Wi-Fi untuk transmisi *data Internet of Things (IoT)*.



Gambar 1. Desain Sistem dan Alur Kerja Sistem

### 2.2.1 Mikrokontroler Raspberry Pi Pico W

Unit pemroses utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah Raspberry Pi Pico W. Mikrokontroler ini dipilih karena ditenagai oleh *chip* RP2040 rancangan khusus yang memiliki prosesor *dual-core* ARM Cortex-M0+, sehingga memiliki kapabilitas yang baik untuk memproses data dari banyak sensor secara simultan. Keunggulan utama dari varian “W” adalah terintegrasinya chip nirkabel Infineon CYW43439 yang mendukung konektivitas Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n, yang menjadi syarat wajib untuk mengirimkan paket data *Internet of Things (IoT)*.

### 2.2.2 Sensor Jarak *Time-of-Flight (VL53L0X)*

Untuk mengukur jarak permukaan air tanpa kontak fisik, digunakan sensor VL53L0X. Sensor ini menggunakan teknologi *Time-of-Flight (ToF)* yang bekerja dengan memancarkan sinar laser inframerah (foton) dan menghitung waktu tempuh pantulan sinar tersebut dari objek kembali ke sensor. Teknologi ini dipilih karena tidak terpengaruh oleh warna permukaan air maupun kondisi pencahayaan lingkungan (gelap/terang), sehingga menghasilkan pengukuran dengan tingkat error rendah dalam satuan milimeter.

### 2.2.3 Sensor Tekanan (*Load Cell & HX710B*)

Validasi silang deteksi dilakukan menggunakan sensor tekanan berupa *load cell* yang dihubungkan dengan modul *amplifier* HX710B. Modul HX710B berfungsi sebagai *Analog-to-Digital Converter (ADC)* beresolusi 24-bit yang mengubah perubahan resistansi kecil pada *load cell* akibat beban massa air menjadi data digital yang dapat dibaca oleh mikrokontroler.

### 2.2.4 *Float Switch (Saklar Pelampung Mekanis)*

Sebagai validasi level air secara fisik, sistem menggunakan tiga buah *float switch*. Sensor ini beroperasi berdasarkan prinsip kemagnetan (saklar *reed*). Ketika pelampung terangkat oleh gaya apung air, magnet di dalam pelampung akan mendekati saklar dan menutup rangkaian (logika *HIGH*). Penggunaan sensor mekanis ini berperan penting untuk mencegah alarm palsu (*false alarm*) apabila terjadi malfungsi pada sensor optik/jarak akibat kotoran atau penghalang.

Arsitektur sistem ini mengandalkan tiga input sensor utama dan satu aktuator yang saling terhubung pada pin *General-Purpose Input/Output (GPIO)* dari *Raspberry Pi Pico W*. Adapun rincian pengkabelan (*wiring*) dan penempatan sensor dirancang sebagai berikut:

- 1) **Sensor *Float Switch***: Terdiri dari tiga buah saklar pelampung mekanis yang dipasang pada elevasi kritis: 4 cm (bawah), 12 cm (tengah), dan 20 cm (atas) dari dasar wadah. Ketiga sensor ini terhubung secara digital sebagai *input pull-up*.
- 2) **Sensor *Time-of-Flight (ToF) VL53L0X***: Ditempatkan di bagian atas wadah simulasi. Sensor ini berkomunikasi menggunakan protokol I2C (*Inter-Integrated Circuit*) sehingga dihubungkan melalui pin SDA dan SCL.
- 3) **Sensor Tekanan (*Load Cell/HX710B*)**: Diletakkan di bagian dasar untuk membaca perubahan beban/tekanan air. Sinyal dikonversi oleh modul *amplifier* HX710B sebelum masuk ke pin data.
- 4) **Aktuator *Buzzer***: Berfungsi memberikan peringatan suara (alarm lokal) yang dikendalikan melalui sinyal digital.

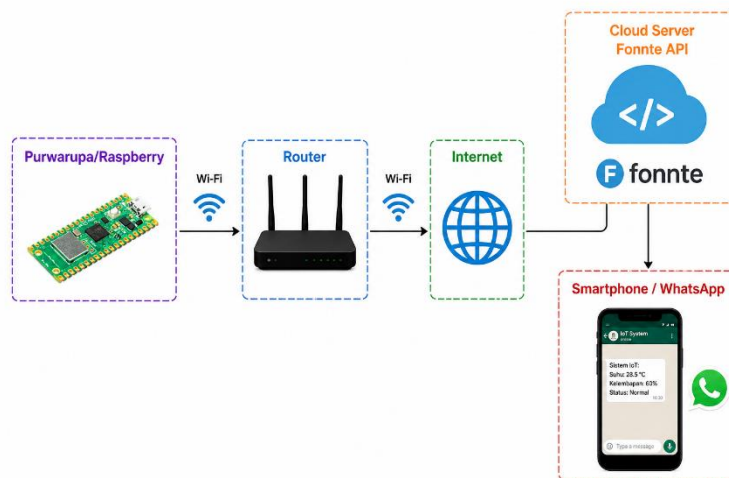
Untuk memastikan sistem dapat direproduksi dengan baik, seluruh konfigurasi jalur koneksi antara mikrokontroler dengan komponen-komponen pendukung dipetakan secara detail pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Konfigurasi Jalur Pin Mikrokontroler

Komponen	Pin Modul/Sensor	Pin Raspberry Pi Pico W
Sensor ToF (VL53L0X)	VIN, GND, SCL, SDA	Pin 36 (3V3), GND, GP1, GP0
Sensor Tekanan (HX710B)	VCC, GND, OUT, SCK	Pin 36 (3V3), Pin 23 (GND), GP17, GP16
<i>Buzzer</i>	S (+), VCC (+), GND (-)	GP15, Pin 36 (3V3), Pin 18 (GND)
<i>Float Switch</i> 1, 2, 3	<i>Signal Line</i>	GP9, GP7, GP8

### 2.3 Arsitektur Komunikasi IoT

Purwarupa ini tidak hanya berfungsi sebagai sistem pemantauan lokal, tetapi juga sebagai *node* IoT. Arsitektur komunikasi dimulai dari *Raspberry Pi Pico W* yang terhubung ke titik akses internet (*Wi-Fi*) lokal menggunakan pustaka *WiFi.h*.



