

DESAIN SCADA IOT UNTUK MONITORING DAN KONTROL TANDON AIR PADA SISTEM PENYEDIAAN AIR BERSIH DILENGKAPI AKSES VIA TELEGRAM

Radityo Indrastata¹, Aryuanto Soetedjo², Widodo Pudji Muljanto³

Teknik Elektro S-1, Institut Teknologi Nasional, Malang Indonesia

¹radityo.indrastata@gmail.com, ²aryuanto@lecturer.itn.ac.id, ³widodo_pm@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem SCADA IoT untuk monitoring dan kontrol tandon air pada sistem penyediaan air bersih dilengkapi akses via Telegram Bot API. ESP32 berperan sebagai bridge komunikasi antara Haiwell SCADA dan aplikasi Telegram melalui protokol Modbus TCP/IP sehingga operator dapat memantau level air, debit, dan volume tandon secara jarak jauh serta mengendalikan pompa melalui perintah Telegram Bot. Debit dan volume air dihitung secara matematis menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04 yang sudah terpasang tanpa penambahan flowmeter konvensional. Sistem diujikan pada prototipe tiga tandon berbentuk frustum dengan pompa DC 12V. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata Error FSO water level di bawah 2%, debit air dengan rata-rata selisih fisik 0,19 hingga 1,47 L per menit pada ketiga tandon, serta volume dengan rata-rata Error FSO di bawah 2% pada ketiga tandon. Notifikasi monitoring memiliki rata-rata delay 2,25 detik hingga 2,32 detik, Early Warning System 3,54 detik hingga 3,61 detik, dan kontrol pompa 2,24 detik hingga 2,79 detik. Seluruh pengujian mencapai tingkat keberhasilan 100%.

Kata Kunci: SCADA, IoT, Water Level Control, Telegram Bot, ESP32, HC-SR04, Modbus TCP/IP, Haiwell SCADA

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Air bersih merupakan kebutuhan utama manusia yang digunakan setiap hari untuk berbagai keperluan seperti minum, memasak, dan mencuci [1][2]. Peran tandon air menjadi penting untuk menjamin ketersediaan air[3], namun masih banyak sistem pengisian tandon yang menggunakan metode manual sehingga berpotensi menyebabkan tandon meluap atau kosong akibat kurangnya kontrol [4].

Permasalahan ini dapat diatasi dengan sistem Water Level Control (WLC) berbasis SCADA. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) menyediakan infrastruktur pemantauan real-time, pengendalian, pengumpulan data, peringatan, dan akses jarak jauh yang meningkatkan efisiensi operasional sistem pengolahan air [5][6]. yang dapat diakses melalui bantuan Human Machine Interface (HMI). HMI

memungkinkan interaksi antara manusia dan mesin atau sistem komputer [7]

Sistem WLC berbasis Haiwell SCADA telah dikembangkan sebelumnya pada penelitian "Desain SCADA Untuk Otomasi Sistem Pengisian Tangki Air Pada Unit Pengelola Air Bersih" [8] dan berhasil membuktikan kemudahan pengisian secara manual dan otomatis. Namun sistem tersebut masih memiliki keterbatasan: belum memiliki fitur notifikasi real-time, belum dilengkapi pembacaan debit air, dan operator tidak dapat memonitor, mengontrol, dan menerima peringatan ketika terjadi gangguan saat tidak berada di lokasi.

Untuk mengatasi keterbatasan notifikasi, Haiwell SCADA sebenarnya memiliki aplikasi mobile namun aplikasi tersebut hanya dapat dikoneksikan ke perangkat khusus (Haiwell SCADA) dan mengharuskan operator mempelajari aplikasi tersebut yang menyebabkan kurang fleksibel bagi pemula. Solusi yang dikembangkan adalah pemanfaatan Telegram Bot API melalui ESP32 sebagai bridge antara SCADA dan pengguna. Abd Halim et al.[9] membuktikan Telegram dapat diandalkan sebagai media peringatan dini pemantauan level air, Olnes Yosefa [10] membuktikan kelayakan ESP32 dan Telegram Bot dalam sistem rumah pintar, sedangkan Rihadatul 'Aisy[11] menunjukkan keberhasilan Telegram untuk monitoring smart water heater real-time dengan penghematan energi hingga 25%.

Untuk pembacaan debit air, solusi umum yang tersedia adalah sensor flowmeter, namun penambahan sensor tersebut akan menambah biaya pemasangan dan pembelian perangkat baru. Mengingat sistem WLC yang dikembangkan sudah dilengkapi sensor ultrasonik untuk monitoring water level, sensor yang sama dapat dimanfaatkan untuk menghitung debit air tanpa biaya tambahan. Suryana A. [12] dan Gurum A.P. & Warsito [13] membuktikan bahwa sensor ultrasonik mampu mengukur debit air dengan tingkat kesalahan yang dapat diterima masing-masing 4,2% dan 2,4%.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini merupakan pengembangan sistem sebelumnya “Desain SCADA Untuk Otomasi Sistem Pengisian Tangki Air Pada Unit Pengelola Air Bersih”, dimana bagian yang dikembangkan adalah akses Notifikasi, Monitoring, dan Kontrol via smartphone dengan menggunakan Telegram Bot serta penambahan monitoring debit air menggunakan Sensor ultrasonik.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Penelitian Terdahulu

Abd Halim et al. [9] mengembangkan sistem peringatan dini otomatis untuk pemantauan ketinggian dan kualitas air sungai menggunakan Telegram Bot API. Hasil pengujian menunjukkan Telegram dapat diandalkan sebagai media komunikasi cepat untuk peringatan dini, meski sistem prototipe belum diuji pada lingkungan nyata. Olnes Yosefa [10] melakukan studi kelayakan penggunaan ESP32 dan Telegram Bot dalam Smart Home System. Sistem mampu mengirimkan informasi kondisi beban secara akurat dan menjalankan perintah dari Telegram, dengan variasi delay yang dipengaruhi penyedia internet.

Suryana A.[12] meneliti pengukuran debit air menggunakan sensor JSN-SR04 pada pipa horizontal dengan metode segment area, menghasilkan kesalahan debit 4,2%. Gurum A.P. & Warsito [13] mengimplementasikan transduser ultrasonik pada saluran terbuka menggunakan persamaan Manning dengan kesalahan debit 2,4%. Sistem WLC penelitian sebelumnya [8] masih terbatas pada jaringan lokal, belum memiliki akses saat diluar jaringan lokal dan fitur pembacaan debit air.

B. Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) adalah jaringan yang menghubungkan berbagai sensor dengan internet [14]. Arsitektur umum IoT terdiri dari empat lapisan utama: (i) *Lapisan Persepsi* — lapisan fisik yang dilengkapi sensor untuk mendeteksi dan mengumpulkan informasi lingkungan; (ii) *Lapisan Jaringan* — bertanggung jawab menghubungkan perangkat pintar dan mentransmisikan data; (iii) *Lapisan Middleware* — memproses dan menyimpan data; dan (iv) *Lapisan Aplikasi* — menyediakan layanan khusus kepada pengguna seperti rumah pintar dan kota pintar [15][16].

C. ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems sebagai pengembangan dari ESP8266. Terdapat modul Wi-Fi terintegrasi dalam chip sehingga dapat diaplikasikan untuk sistem IoT. Pemrograman ESP32 dapat dilakukan pada berbagai macam environment seperti Arduino IDE [7].

ESP32 dilengkapi dengan pin GPIO serbaguna yang digunakan untuk menghubungkan sensor atau aktuator. Dari 48 pin tersebut, 15 berfungsi sebagai ADC, 2 pin UART, 25 pin PWM, 2 pin DAC, 3 pin SPI, dan 1 pin I2C. ESP32 memiliki prosesor dual-core Xtensa LX6 dengan WiFi 802.11, RAM 520KB, dan Flash 4MB, sehingga pemrograman Modbus TCP/IP menjadi memungkinkan [17].

D. Telegram Bot API

Telegram Bot API adalah teknologi open-source yang disediakan oleh Telegram Messenger LLP untuk memungkinkan pengembang membuat aplikasi bot di platform Telegram. API ini berfungsi sebagai antarmuka berbasis HTTP yang menghubungkan bot dengan sistem Telegram, sehingga bot dapat berinteraksi sesuai instruksi yang diberikan [9]. Kelebihan Telegram adalah tersedia gratis, sudah dikenal luas, dan mendukung pengiriman pesan teks real-time melalui koneksi internet tanpa memerlukan lisensi tambahan.

E. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)

SCADA merupakan sistem pengawasan, pengontrolan, dan akuisisi data yang memudahkan pengguna memonitor suatu sistem melalui tampilan interface [5]. Arsitektur SCADA terdiri dari: (1) Master Terminal Unit (MTU) sebagai unit pengolah pusat yang menyajikan data dan mengirim sinyal kendali; (2) Remote Terminal Unit (RTU)/PLC yang ditempatkan di lokasi fisik — pada penelitian ini dijalankan oleh ESP32 Tandon 1–3 dan PLC Outseal via Elfin; (3) Human Machine Interface (HMI) sebagai antarmuka operator berbasis grafis; dan (4) Sistem Komunikasi sebagai infrastruktur transmisi data.

F. Software Haiwell SCADA Designer

Haiwell SCADA adalah perangkat lunak berbasis framework .NET dari Xiamen Haiwell Technology Co., Ltd. yang dirancang untuk menyediakan platform pemantauan, pengendalian, dan pengelolaan dalam otomasi industri. Melalui perangkat lunak ini, pengguna dapat melakukan pemrograman jarak jauh, desain SCADA, upload & download, diagnostik, dan monitoring program PLC secara real-time di mana saja secara gratis[18], [19],[5].

G. HMI Haiwell

Haiwell HMI adalah antarmuka pengguna grafis (GUI) yang digunakan operator untuk memantau proses, mengatur parameter, mengubah nilai set point, serta melihat status dan riwayat proses yang sedang berjalan[20]. Pada penelitian ini digunakan Haiwell HMI tipe B7S dengan layar TFT LCD 7 inci, resolusi 800×480, penyimpanan 2 GB Flash + 512 MB DDR3, koneksi RJ45 Ethernet, RS232/RS485, dimensi 200×146×37 mm

H. Protokol Modbus TCP/IP

Modbus adalah protokol komunikasi jaringan berstandar internasional yang bersifat open source dan dapat berjalan pada berbagai media antarmuka. Pertama dipublikasikan oleh Modicon pada tahun 1979 untuk PLC. Modbus TCP/IP menggunakan model komunikasi client/server yang memungkinkan komunikasi antar perangkat dan menampilkan data secara real-time [21]. Perangkat pengirim perintah disebut master/client dan penerima disebut slave/server

I. Sensor Ultrasonik HC-SR04

HC-SR04 adalah modul sensor ultrasonik yang biasanya digunakan untuk pengukuran jarak. Pada HC-SR04 terdapat

sepasang transducer: satu transmitter yang mengubah sinyal elektrik menjadi pulsa gelombang suara ultrasonik 40 kHz, dan satu receiver yang menerima sinyal pantulan [3]. Prinsip kerjanya: sensor memancarkan gelombang ultrasonik, gelombang merambat melalui udara dengan kecepatan 344 m/s, mengenai objek dan memantul kembali, kemudian sensor menghitung selisih waktu pengiriman dan penerimaan untuk mendapatkan jarak

J. Sensor YF-S201

Flow meter YF-S201 Sensor flow water merupakan sensor yang digunakan untuk mengukur debit. Ketika air mengalir melalui rotor maka rotor akan berputar dan kecepatan dari rotor akan sesuai dengan aliran air yang masuk melewati rotor. Pulsa sinyal dari rotor akan diterima oleh sensor hall effect untuk selanjutnya diproses di mikrokontroler[12]. Spesifikasi Flow Sensor YF S201 working flow 1 – 30 L/m dengan akurasi sensor $\pm 10\%$ dan bekerja dengan tegangan 5 – 18 V

K. Rumus Perhitungan

1. Perhitungan Water Level

Sensor HC-SR04 dipasang di bagian atas tandon menghadap ke bawah untuk membaca jarak antara sensor dan permukaan air. Nilai yang dikirimkan sensor ke ESP32 adalah jarak $d(t)$, sehingga diperlukan konversi ke ketinggian air:

$$h(t) = H_{Tandon} - d(t) \quad (1)$$

Keterangan:

- $h(t)$ = ketinggian air (cm)
- $d(t)$ = jarak sensor ke permukaan air (cm)
- H_{Tandon} = tinggi tandon (cm).