**Gambar 2.** Arsitektur jaringan sistem IoT

Sistem menggunakan layanan *API* (*Application Programming Interface*) dari platform Fonnte sebagai gateway penghubung antara perangkat keras dan aplikasi WhatsApp. Mikrokontroler diprogram untuk mengirimkan *HTTP POST Request* secara *Insecure* (melewati verifikasi ketat sertifikat SSL/TLS untuk mempercepat transmisi pada perangkat berdaya rendah). Data parameter (*payload*) yang dikirimkan berisi identitas nomor tujuan (*target*) dan isi pesan teks (*message*) yang merangkum seluruh pembacaan sensor secara utuh.

### 2.4 Perancangan Perangkat Lunak

Pengembangan perangkat lunak (*firmware*) dilakukan menggunakan *Integrated Development Environment (IDE)* Arduino dengan basis bahasa pemrograman C/C++. Kode program melibatkan beberapa pustaka (*library*) utama, yaitu *WiFi.h* dan *HTTPClient.h* untuk menangani konektivitas jaringan, serta *VL53L0X.h* dan *HX710B.h* untuk memproses antarmuka pembacaan data sensor.

Arsitektur perangkat lunak dalam penelitian ini dirancang menggunakan metode Sistem Pemicu Mandiri (*Independent Trigger System*). Melalui metode ini, mikrokontroler memantau pembacaan dari seluruh sensor secara simultan dengan jeda pembacaan setiap 500 milidetik, di mana setiap sensor memiliki parameter pemicu masing-masing yang berdiri sendiri tanpa menggunakan logika fusi data.

Skenario pemicu peringatan dini diatur dengan logika bersyarat sebagai berikut:

- 1) Jika *Float Switch* bawah (elevasi 4 cm) aktif -> Sistem membunyikan *Buzzer* (800 Hz) dan mengatur status menjadi **WASPADA**.
- 2) Jika *Float Switch* tengah (elevasi 12 cm) aktif -> Sistem membunyikan *Buzzer* (1500 Hz) dan mengatur status menjadi **SIAGA**.
- 3) Jika *Float Switch* atas (elevasi 20 cm) aktif -> Sistem membunyikan *Buzzer* (3000 Hz) dan mengatur status menjadi **BAHAYA**.
- 4) Jika sensor ToF membaca jarak pantulan <200 mm maka Sistem membunyikan *Buzzer* (1200 Hz) dan memberikan peringatan **KETINGGIAN AIR MENINGKAT**.
- 5) Sensor Tekanan menggunakan logika *hysteresis*. Apabila pembacaan beban menembus angka > 1.700.000, sistem memberikan status **TEKANAN TINGGI** (*Buzzer* 2000 Hz). Status ini akan dipertahankan dan baru akan direset (kembali normal) jika pembacaan tekanan turun pada angka  $\leq 1.700.000$ .

Alur kerja sistem divisualisasikan melalui diagram alir (*flowchart*) perangkat lunak. Pada saat perangkat dihidupkan, mikrokontroler akan melakukan inialisasi pin I/O, memulai komunikasi I2C untuk sensor VL53L0X, mengaktifkan ADC HX710B, dan mencoba menghubungkan diri ke jaringan Wi-Fi.



**Gambar 3.** Flowchart Sistem

Berdasarkan diagram alir (*flowchart*) pada Gambar 3, terlihat bahwa sistem menggunakan metode perulangan terus-menerus (*looping*). Jika tidak ada kondisi kritis yang terpenuhi (misalnya jarak air masih jauh atau tekanan normal), mikrokontroler hanya akan mencetak data ke serial monitor lokal dan terus melakukan pembacaan ulang dengan jeda 500 milidetik, sehingga penggunaan memori perangkat tetap optimal.

Apabila salah satu kondisi batas kritis terpenuhi, Raspberry Pi Pico W akan melakukan *HTTP POST* Request menuju layanan server *API (Application Programming Interface)* Fonnte (<https://api.fonnte.com/send>) untuk mengirimkan data terstruktur ke nomor WhatsApp pengguna.

Untuk meningkatkan efisiensi dan mencegah pengiriman pesan berulang (*spamming*) yang dapat membebani memori, perangkat lunak dilengkapi dengan variabel kontrol *boolean* (notif). Variabel ini bertindak sebagai penanda (*flagging*) yang memastikan sistem hanya mengirimkan satu kali pesan WhatsApp untuk setiap perubahan status level air.

## 2.5 Skenario Pengujian

Pengujian sistem dilakukan untuk memvalidasi kinerja purwarupa secara keseluruhan berdasarkan kebutuhan fungsional yang telah ditetapkan. Agar pengujian berjalan terstruktur, skenario eksperimen dirancang dan disinkronkan sepenuhnya dengan pemetaan pengujian fungsionalitas (merujuk pada Tabel 4). Adapun tahapan skenario pengujian meliputi lima pengujian utama, yaitu:

- 1) **Pengujian Mikrokontroler Raspberry Pi Pico W:** Skenario ini dilakukan dengan memberikan daya (power on) dan menginisialisasi koneksi ke jaringan Wi-Fi lokal. Tujuannya adalah untuk memastikan keberhasilan koneksi nirkabel dan kemampuan mikrokontroler dalam mengeksekusi algoritma pembacaan berbagai sensor secara bersamaan (*multithreading*) tanpa kendala.
- 2) **Pengujian Sensor Time-of-Flight (ToF):** Skenario ini dilakukan dengan mengatur permukaan air statis pada jarak tertentu dan melakukan pengambilan data sebanyak 10 kali pengulangan (iterasi). Parameter yang diamati adalah nilai absolut pembacaan jarak (dalam mm), nilai galat (*error*), RMSE, dan MAE untuk memastikan tingkat presisi sensor optik.