2. Rumus Volume Frustum Kerucut

Frustum kerucut adalah bangun ruang yang terbentuk dari kerucut yang dipotong sejajar dengan alasnya sehingga menghasilkan dua lingkaran dengan diameter berbeda pada bagian atas dan bawahnya. Volume frustum kerucut dinyatakan sebagai berikut:

$$V(h) = \frac{1}{3}\pi h(r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) \quad (2)$$

Keterangan:

- $V(h)$ = Volume air pada ketinggian h (cm^3)
- h = ketinggian air (cm)
- r_1 = jari jari bawah (cm)
- r_2 = jari jari atas (cm)

3. Perhitungan Debit

Debit air didefinisikan sebagai laju perubahan volume air per satuan waktu.

$$Q(t) = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3)$$

Keterangan:

- $Q(t)$ = debit air pada waktu t (cm^3/s)

- ΔV = perubahan volume (cm^3)
- Δt = interval waktu antar-pengukuran (s)

4. Error Relatif dan Error FSO

Untuk mengevaluasi akurasi sensor, digunakan dua parameter perhitungan kesalahan. Kesalahan relatif (Erelatif) adalah persentase penyimpangan nilai ukur terhadap nilai sebenarnya: Metrik ini berguna untuk mengetahui seberapa besar penyimpangan pada setiap titik pengukuran terhadap nilai aktualnya:

$$E_{relatif} = \left| \frac{X_m - X_t}{X_t} \right| \times 100\% \quad (4)$$

Error Full Scale Output (EFSO) adalah persentase penyimpangan nilai ukur terhadap rentang skala penuh sensor metrik ini berguna untuk menilai performa sensor secara keseluruhan terhadap kapasitas penuh sistem:

$$E_{FSO} = \left| \frac{X_m - X_t}{X_{FS}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

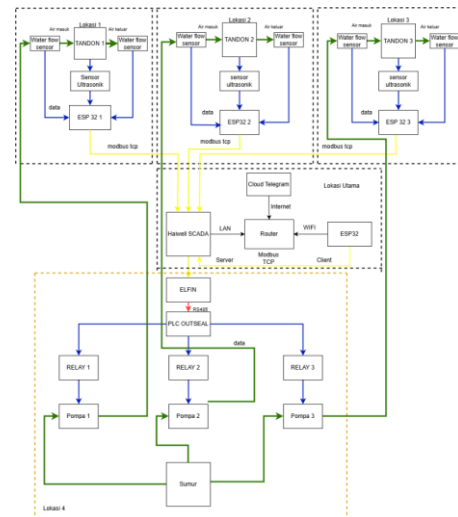
Keterangan:

- X_m = nilai terukur sensor,
- X_t = nilai sebenarnya (referensi),
- X_{FS} = rentang skala penuh sensor.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Rancangan Sistem

1) Blok Diagram Keseluruhan Sistem

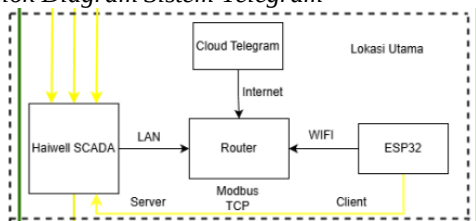


Gambar 1. Blok Diagram Keseluruhan Sistem

Gambar 1 menampilkan blok diagram keseluruhan sistem, di mana data sensor ultrasonik dan flow meter di lapangan diproses oleh ESP32 lalu dikirim melalui router ke Haiwell SCADA selaku master Modbus untuk menghasilkan informasi level, volume, dan debit air. Selain divisualisasikan pada HMI, seluruh data tersebut diteruskan ke Telegram sebagai notifikasi dan monitoring menggunakan ESP32 selaku bridge komunikasi. Sementara untuk mekanisme kendali, Haiwell SCADA terhubung ke PLC Outseal via modul Elfin

untuk menjalankan logika pengoperasian pompa secara otomatis dan responsif melalui intervensi relai.

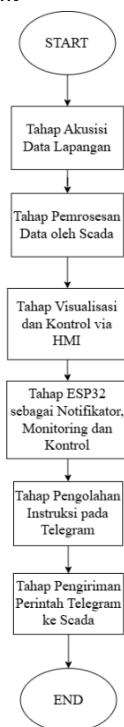
2) Blok Diagram Sistem Telegram



Gambar 2. Blok Diagram Sistem Telegram

Gambar 2 menunjukkan blok diagram sistem Telegram pada lokasi utama yang menggambarkan hubungan komunikasi antara Haiwell SCADA, ESP32, dan aplikasi Telegram. Haiwell SCADA berfungsi sebagai HMI utama yang memvisualisasikan data sensor dan menjalankan algoritma konversi data menjadi parameter water level, volume, debit, serta status pompa. Pertukaran data antara SCADA dan ESP32 dilakukan secara nirkabel melalui protokol Modbus TCP/IP. ESP32 berperan sebagai bridge yang mengonversi nilai register SCADA ke dalam format teks untuk dikirimkan ke Telegram. Sistem Telegram bekerja dalam dua mekanisme secara simultan: mekanisme Push untuk mengirimkan peringatan EWS secara otomatis saat kondisi High Level atau Low Level terdeteksi tanpa intervensi pengguna, dan mekanisme Pull yang memungkinkan pengguna memantau kondisi tandon secara on-demand melalui perintah /cek serta mengendalikan pompa jarak jauh melalui perintah /on atau /off yang diterjemahkan ESP32 menjadi instruksi register Modbus untuk dieksekusi oleh SCADA.

3) Alur Kerja Alur kerja sistem Notifikasi, Monitoring dan Kontrol melalui Telegram



Gambar 3. Alur Kerja Sistem Notifikasi, Monitoring dan Kontrol Melalui Telegram

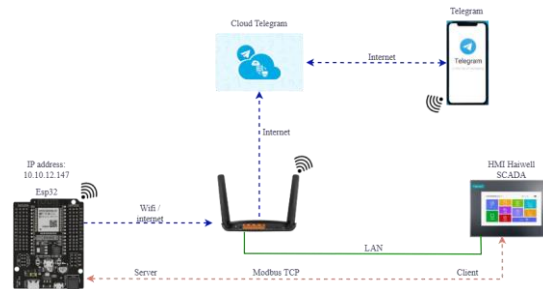
Gambar 3 menunjukkan alur kerja sistem Sistem Water Level Control dengan SCADA ini dapat memonitoring level air, debit air, dan volume tandon berbasis sensor ultrasonik dengan pendekatan perhitungan matematis, kemudian kontrol pompa, serta memiliki kemampuan mengirimkan notifikasi secara real-time melalui Telegram.