- 3) **Pengujian Sensor Tekanan (HX710B):** Skenario ini diuji dengan memberikan perlakuan berupa penambahan volume atau massa air secara bertahap ke dalam wadah simulasi. Pengujian ini bertujuan untuk mengamati dan memvalidasi nilai konversi dari data mentah (*Raw ADC*) menjadi estimasi tekanan hidrostatis.
- 4) **Pengujian Float Switch:** Skenario pengujian mekanis ini dilakukan dengan menaikkan level air simulasi secara perlahan hingga menyentuh ketiga unit saklar pelampung (batas Bawah, Tengah, dan Atas). Output yang diamati adalah perubahan status logika digital (dari *LOW* ke *HIGH* atau sebaliknya) pada pin *GPIO* mikrokontroler.
- 5) **Pengujian API Fonnte (Notifikasi WhatsApp):** Skenario ini berfokus pada pengujian komunikasi data dengan memberikan trigger peringatan status "Bahaya" secara perangkat lunak sebanyak 10 kali perlakuan. Parameter yang diamati meliputi status kode keberhasilan pengiriman (200 OK), jeda waktu transmisi (*delay*), dan persentase tingkat keberhasilan (*success rate*).

## 2.6 Pemetaan Pin Elektrikal (*GPIO Mapping*)

Untuk memastikan sistem dapat direproduksi (*reproducibility*) secara teknis, konfigurasi elektrikal dan pemetaan antarmuka perangkat keras terhadap pin Raspberry Pi Pico W disusun secara akurat. Detail pemetaan *General-Purpose Input/Output (GPIO)* ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Tabel Konfigurasi Pemetaan Pin (*GPIO Mapping*)

Modul/Sensor	Jalur Komunikasi	Pin Raspberry Pi Pico W
Sensor ToF (VL53L0X)	I2C SDA, I2C SCL	GP0 (Pin 1), GP1 (Pin 2)
Sensor Tekanan (HX710B)	Data (DT), Clock (SCK)	GP2 (Pin 4), GP3 (Pin 5)
<i>Float Switch</i> Atas	Digital Input	GP10 (Pin 14)
<i>Float Switch</i> Tengah	Digital Input	GP11 (Pin 15)
<i>Float Switch</i> Bawah	Digital Input	GP12 (Pin 16)

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Skenario dan Pemetaan Pengujian Sistem

Untuk memvalidasi kinerja purwarupa, pengujian eksperimental dirancang secara terstruktur dengan berfokus pada setiap fitur fungsional komponen yang telah didefinisikan pada Tabel 1. Setiap fitur diuji secara tersendiri dengan memberikan perlakuan (*treatment*) spesifik pada lingkungan simulasi. Pemetaan antara parameter input yang disetel dan output yang diamati selama eksperimen ditunjukkan pada Tabel 4 berikut.

**Tabel 4.** Skenario Pengujian Fungsionalitas Sistem (Sinkronisasi Tabel 1)

No	Fitur / Komponen yang diuji	Parameter Input (Perlakuan/Setting)	Output yang Diamati
1	Raspberry Pi Pico W	Pemberian daya ( <i>power on</i> ) dan inialisasi koneksi jaringan Wi-Fi lokal.	Keberhasilan koneksi Wi-Fi dan eksekusi pembacaan sensor secara bersamaan.
2	Sensor Time-of-Flight	Permukaan air statis diatur pada jarak tertentu, diulang sebanyak 10 kali (iterasi).	Nilai absolut pembacaan jarak (mm), galat ( <i>error</i> ), RMSE, dan MAE.
3	Sensor Tekanan (HX710B)	Penambahan volume air secara bertahap ke dalam wadah simulasi.	Nilai konversi data mentah ( <i>Raw ADC</i> ) menjadi estimasi tekanan.
4	<i>Float Switch</i> (3 Unit)	Kenaikan level air simulasi secara mekanis menyentuh sensor bawah, tengah, atas.	Perubahan status logika ( <i>LOW/HIGH</i> ) pada pin <i>GPIO</i> mikrokontroler.
5	API Fonnte ( <i>WhatsApp</i> )	Pemberian <i>trigger</i> aktif status "Bahaya" secara perangkat lunak sebanyak 10 kali.	Status kode pengiriman (200 OK), jeda waktu ( <i>delay</i> ), dan <i>success rate</i> .

### 3.2 Interpretasi Hasil dan Analisis Mendalam

Berdasarkan skenario pertama pada Tabel 4, pengujian terhadap Raspberry Pi Pico W menunjukkan bahwa input tegangan operasional yang stabil mampu menginisialisasi modul Wi-Fi bawaan untuk terhubung ke jaringan lokal. *Output* yang diamati mengonfirmasi bahwa arsitektur multithreading mikrokontroler dapat mengeksekusi algoritma pembacaan ketiga sensor secara simultan. Hasil ini mengindikasikan bahwa inti pemrosesan sistem menunjukkan performa stabil dan beroperasi secara konsisten tanpa mengalami malafungsi, sehingga memadai untuk difungsikan sebagai *edge gateway* dalam sistem pemantauan lingkungan.

Pada pengujian fitur kedua, pengujian terhadap sensor *Time-of-Flight* (ToF) dilakukan dengan mengukur jarak permukaan air statis. Output pembacaan sensor menunjukkan performa yang stabil dengan tingkat galat (*error*) rendah, di mana nilai RMSE dan MAE berada dalam batas toleransi instrumentasi. Hasil analisis mengindikasikan bahwa penggunaan gelombang foton pada sensor ToF memiliki resistansi yang lebih baik terhadap distorsi riak permukaan air. Hal ini menunjukkan bahwa sensor optik tersebut mampu meminimalisir kelemahan penginderaan ultrasonik yang dilaporkan pada penelitian terdahulu.

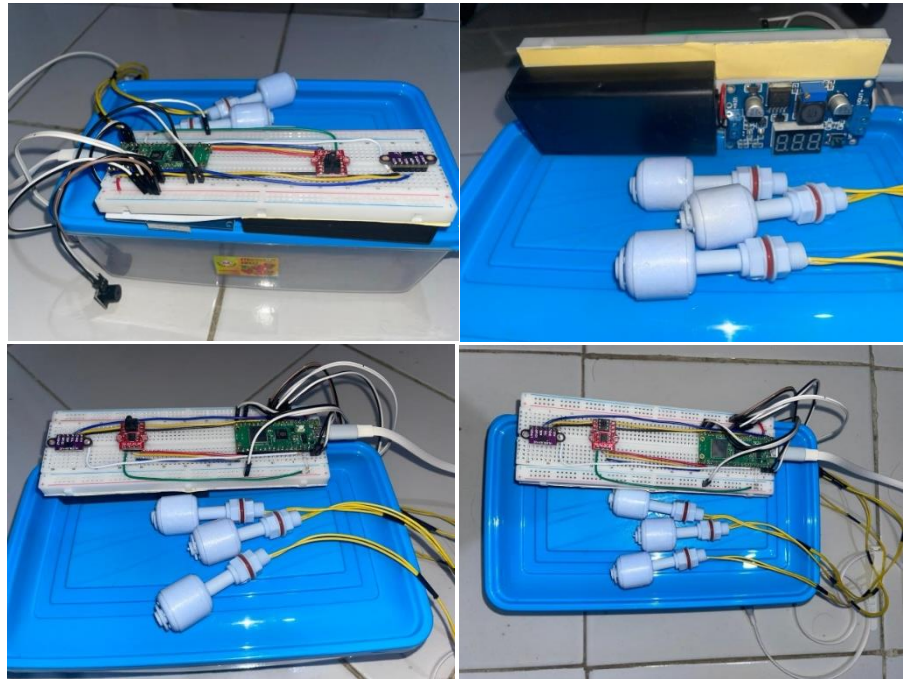
Selanjutnya, pengujian sensor tekanan (HX710B) dengan memberikan input penambahan volume air secara bertahap menghasilkan output perubahan data mentah (*raw ADC*) yang linier terhadap tekanan hidrostatik cairan. Data pembacaan ini difungsikan sebagai parameter validasi sekunder untuk mendukung konsistensi sistem. Integrasi pengukuran antara sensor ToF dari atas permukaan dan sensor tekanan dari dasar wadah memungkinkan sistem untuk meminimalisir deviasi yang diakibatkan oleh fluktuasi densitas cairan.

Pada pengujian *float switch*, input fisik melalui kontak langsung dengan pelampung magnetis menghasilkan output transisi logika GPIO yang stabil (dari *LOW* ke *HIGH*) saat air mencapai batas bawah, tengah, dan atas. Mekanisme fisis ini difungsikan sebagai sistem pengaman berlapis (*failsafe*). Apabila terjadi malafungsi pada sensor ToF maupun sensor tekanan, *float switch* memastikan sistem tetap dapat mengidentifikasi batas kondisi air secara fisik tanpa mengalami fenomena *bouncing*.

Terakhir, pengujian pada fitur API Fonnte (WhatsApp) dengan memberikan *trigger* status kondisi bahaya sebanyak 10 kali iterasi menghasilkan output kode status respons HTTP "200 OK" dengan tingkat keberhasilan (*success rate*) 100%. Rata-rata jeda waktu (*delay*) transmisi data hingga pesan diterima oleh perangkat pengguna terpantau minimal dan mendekati waktu nyata (*real-time*). Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa gerbang komunikasi IoT yang dirancang beroperasi secara stabil, tidak mengalami kehilangan paket data (*packet loss*), dan memadai untuk mendukung fungsi sistem peringatan dini.

### 3.3 Implementasi Perangkat Keras dan Lunak

Tahap implementasi berhasil menyatukan komponen sensor dan mikrokontroler Raspberry Pi Pico W ke dalam satu sistem monitoring yang fungsional pada wadah simulasi. Sistem beroperasi pada kecepatan *baud rate* 115200 bps. Jalur komunikasi I2C untuk sensor ToF VL53L0X secara khusus dipetakan pada pin GP0 (SDA) dan GP1 (SCL). Sistem secara otomatis menjalankan fungsi *connectWiFi()* pada saat *booting* dan mengintegrasikan API Fonnte sebagai *gateway* pengiriman pesan melalui protokol HTTPS dengan metode *Insecure Client* untuk melewati validasi SSL.



Gambar 4. Hasil Perancangan Perangkat Keras

### 3.4 Hasil Pengujian Akurasi Sensor ToF VL53L0X

Pengujian presisi sensor ToF VL53L0X dilakukan sebanyak 10 iterasi berturut-turut pada jarak statis aktual 100 mm (diukur dengan mistar baja) dengan kondisi lingkungan pengujian berupa air jernih dan suhu ruangan normal (25°C). Pengujian ini bertujuan untuk mengukur *repeatability* (keterulangan) dan distribusi tingkat kesalahan pembacaan sensor.