Alur kerja dimulai dari akuisisi data sensor ultrasonik pada ketiga tandon yang diteruskan ke Haiwell SCADA melalui ESP32 dan PLC Outseal via protokol Modbus TCP/IP. SCADA memproses data mentah menjadi parameter water level, volume, dan debit air menggunakan kalkulasi matematis, sekaligus mengevaluasi kondisi alarm High/Low Level secara otomatis. Hasil pemrosesan kemudian ditampilkan secara real-time pada HMI untuk pemantauan dan kontrol lokal oleh operator.

Selanjutnya ESP32 Telegram menjalankan dua fungsi komunikasi jarak jauh secara simultan. Pertama, fungsi notifikator otomatis (push data) yaitu sistem secara otomatis mengirimkan notifikasi peringatan dini ke Telegram ketika register alarm SCADA mendeteksi kondisi kritis. Kedua, fungsi monitoring dan kontrol on-demand (pull data) yaitu pengguna dapat mengirimkan perintah /cek untuk menarik data kondisi tandon terkini. Perintah yang diterima Telegram kemudian diolah dan diteruskan kembali ke SCADA melalui ESP32, termasuk perintah /on atau /off untuk mengendalikan pompa dari jarak jauh.

B. Perancangan Perangkat Keras

Gambar 4. Dibawah merupakan rancangan perangkat keras sistem telegram yang menggabungkan komunikasi jaringan lokal berbasis Modbus TCP dan komunikasi internet berbasis HTTPS dalam satu ekosistem yang terintegrasi. Terdapat lima komponen utama: modul ESP32 Bridge, router WiFi, HMI Haiwell SCADA, dan platform Telegram melalui Cloud Telegram.



Gambar 4. Rancangan Perangkat Keras Sistem Telegram

Terdapat empat jalur komunikasi dalam sistem ini, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jalur Komunikasi Perangkat Keras Sistem Notifikasi

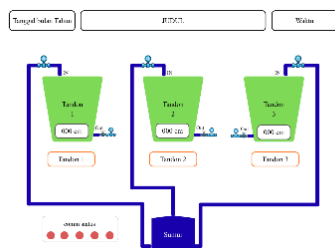
Koneksi	Protokol	Keterangan
ESP32 ↔ Router	WiFi 802.11 (TCP/IP)	ESP32 terhubung nirkabel ke router untuk akses jaringan lokal dan internet
Router ↔ HMI SCADA	Ethernet / LAN	Koneksi kabel LAN sebagai jalur Modbus TCP antara router dan Haiwell SCADA
HMI SCADA ↔ ESP32	Modbus TCP	SCADA sebagai Client polling register ke ESP32 sebagai Server melalui LAN
Router → Cloud Telegram	HTTPS / Internet	ESP32 mengirim notifikasi, monitoring ke Telegram Bot API dan menerima perintah pengguna
Cloud Telegram ↔ Smartphone	HTTPS / Internet	Cloud Telegram meneruskan notifikasi, monitoring dan perintah kontrol ke smartphone pengguna

C. Perancangan Perangkat Lunak

1) Tampilan Visual Haiwell SCADA

Haiwell SCADA memproses dan menyajikan data sensor dalam bentuk visual yang dapat diakses melalui HMI.

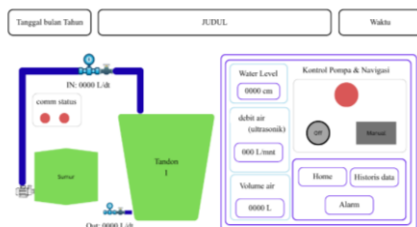
Slide 1 – Tampilan Utama



Gambar 5. Desain Halaman Utama SCADA

Gambar 5 menampilkan halaman utama berupa visualisasi grafis satu sumur dan tiga tandon air yang menunjukkan level ketinggian air secara visual. Halaman ini dilengkapi informasi waktu pada header, tombol navigasi ke halaman detail tandon, serta indikator comm status di kiri bawah untuk memonitor status komunikasi Tandon 1–3, PLC, dan Telegram.

Slide 2 – Halaman Tandon



Gambar 6. Desain Halaman Tandon

Gambar 6 menampilkan halaman detail tandon yang menyajikan empat komponen utama: header informasi waktu dan judul, tombol navigasi (ke halaman historis, alarm, dan home), panel data parameter (water level, volume, debit ultrasonik, serta flowmeter), serta panel kontrol pompa yang dilengkapi tombol ON/OFF, indikator status, dan pemilih mode Manual/Otomatis (M/A).

Slide 3 – Historis Data Tandon



Gambar 7. Desain Halaman Historis Data Tandon 1

Gambar 7. menampilkan halaman historis data yang menyajikan tabel rekaman data operasional (waktu, level air, volume, debit ultra, Flow in Flow Out, dan status pompa), didukung oleh panel data real-time serta tombol navigasi menuju halaman Alarm, Home, dan Tandon 1.

Slide 4 – Alarm Tandon



Gambar 8. Desain Halaman Alarm Tandon 1

Gambar 8 menunjukkan Halaman alarm menyajikan riwayat alarm aktif dalam bentuk tabel berisi waktu alarm aktif, histori alarm, tipe alarm, dan konten alarm. Dilengkapi panel data real-time dan tombol navigasi Historis, Home, dan Tandon 1.

2) Konfigurasi Sistem SCADA

a. Pengalamatan Device SCADA

Tabel 2. Pengalamatan Device SCADA

Device Name	Protocol	Port	Slave ID	IP Address
Modbus_PLC	TCP/IP	502	01	10.10.12.124
Tandon1	TCP/IP	502	01	10.10.12.213
Tandon2	TCP/IP	502	01	10.10.12.173
Tandon3	TCP/IP	502	01	10.10.12.226
Esp32 Telegram	TCP/IP	502	01	10.10.12.147

Pada Tabel 2 diatas, merupakan daftar pengalamatan perangkat Seluruh perangkat keras dihubungkan dalam satu jaringan Wi-Fi lokal dengan alamat IP statis untuk menjamin stabilitas koneksi.

b. Setting Register Modbus

Tabel 3. Register Modbus Tandon 1, 2, dan 3

Register Type	Reg. Address	Length	Nama Variabel	Data Type
4X (FC 03/06)	0	2	HCSR04	Float
4X (FC 03/06)	2	2	Flowmeter_In	Float
4X (FC 03/06)	4	2	Flowmeter_Out	Float

Pada tabel 3, merupakan Register Tandon 1–3 digunakan untuk monitoring data sensor di lapangan. Data HCSR04 (jarak ultrasonik) diolah oleh Haiwell SCADA menjadi nilai water level, volume tandon, dan debit air menggunakan pendekatan matematis. Perbedaan tiap konfigurasi hanya pada nama variabel, sedangkan register type, address, dan data type sama untuk ketiga tandon.