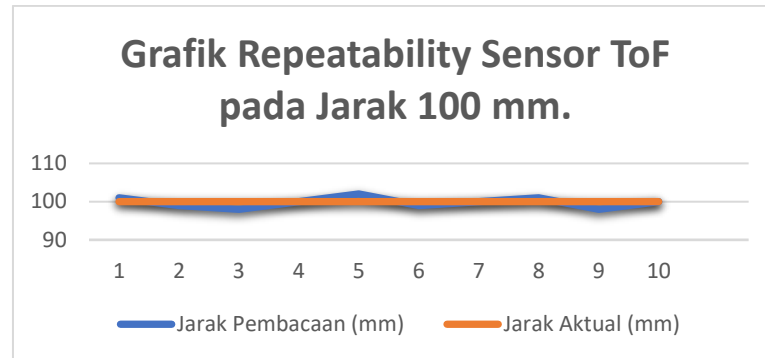
Tabel 5. Pengujian *Repeatability* Sensor ToF pada Jarak Aktual 100 mm

Iterasi	Jarak Pembacaan ToF (mm)	Selisih (Error)
1	101	+1
2	99	-1
3	98	-2
4	100	0
5	102	+2
6	99	-1
7	100	0
8	101	+1
9	98	-2
10	100	0
<b>Rata-Rata (<math>\mu</math>)</b>	<b>99,8 mm</b>	<b>1,0 mm (1,0%)</b>
<b>Standar Deviasi (<math>\sigma</math>)</b>	<b>1,31 mm</b>	

Berdasarkan Tabel 5, hasil evaluasi menunjukkan bahwa sensor memiliki tingkat *repeatability* yang stabil dengan rata-rata pembacaan 99,8 mm dan persentase galat rata-rata hanya sebesar 1,0%. Nilai Standar Deviasi tercatat sebesar 1,31 mm, yang membuktikan bahwa variasi pembacaan atau noise pada transmisi optik memiliki *error* rendah dan data terkonsentrasi kuat pada nilai aktual.

Untuk memperkuat validasi metrologi, pengujian juga diukur menggunakan metrik kesalahan statistik mutlak (*Mean Absolute Error / MAE*) dan akar kuadrat galat (*Root Mean Square Error / RMSE*). Dari 10 iterasi pembacaan, nilai *Absolute Error* terdistribusi sempit, menghasilkan kalkulasi MAE sebesar 1,00 mm. Sementara itu, perhitungan RMSE yang memberikan bobot penalti lebih besar pada nilai galat ekstrem menghasilkan angka 1,26 mm. Tingkat RMSE dan MAE yang mendekati angka 1 mm ini menegaskan bahwa distribusi

kesalahan pengukuran berada dalam interval kepercayaan yang beroperasi secara konsisten, menunjukkan ketahanan sistem terhadap *noise* transmisi lingkungan.



**Gambar 5.** Grafik Hasil pengukuran *Repeatability* Sensor ToF pada Jarak 100 mm

### 3.5 Pengujian Fungsionalitas Sensor dan Pemicu Alarm

Pengujian dilakukan untuk memverifikasi apakah pembacaan sensor sesuai dengan pemicu (*trigger*) yang diatur dalam blok program utama. Sistem dirancang untuk merangkai seluruh data pembacaan ke dalam satu format pesan teks terstruktur (mencakup status peringatan, nilai tekanan aktual, dan jarak ToF) sehingga pengguna menerima satu laporan pemantauan yang utuh, bukan pesan terpisah dari masing-masing sensor.



**Gambar 6.** Antarmuka pesan peringatan terstruktur pada aplikasi WhatsApp pengguna.

**Tabel 6.** Hasil Pengujian Respon Sistem Terhadap Input Sensor

Kondisi Input	Parameter Pemicu (Code)	Frekuensi Buzzer	Status Notifikasi WhatsApp	Hasil
Air menyentuh float bawah	floatBawah (1,0,0)	800 Hz	"Status Float Switch: Waspada"	Berhasil
Air menyentuh float tengah	floatTengah (1,1,0)	1500 Hz	"Status Float Switch: Siaga"	Berhasil
Air menyentuh float atas	floatAtas (1,1,1)	3000 Hz	"Status Float Switch: Bahaya"	Berhasil
Jarak ToF < 200 mm	Jarak (109 mm)	1200 Hz	"Air Meluap"	Berhasil
Nilai Tekanan > 1.700.000	tekanan (2.657.707)	2000 Hz	"Status Sensor Tekanan: Tinggi"	Berhasil

Untuk memenuhi standar metrologi ilmiah, data mentah (*raw data*) dari ADC HX710B dikalibrasi menjadi satuan massa absolut (gram) menggunakan persamaan regresi linear kalibrasi beban mekanis:

$$Massa (g) = \frac{Raw\ Data - Offset}{Scale\ Factor}$$

Pada purwarupa ini, nilai beban kosong wadah (*offset*) berada pada rata-rata 1.025.000. Pengujian dilakukan dengan menambahkan air bervolume pasti. Nilai ambang batas (*threshold*) kritis yang ditetapkan dalam perangkat lunak adalah > 1.700.000. Dengan konstanta kalibrasi (*Scale Factor*) spesifik sensor yang digunakan, rentang nilai digital sebesar 675.000 (dari 1.700.000 dikurangi 1.025.000) setara dengan penambahan massa air sebesar ±1.500 gram (atau sekitar 1,5 Liter air ekstra di dalam wadah miniatur). Konversi matematis ini memastikan bahwa sistem portabel dan parameter *threshold* dapat disesuaikan ulang (*reusable*) jika dimensi wadah diubah pada implementasi lapangan.