Tabel 4. Register Modbus PLC (Kontrol Pompa)

Register Type	Reg. Address	Length	Nama Variabel	Data Type
0X (FC 01/05)	128	1	Start_B1 (Pompa 1)	Bool
0X (FC 01/05)	129	1	Start_B2 (Pompa 2)	Bool
0X (FC 01/05)	130	1	Start_B3 (Pompa 3)	Bool

Pada tabel 4, merupakan Register PLC_TCP digunakan untuk kontrol status pompa secara manual maupun otomatis. Penentuan alamat register dimulai dari 128 karena berkorelasi langsung dengan pemetaan memori physical output pada PLC Outseal yang digunakan.

Tabel 5. Register Modbus ESP32 (Telegram)

Register Type	Reg. Address	Length	Nama Variabel	Data Type
4X (FC 03/06)	0	2	WaterLevel1	Float
4X (FC 03/06)	2	2	Volume_Tandon1	Float
4X (FC 03/06)	4	2	WaterLevel2	Float
4X (FC 03/06)	6	2	Volume_Tandon2	Float
4X (FC 03/06)	8	2	WaterLevel3	Float
4X (FC 03/06)	10	2	Volume_Tandon3	Float
4X (FC 03/06)	12	1	Alarm_tandon1	Integer
4X (FC 03/06)	13	1	Alarm_tandon2	Integer
4X (FC 03/06)	14	1	Alarm_tandon3	Integer
0X (FC 01/05)	0	1	Status_T1	Coil/Bool
0X (FC 01/05)	1	1	Status_T2	Coil/Bool
0X (FC 01/05)	2	1	Status_T3	Coil/Bool

Pada tabel 5, merupakan Register ESP32 Telegram digunakan untuk sistem notifikasi dan kontrol melalui Telegram. Notifikasi dapat berupa nilai monitoring water level, volume, dan status pompa setiap tandon, serta alarm tandon 1–3 yang dibagi menjadi Alarm High Level (tandon hampir penuh) dan Alarm Low Level (tandon hampir kosong).

3) Rumus Sensor Ultrasonik

1. Perhitungan Water Level Air

Sensor HC-SR04 dipasang di bagian atas tandon menghadap ke bawah untuk membaca jarak antara sensor dan permukaan air. Nilai yang dikirimkan sensor ke ESP32 adalah jarak $d(t)$, sehingga diperlukan konversi ke ketinggian air:

$$h(t) = H_{Tandon} - d(t) \quad (6)$$

Keterangan:

- $h(t)$ = ketinggian air (cm)

- $d(t)$ = jarak antara sensor ultrasonik dan permukaan air yang terukur (cm)
- H_{Tandon} = Tinggi Tandon (cm)

2. Perhitungan Volume

Prototipe tandon berbentuk frustum (kerucut terpotong) dengan diameter atas 30 cm ($R_2 = 15$ cm), diameter bawah 26 cm ($R_1 = 13$ cm), dan tinggi 34 cm. Karena bentuk tandon tidak silindris, volume air dihitung menggunakan rumus frustum kerucut sebagai berikut:

$$V(h) = \frac{\frac{1}{3}\pi h(t)(r_1^2 + r_1 r_h + r_h^2)}{1000} \quad (7)$$

Keterangan:

- $V(h)$ = Volume air pada ketinggian h (L)
- $h(t)$ = ketinggian air (cm)
- r_1 = jari jari bawah (cm)
- r_h = Jari-jari permukaan air pada ketinggian h (cm)

Karena nilai jari-jari permukaan air r_2 berubah setiap kali ketinggian air berubah, nilai r_2 diperoleh melalui interpolasi linear sebagai berikut:

$$r_h = r_1 + (r_2 - r_1) \times \left(\frac{h(t)}{H_{Tandon}} \right) \quad (8)$$

Keterangan:

- H_{Tandon} = Tinggi Tandon (cm)
- r_2 = jari jari atas (cm)
- r_1 = jari jari bawah (cm)
- r_h = Jari-jari permukaan air pada ketinggian h (cm)
- $h(t)$ = Ketinggian Air aktual (cm)

3. Perhitungan Debit Air

Pada sistem ini, debit air tidak diukur secara langsung menggunakan flowmeter melainkan dihitung Debit air $Q(t)$ dihitung secara turunan numerik berdasarkan perubahan volume ΔV pada setiap interval waktu pencatatan Δt . Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

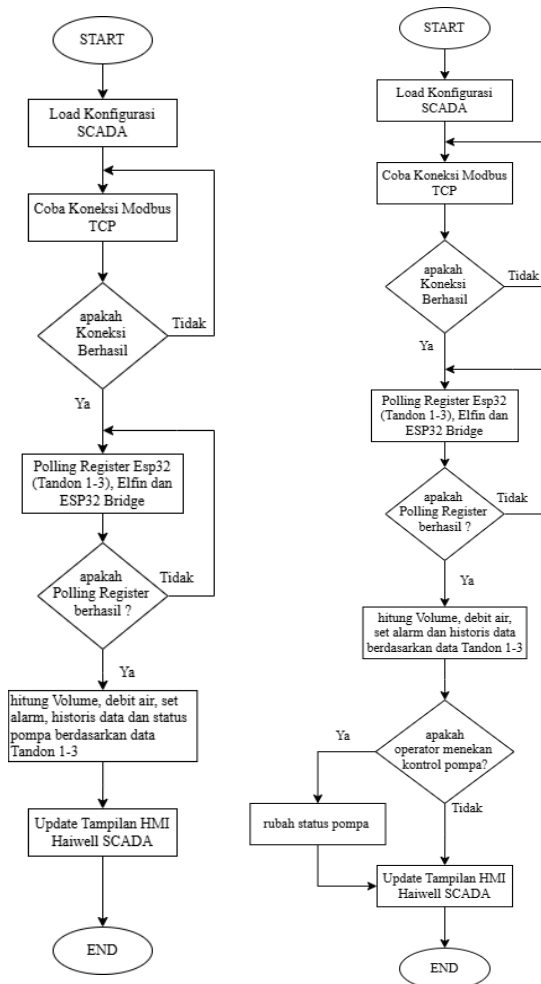
$$Q(t) = \frac{\Delta V}{\Delta t} \times 60 \quad (9)$$