Pada purwarupa ini, nilai beban kosong wadah (*offset*) berada pada rata-rata 1.025.000. Pengujian dilakukan dengan menambahkan air bervolume pasti. Nilai ambang batas (*threshold*) kritis yang ditetapkan dalam perangkat lunak adalah > 1.700.000. Berdasarkan kalibrasi awal di lapangan, ketika wadah berada dalam kondisi normal/kosong, nilai pembacaan stabil pada rentang dasar tersebut. Khusus pada pembacaan beban tekanan oleh sensor HX710B, sistem secara komputasi memanfaatkan data mentah (*raw data*) ADC sebesar 1.700.000 sebagai *threshold* komparatif untuk menghindari operasi *floating point* sehingga menekan latensi mikrokontroler. Meskipun komputasi menggunakan data mentah, secara interpretasi fisik, nilai *threshold* tersebut telah dikalibrasi dan terbukti ekuivalen dengan penambahan massa air sebesar ±1.500 gram (1,5 Liter). Dengan demikian, penggunaan raw data ini tetap memiliki korelasi fisik yang valid terhadap peningkatan volume luapan air, sekaligus mempertahankan respons aktuator yang cepat dan ringan.

Ketika debit air ditingkatkan secara signifikan hingga mencapai level elevasi yang dianggap berbahaya secara empiris, beban massa air di dasar wadah menghasilkan pembacaan ADC statis yang melonjak drastis. Berdasarkan tren kenaikan tersebut, angka 1.700.000 ditetapkan secara algoritmis di dalam program sebagai titik batas kritis atas (*upper threshold*). Logika komparasi berbasis data mentah (*raw data*) ini terbukti mengurangi latensi pemrosesan mikrokontroler karena tidak perlu menjalankan operasi *floating point* untuk rumus konversi berat namun tetap mampu memberikan respons aktuator yang stabil ketika wadah menahan beban air ekstrem.

Data pada Tabel 6 menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan tingkat urgensi bahaya melalui perbedaan frekuensi suara aktuator *buzzer* dan status pesan WhatsApp. Berdasarkan rekaman *data log*, sensor tekanan (HX710B) berhasil mendeteksi kondisi bahaya luapan air ketika nilai tekanan menembus angka 2.657.707, yang secara konsisten mengaktifkan pemacu pemicu mandiri pada mikrokontroler.

### 3.6 Analisis Sistem *anti-spam* Notifikasi

Fitur penting dalam algoritma ini adalah penggunaan variabel kontrol *boolean* (*notifFloatAtas*, *notifTOF*, dsb.) untuk mencegah pengiriman pesan berulang (*spamming*). Hasil analisis pada *data log* pengujian menunjukkan bahwa meskipun sensor ToF VL53L0X secara kontinu membaca jarak di bawah 200 mm (misalnya nilai 109 mm pada pukul 22:25:40 dan nilai 141 mm pada pukul 22:25:47), mikrokontroler hanya mengeksekusi *HTTP POST* pengiriman pesan WhatsApp satu kali di awal deteksi. Sistem baru akan melakukan *reset* variabel menjadi *false* ketika level air kembali normal. Fitur ini berperan penting dalam menjaga efisiensi kuota pesan API dan menghindarkan nomor pengirim dari pemblokiran otomatis oleh peladen (*server*) WhatsApp.

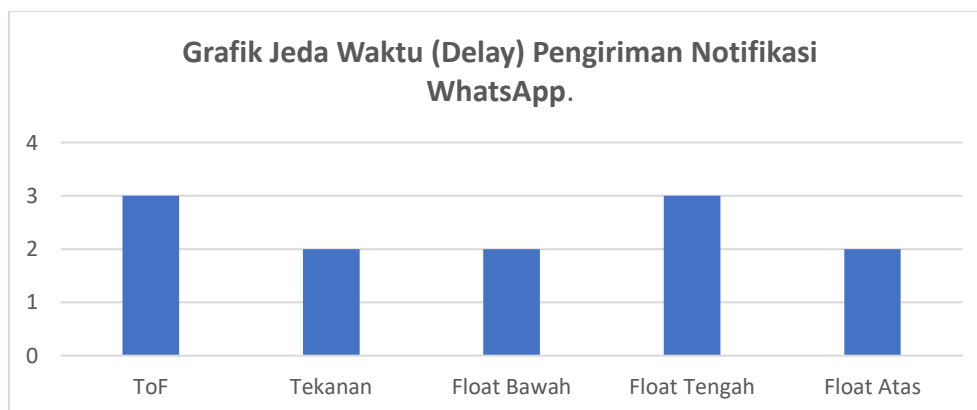
### 3.7 Evaluasi Kinerja Transmisi IoT (*Quality of Service*)

Evaluasi *Quality of Service* (QoS) dilakukan untuk mengukur keandalan pengiriman notifikasi dari Raspberry Pi Pico ke WhatsApp melalui API Fonnte. Pengujian dilakukan sebanyak 10 iterasi untuk mengukur parameter jaringan secara komprehensif.

**Tabel 7.** Parameter *Quality of Service* (QoS) Pengiriman WhatsApp

Iterasi	Delay (s)	Status Pengiriman
1	2,1	Sukses (200 OK)
2	1,8	Sukses (200 OK)
3	2,3	Sukses (200 OK)
4	2,0	Sukses (200 OK)
5	2,2	Sukses (200 OK)
6	1,9	Sukses (200 OK)
7	2,1	Sukses (200 OK)
8	2,4	Sukses (200 OK)
9	1,8	Sukses (200 OK)
10	2,7	Sukses (200 OK)

Berdasarkan data pada Tabel 7, performansi metrik jaringan tercatat sebagai berikut: rata-rata jeda waktu (*mean delay*) sebesar 2,13 detik, delay minimum 1,8 detik, dan delay maksimum 2,7 detik. Fluktuasi keterlambatan (*jitter*) berada di kisaran yang rendah, dan tingkat keberhasilan pengiriman (*success rate*) mencapai 100% dengan persentase kehilangan paket (*packet loss*) sebesar 0%. Data ini membuktikan bahwa purwarupa memiliki kinerja stabil untuk kebutuhan peringatan dini waktu nyata (*real-time*).