Keterangan

- $Q(t)$ = debit air pada waktu t (L/m)
- ΔV = perubahan volume (L)
- Δt = interval waktu antar-pengukuran (s)

D. Flowchart Sistem

Flowchart SCADA Mode Otomatis dan Manual

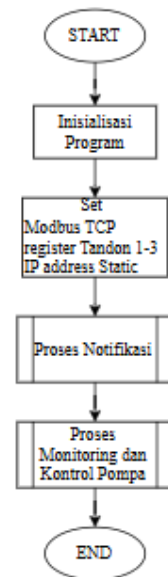


Gambar 9. Flowchart Haiwell SCADA Mode Otomatis dan Manual

Gambar 9 merupakan Flowchart Haiwell Scada Mode otomatis sebelah kiri dan manual sebelah kanan dimana:

- Flowchart Mode Otomatis: SCADA memuat konfigurasi perangkat (IP, port, Slave ID, alamat register), mencoba koneksi Modbus TCP ke semua device. Setelah polling berhasil, SCADA membaca data ESP32 Tandon 1–3 (water level, flowmeter IN/OUT) dan data Elfin/PLC (status pompa). Selanjutnya SCADA menghitung volume, debit, set alarm (High/Low Level), mencatat historis data, dan mengubah status pompa secara otomatis berdasarkan perubahan water level sebelum memperbarui tampilan HMI.
- Flowchart Mode Manual: proses akuisisi data dan perhitungan sama dengan mode otomatis. Perbedaannya adalah pada pemeriksaan input kontrol dari operator SCADA memeriksa apakah ada input kontrol dari operator HMI maupun Telegram. Jika ada, status pompa diubah sesuai input operator (ON atau OFF), kemudian tampilan HMI diperbarui.

Flowchart ESP32 Telegram



Gambar 10. Flowchart ESP32 Telegram (Tiga Proses Paralel)

Gambar 10 merupakan Flowchart ESP32 Telegram terdiri dari tiga proses yang berjalan secara paralel: (1) Program Utama: inisialisasi Modbus TCP Server, setting register tandon 1–3, IP statis, kemudian menjalankan proses notifikasi dan proses monitoring/kontrol; (2) Proses Notifikasi EWS: membaca data Modbus dari HMI SCADA, mengecek apakah status alarm aktif, jika ya mengirimkan notifikasi ke Telegram; (3) Proses Monitoring dan Kontrol: mengecek pesan Telegram, jika ada perintah /cek maka membaca register water level/volume/status pompa dan mengirimkan ke Telegram; jika perintah /on atau /off maka menulis register status pompa dan mengirimkan ke Haiwell SCADA melalui Modbus TCP.

IV. SIMULASI DAN ANALISA

A. Implementasi Perangkat Keras

Gambar 11 dan gambar 12 dibawah menunjukkan rancangan keseluruhan sistem dan perancangan perangkat keras sistem Telegram yang diusulkan. Dalam rancangan tersebut terdapat empat komponen utama, yaitu modul ESP32, router WiFi, HMI Haiwell SCADA, serta platform Telegram yang diakses melalui Cloud Telegram dan aplikasi Telegram pada smartphone



Gambar 11. Perancangan Keseluruhan Sistem Notifikasi



Gambar 12. Perangkat Keras Sistem Notifikasi



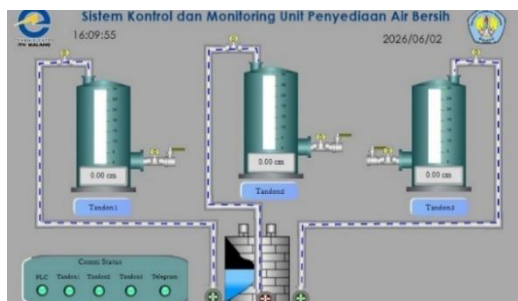
Gambar 13. Rancangan Keseluruhan Sistem

Gambar 13 merupakan hasil dari rancangan keseluruhan sistem *Water Level Control* yang merepresentasikan kondisi nyata sistem distribusi air berskala kecil. Purwarupa terdiri dari dua panel utama: panel sensor yang memuat tiga set rangkaian ESP32 dan panel kendali yang memuat PLC Outseal, relay, Elfin EW11, serta *Power Supply*.

B. Implementasi Visual Scada

Implementasi tampilan visual haiwell scada bertujuan untuk memvisualisasikan monitoring dan kontrol.

1. Main Display



Gambar 14. Main Display

Gambar 14. menampilkan halaman utama (Main Display) Haiwell SCADA berupa visualisasi grafis satu unit sumur dan tiga unit tandon air. Halaman ini dilengkapi informasi waktu real-time dan tombol navigasi pada bagian header, serta panel indikator comm status di kiri bawah untuk memonitor koneksi Modbus TCP/IP antara Tandon 1–3, PLC, dan modul

Telegram.

2. Display Tandon



Gambar 15. Display Tandon

Gambar 15 menunjukkan halaman monitoring dan kontrol Tandon 1, yang diterapkan secara identik pada Tandon 2 dan Tandon 3. Halaman ini menampilkan panel data parameter (water level, volume, debit ultrasonik, serta flowmeter masuk dan keluar) dan panel kontrol yang dilengkapi dengan tombol ON/OFF pompa, lampu indikator status, tombol M/A (Manual/Automatic) untuk pengalihan mode operasi, serta tombol navigasi antar-halaman.

3. Display Historis Data



Gambar 16. Historis Data

Gambar 16. menampilkan halaman historis data Tandon 1, yang juga diterapkan secara identik pada Tandon 2 dan Tandon 3. Data operasional tandon dicatat setiap 10 detik sekali dalam format tabel yang memuat kolom waktu, water level, volume, debit ultrasonik, Flow IN, Flow Out, dan status pompa untuk memudahkan analisis tren serta deteksi anomali sistem oleh operator.

4. Display Alarm



Gambar 17. Display Alarm

Gambar 17 menunjukkan halaman alarm Tandon 1, yang juga diterapkan secara identik pada Tandon 2 dan Tandon 3.

Halaman ini memuat tabel alarm (real-time, histori, dan konfirmasi) yang merinci waktu, nilai, konteks, serta tipe alarm untuk kondisi low dan high level, didukung panel data real-time di sampingnya untuk mempertahankan visibilitas kondisi terkini sistem.

C. Hasil Pengukuran Water Level Dengan Sensor Ultrasonik

Pengujian water level bertujuan mengevaluasi akurasi sensor HC-SR04 dengan membandingkan pembacaan SCADA terhadap ketinggian aktual pada tiga kondisi operasional: pengisian, pengosongan, dan isi-kuras. Data aktual direkam melalui video pada meteran tandon, sedangkan data sensor diambil dari fitur historis scada dengan interval 10 detik. Akurasi dievaluasi menggunakan dua metrik, yaitu Error Relatif dan Error FSO dengan nilai full scale 34 cm.

1) Kondisi Diisi Air

Pengujian pengisian pada masing-masing tandon dimulai dari kondisi level awal yang berbeda. Tandon 1 diuji pada rentang level 10–28 cm, Tandon 2 pada rentang 0.5–28.4 cm, dan Tandon 3 pada rentang 1.0–30.0 cm

Tabel 6. Rata Rata Hasil Pengukuran Water Level Kondisi Pengisian

No	Tandon	Rata rata Nilai Aktual (cm)	Rata rata Nilai Sensor (cm)	Rata rata Selisih (cm)	Rata rata Error% Relatif (%)	Rata rata Error% FSO (%)
1	T1	19.43	19.15	0.32	1.84	0.95
2	T2	14.63	15.11	0.59	13.79	1.74
3	T3	15.84	16.27	0.49	10.84	1.43

Data Tabel 6 menunjukkan deviasi fisik rata-rata (selisih) yang sangat rendah pada ketiga tandon, yakni berkisar antara 0,32 cm hingga 0,59 cm. Performa ini dipertegas oleh nilai Error Full Scale Output (FSO) yang secara konsisten berada di bawah 2%, dengan nilai tertinggi sebesar 1,74% pada Tandon 2.

Adapun lonjakan Rata-Rata Error Relatif pada Tandon 2 (13,79%) dan Tandon 3 (10,84%) terjadi akibat sifat matematis rumus error relatif yang sangat sensitif ketika volume air masih sangat rendah (level dangkal) di awal pengisian, di mana nilai aktual yang kecil akan menghasilkan persentase kesalahan yang besar. Penggunaan metode submerged pipe inlet pada sistem ini berhasil mereduksi turbulensi permukaan secara signifikan, meskipun riak gelombang dan buih buih tetap terbentuk akibat dorongan air masuk. Namun, riak tersebut hanya menimbulkan fluktuasi pada pembacaan sensor dan tidak memengaruhi performa kontrol logika karena nilai kesalahan yang tetap minimal.

2) Kondisi Air Kuras

Pengujian pengurasan pada masing-masing tandon dimulai dari kondisi level awal yang berbeda. Tandon 1 diuji pada

rentang level 27–15.30 cm, Tandon 2 pada rentang 28.9–14.1 cm, dan Tandon 3 pada rentang 30–16.8 cm

Tabel 7. Rata Rata Hasil Pengukuran Water Level Kondisi Pengosongan

No	Tandon	Rata rata Nilai Aktual (cm)	Rata rata Nilai Sensor (cm)	Rata rata Selisih (cm)	Rata rata Error% Relatif (%)	Rata rata Error% FSO (%)
1	T1	24.19	21.20	0.20	1.04	0.59
2	T2	21.20	20.97	0.28	1.30	0.84
3	T3	23.38	22.74	0.63	2.77	1.86

Berdasarkan data pada Tabel 7. sensor ultrasonik menunjukkan performa yang bagus selama proses pengosongan tandon. Deviasi fisik (selisih) rata-rata tercatat berada pada rentang 0,20 cm hingga 0,63 cm. Kinerja unggul ini dipertegas oleh nilai Error Full Scale Output (FSO) di seluruh tandon yang secara konsisten berada di bawah 2%, dengan nilai terkecil pada Tandon 1 sebesar 0,59% dan tertinggi pada Tandon 3 sebesar 1,86%.

Jika dibandingkan dengan kondisi pengisian, rata-rata error relatif pada kondisi pengosongan jauh lebih kecil dan stabil (tidak ada lonjakan ekstrem di atas 10%). Hal ini terjadi karena saat air dikuras melalui pipa keluaran bawah permukaan air lebih tenang dibanding pengisian, Sedikit peningkatan selisih dan error pada Tandon 3 (FSO 1,86%) dipengaruhi oleh kondisi permukaan air yang lebih banyak riak serta adanya getaran pada dinding tandon saat katup pengurasan dibuka penuh.

3) Kondisi Air Kuras dan Diisi

Pengujian pengisian dan pengurasan pada masing-masing tandon dimulai dari kondisi level awal yang berbeda. Tandon 1 diuji pada rentang level 11,53–18,16 cm, Tandon 2 pada rentang 9,8–24,3 cm, dan Tandon 3 pada rentang 12–26,78 cm

Tabel 8. Rata Rata Hasil Pengukuran Water Level Kondisi Isi dan Kuras

No	Tandon	Rata rata Nilai Aktual (cm)	Rata rata Nilai Sensor (cm)	Rata rata Selisih (cm)	Rata rata Error% Relatif (%)	Rata rata Error% FSO (%)
1	T1	15.34	15.53	0.27	1.66	0.79
2	T2	17.42	17.23	0.25	1.52	0.72
3	T3	20.00	19.98	0.55	3.35	1.63

Data Tabel 8 menunjukkan deviasi fisik rata-rata (selisih) yang sangat kecil pada ketiga tandon, yaitu hanya berkisar antara 0,25 cm hingga 0,55 cm. Akurasi performa yang tinggi ini dipertegas oleh nilai Error Full Scale Output (FSO) yang secara konsisten berada di bawah 2% pada seluruh tandon, dengan nilai tertinggi sebesar 1,63% pada Tandon 3 dan nilai

terkecil sebesar 0,72% pada Tandon 2. Hasil ini membuktikan bahwa akurasi sensor ultrasonik pada sistem monitoring ini masih berada di bawah batas toleransi 2% yang umum diterima, sehingga sensor dinyatakan layak digunakan

Kestabilan nilai error yang rendah pada kondisi ini dipengaruhi oleh implementasi metode submerged pipe inlet. Sedikit perbedaan error pada Tandon 3 (Error Relatif 3,35%) dibanding tandon lainnya dipicu oleh debit air yang lebih besar.