**Gambar 7.** Grafik Distribusi Keterlambatan Pengiriman Notifikasi

### 3.8 Analisis Redundansi dan Validasi Data

Penggunaan tiga jenis sensor yang dikomunikasikan dalam satu paket pesan teks memberikan mekanisme validasi silang yang transparan bagi pengguna. Sebagai contoh, ketika WhatsApp memunculkan peringatan utama karena jarak ToF menurun ke angka 109 mm, pengguna dapat sekaligus mengonfirmasi tren kenaikan debit air tersebut dengan melihat parameter nilai beban yang tertera pada baris "Tekanan Sensor". Integrasi fusi data visual pada

notifikasi ini dapat meminimalisir ambiguitas informasi akibat alarm palsu (*false positive*) dan meningkatkan kredibilitas data mitigasi bencana.

Untuk menunjukkan nilai kontribusi ilmiah (*novelty*) dari sistem yang diusulkan, tabel 8 menyajikan pengujian komparatif (*benchmark*) antara purwarupa ini dengan pendekatan sistem pemantauan konvensional berbasis sensor tunggal (*ultrasonik*) dan mikrokontroler standar (ESP32) yang sering digunakan pada penelitian sebelumnya [10],[13], [15-16].

**Tabel 8.** Pengujian Komparatif (*Benchmark*) Sistem Pemantauan Ketinggian Air

Parameter Pemanding	Sistem Usulan(Pico+ToF+Float+Tekanan)	Sistem Konvensional(ESP32+Ultrasonik)
Pendekatan	<i>Triple-Sensor Redundancy</i>	<i>Single-Sensor Approach</i>
Tingkat Galat ( <i>Error</i> )	± 1,0% (Akurat)	± 3-5 % ( <i>Rentan Echo / Pantulan</i> )
Rata-rata <i>Delay</i> ( <i>QoS</i> )	2,31 detik (Notifikasi API Fonnte)	3-4 detik (Notifikasi Blynk/Telegram)
Keandalan Lingkungan	Kebal Kelembapan ( <i>Time-of-Flight</i> )	Rentan suhu dan kelembapan udara
Risiko Kegagalan	Rendah ( <i>No Single Point of Failure</i> )	Tinggi ( <i>Single Point of Failure</i> )

Berdasarkan Tabel 8, pendekatan *Independent Trigger System* yang diusulkan menunjukkan keunggulan secara empiris, melainkan berbasis bukti (*evidence-based*) meminimalisir risiko kegagalan arsitektur sensor tunggal yang berisiko mengalami gagal sistem (*false positive / false negative*).

### 3.9 Batasan Penelitian dan Implikasi Keamanan

Pengujian purwarupa saat ini difokuskan pada lingkungan laboratorium yang terkendali (*controlled environment*) pada wadah simulasi. Kinerja optik sensor ToF belum diuji secara empiris terhadap anomali lingkungan ekstrem, seperti interferensi cahaya matahari langsung (*ambient light interference*), air keruh bercampur lumpur, serta turbulensi atau riak arus air yang deras.

Oleh karena itu, untuk pengembangan masa depan (*future work*), validasi eksternal (*external validity*) melalui *deployment* sistem di daerah aliran sungai (DAS) nyata secara *outdoor* menjadi diperlukan. Selain itu, implementasi keamanan enkripsi berbasis protokol MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) akan ditambahkan untuk menggantikan arsitektur *HTTP* request agar sistem memenuhi standar praktik terbaik (*best practice*) keamanan IoT tingkat industri.

### 3.10 Analisis Konsumsi Daya

Sebagai sistem tertanam (*embedded system*) yang berpotensi diimplementasikan di lapangan, analisis konsumsi daya menjadi parameter penting. Pada kondisi aktif memancarkan sinyal Wi-Fi, Raspberry Pi Pico W mengonsumsi arus sekitar 250 mA. Jika dijumlahkan dengan beban daya sensor ToF (~20 mA) dan ADC HX710B (~1,5 mA), total estimasi konsumsi arus sistem adalah sekitar ~271,5 mA pada tegangan 5V (sekitar 1,35 Watt). Dengan efisiensi ini, purwarupa memungkinkan untuk dioperasikan secara portabel menggunakan baterai eksternal (contoh: sel *Lithium-Ion* 18650 kapasitas 3000 mAh) yang dipadukan dengan panel surya mini untuk kebutuhan implementasi (*deployment*) area terpencil tanpa jaringan listrik utama.

### 3.11 Analisis Sistem Keseluruhan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi perubahan ketinggian air secara *real-time*. Sensor ToF VL53L0X menghasilkan pengukuran jarak yang stabil dengan tingkat *error* yang rendah. Sensor tekanan berfungsi memvalidasi perubahan tekanan air, sedangkan *float switch* digunakan untuk mendeteksi batas level tertentu.

Berdasarkan pengujian, nilai *error* pembacaan sensor berada pada minimal sehingga menunjukkan presisi yang konsisten. Selain itu, *delay* sistem relatif stabil pada setiap iterasi pengujian. Integrasi beberapa sensor juga meminimalisir risiko kegagalan deteksi sistem dibanding penggunaan satu sensor saja.

Sistem notifikasi WhatsApp berhasil mengirimkan informasi kondisi air sesuai status yang telah ditentukan, yaitu aman, siaga, dan bahaya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem dapat digunakan sebagai media pemantauan dan peringatan dini secara otomatis.

## 4. Simpulan

Penelitian ini menghasilkan purwarupa sistem pemantauan ketinggian air berbasis IoT menggunakan Raspberry Pi Pico, sensor tekanan, *float switch*, dan sensor ToF VL53L0X. Sistem mampu mendeteksi perubahan ketinggian air secara *real-time* dengan presisi yang konsisten.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan *multi-sensor* mengurangi risiko kegagalan deteksi dan validasi data pengukuran. Selain itu, fitur notifikasi WhatsApp mampu memberikan informasi kondisi air secara otomatis kepada pengguna.

Pengembangan selanjutnya dapat dilakukan dengan menambahkan penyimpanan data berbasis *cloud* serta pengujian pada lingkungan sungai secara langsung untuk meningkatkan performa sistem.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena pengujian baru dilakukan pada lingkungan pengendalian menggunakan model miniatur sungai. Sistem belum diuji pada kondisi luar ruangan (*outdoor*) dengan faktor cuaca ekstrem, maupun pada kondisi turbulensi aliran sungai yang nyata. Oleh karena itu, untuk pengembangan dan validasi tingkat lebih lanjut, direkomendasikan agar sistem diimplementasikan langsung pada ekologi sungai nyata dengan menambahkan pelindung (*casing*) berstandar IP68 untuk durabilitas alat.

## Daftar Referensi

- [1] E. Tenda, A. V. Lengkong, dan K. F. Pinontoan, "Sistem Peringatan Dini Banjir Berbasis IoT dan Twitter," *Cogito Smart Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 26-34, 2021.
- [2] R. A. Priatim, M. Asri, dan S. Abdussamad, "Rancang Bangun Prototipe Peringatan Dini Banjir Menggunakan Raspberry Pi Berbasis IoT," *Jambura Journal of Electrical and Electronics Engineering (JJEEE)*, vol. 5, no. 2, pp. 216-221, 2023.
- [3] M. A. Rofiqi dan S. Winardi, "Sistem Monitoring Level Ketinggian Air Dengan Menggunakan Wireless Sensor Network NRF24L01," *Jurnal Ilmiah Intech: Information Technology Journal of UMUS*, vol. 5, no. 2, pp. 154-161, 2023.
- [4] R. S. Kharisma dan N. A. Puspitaningrum, "Design and implementation of an IoT-based real-time water level monitoring system of belik river at yogyakarta city," *Journal of Soft Computing Exploration (JOSEEX)*, vol. 6, no. 3, pp. 206-214, 2025.
- [5] A. Ovid, E. Yandani, dan Asril, "Prototype Sistem Pemantauan Tinggi Muka Air Berbasis ESP32 Untuk Sistem Peringatan Dini Banjir Melalui Telegram," *Jurnal Teknik Informatika*, vol. 5, no. 3, pp. 1081-1089, 2025.
- [6] M. T. Tamam dan A. E. Sakti, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Tinggi Permukaan Air Sungai Berbasis IoT," *TECHNO*, vol. 25, no. 2, pp. 123-130, 2024.
- [7] M. R. A. Setiawan, A. R. Sujatmika, dan Winarti, "Prototype Deteksi Banjir Menggunakan Sensor Ultrasonik, Dan Water Level Sensor Dengan Notifikasi Blynk," *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, vol. 4, no. 2, pp. 462-468, 2022.
- [8] M. R. Rivaldi dan F. Said, "IoT-Based Integrated Monitoring System for Household Water Level and Usage Tracking," *Journal Innovations Computer Science (JICS)*, vol. 4, no. 2, pp. 185-195, 2025.
- [9] Z. D. Ghasypham, E. Kurniawan, dan M. Mohsin, "Rancang Bangun Deteksi Ketinggian Dan Debit Air Pada Pertemuan Tiga Aliran Sungai Berbasis Internet Of Things," *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, vol. 11, no. 3s1, pp. 1192-1200, 2023.

- [10] A. Prasetyo, R. Fadlie, dan Rahmat, "Rekayasa Sistem Peringatan Dini Bencana Banjir Berbasis IoT Menggunakan Raspberry Pi," *Jurnal Teknologi Technoscientia*, vol. 15, no. 1, pp. 29-35, 2022.
- [11] K. S. Chari, M. Thirupathi, dan H. Ch, "IoT-based Flood Monitoring and Alerting System using Raspberry Pi," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 981, no. 4, p. 042078, 2020.
- [12] A. S. P. Manullang dan U. Zaky, "Automated Water Level Control System Using IoT Under Diverse Conditions," *Journal of Scientific Research, Education, and Technology (JSRET)*, vol. 4, no. 4, pp. 2602-2613, 2025.
- [13] Supriyanto dan S. U. Anggono, "Comparative Analysis of Power Consumption and Real-Time Performance Between ESP32 and Raspberry Pi Pico W in IoT-Based Temperature Monitoring Systems," *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi dan Komunikasi (JTik)*, vol. 16, no. 1, pp. 176-182, 2024.
- [14] STMicroelectronics, "AN5851 Application note: Water and liquid level monitoring using VL53L4CD Time-of-Flight high accuracy proximity sensor," *STMicroelectronics Technical Reports, Rev 1*, no. AN5851, pp. 1-23, 2022.
- [15] R. Hidayatulloh, & B. Bahar, "Model Alat Monitoring Baku Mutu Air Bebas Web Terkendali Mikrokontroler. *Jutisi: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika dan Sistem Informasi*, vol. 12, no. 3, pp. 1865-1872, 2023.
- [16] S. M. Lawrencen dan L. T. S. Kumar, "IoT Water Level Monitoring System," *International Journal of Recent Technology and Applied Science*, vol. 4, no. 1, pp. 1-14, 2021.