D. Hasil Pengukuran Debit Air Dengan Sensor Ultrasonik

Pengujian debit bertujuan mengevaluasi akurasi kalkulasi debit sistem SCADA yang dihitung melalui pendekatan matematis $\Delta V/\Delta t$ berbasis data sensor ultrasonik HC-SR04, dengan flow sensor YF-S201 sebagai acuan nilai aktual. Pengujian dilakukan secara dinamis pada tiga kondisi operasional: pengisian, pengosongan, dan isi-kuras. Data debit aktual maupun hasil kalkulasi diambil secara bersamaan dari fitur historis scada pada timestamp yang sama dengan interval 10 detik. Akurasi dievaluasi menggunakan Error Relatif dan Error FSO dengan nilai full scale 10 L/m.

1) Kondisi Diisi Air

Tabel 9. Rata-Rata Hasil Pengujian Debit Air pada Kondisi Pengisian

No	Tandon	Rata rata Debit Ultrasonik (L/m)	Rata rata Debit Flow IN (L/m)	Rata rata Selisih (L/m)	Rata rata Error% Relatif (%)	Rata rata Error% FSO (%)
1	T1	5.72	5.35	0.58	10.15	5.77
2	T2	8.34	8.27	0.78	9.27	6.46
3	T3	9.85	8.70	1.47	15.03	14.75

Berdasarkan Tabel 9, nilai Error Relatif berkisar 9,27% hingga 15,03% dan Error FSO 5,77% hingga 14,75%. Tandon 1 dan Tandon 2 menunjukkan performa yang relatif sebanding dengan Error FSO masing-masing 5,77% dan 6,46%. Meskipun debit Tandon 2 tergolong besar (8,34 L/m), kondisi permukaan air saat pengujian tidak menimbulkan banyak riak dan gelombang sehingga pembacaan sensor HC-SR04 tetap stabil dan konsisten.

Tandon 3 mencatatkan error tertinggi (Error FSO 14,75%, selisih fisik 1,47 L/m) karena debit masuk paling deras (9,85 L/m) menimbulkan riak dan fluktuasi permukaan yang jauh lebih intens dibanding kedua tandon lainnya. Meskipun sistem sudah menggunakan submerged pipe inlet untuk meredam turbulensi, kondisi ini menyebabkan pembacaan sensor menjadi tidak konsisten sehingga efek amplifikasi kesalahan pada perhitungan $\Delta V/\Delta t$ menjadi lebih besar.

2) Kondisi Air Dikuras

Tabel 10. Rata-Rata Hasil Pengujian Debit Air pada Kondisi Pengosongan

No	Tandon	Rata rata Debit Ultrasonik (L/m)	Rata rata Debit Flow Out (L/m)	Rata rata Selisih (L/m)	Rata rata Error% Relatif (%)	Rata rata Error% FSO (%)
1	T1	3.95	-3.87	0.41	10.46	4.06
2	T2	4.63	-4.66	0.19	4.83	2.15
3	T3	4.51	-4.27	0.51	11.38	5.13

Berdasarkan Tabel 10, nilai Error Full Scale Output (FSO) pada kondisi pengosongan ini menunjukkan hasil yang sangat baik, dengan error terkecil pada Tandon 2 (2,15%) dan tertinggi pada Tandon 3 (5,13%). Secara matematis hal ini sangat wajar karena rumus turunan numerik berbasis pada perubahan volume terhadap waktu. Jika dibandingkan dengan kondisi pengisian (yang error-nya mencapai 14,75%), akumulasi error pada kondisi dikuras ini jauh lebih rendah dan stabil di kisaran 2% hingga 5%. Hal ini dikarenakan laju penurunan volume air saat pengosongan berlangsung lebih tenang. Kondisi tersebut membuat perubahan nilai jarak per detik yang ditangkap oleh sensor ultrasonik menjadi jauh lebih teratur, sehingga meminimalkan efek magnifikasi kesalahan (error amplification) pada perhitungan turunan numeriknya di SCADA. Dengan nilai error FSO maksimal yang hanya sebesar 5,13%.

3) Kondisi Air Diisi Dan Dikuras

Tabel 11. Rata-Rata Hasil Pengujian Debit Air pada Kondisi Isi dan Kuras

No	Tandon	Rata rata Debit Flow IN (L/m)	Rata rata Debit Flow Out (L/m)	Rata rata Debit Ultrasonik (L/m)	Rata rata Selisih (L/m)	Rata rata Error% Relatif (%)	Rata rata Error% FSO (%)
1	T1	5.50	3.38	2.12	2.00	0.43	21.17
2	T2	8.52	4.07	4.54	0.53	14.75	5.28
3	T3	9.94	4.69	5.25	0.76	14.22	7.59

Berdasarkan Tabel 11, kalkulasi debit SCADA menunjukkan Error FSO terkecil pada Tandon 1 (4,32%) dan tertinggi pada Tandon 3 (7,59%). Lonjakan Error Relatif pada Tandon 1 (21,17%) bukan berarti sensor bekerja buruk, melainkan terjadi karena nilai net flow aktual yang kecil (2,12 L/m) membuat rumus error relatif menghasilkan persentase yang besar secara matematis meskipun selisih absolutnya tetap kecil

Tingginya Error FSO pada Tandon 3 disebabkan oleh laju aliran masuk (9,94 L/m) dan keluar (4,69 L/m) yang paling besar di antara ketiga tandon, sehingga permukaan air lebih banyak bergerak dan beriak. Meskipun sistem telah menggunakan metode submerged pipe inlet untuk meredam turbulensi, aliran masuk dan keluar yang terjadi secara bersamaan dengan debit tinggi tetap menghasilkan riak

permukaan. Fluktuasi kecil ini secara langsung memperbesar ketidakpastian pada perhitungan debit berbasis $\Delta V/\Delta T$, karena setiap perubahan pembacaan jarak sensor akan langsung mempengaruhi hasil kalkulasi volume dan debit pada sistem SCADA.

Nilai Error FSO yang lebih besar dibandingkan penelitian Suryana [13] (4,2%) dan Gurum & Warsito [14] (2,4%) merupakan hal yang wajar, mengingat kedua penelitian tersebut mengukur debit pada aliran searah yang lebih stabil. Sebaliknya, penelitian ini menguji kondisi yang lebih representatif terhadap skenario nyata, yaitu pengisian dan pengosongan simultan, sehingga kompleksitas pengukuran yang lebih tinggi menjadi faktor utama perbedaan nilai error yang dihasilkan..

E. Hasil Pengukuran Volume Dengan Sensor Ultrasonik

Pengujian ini bertujuan Memverifikasi keakuratan perhitungan konversi volume berdasarkan perubahan ketinggian air yang dideteksi oleh sensor ultrasonik menggunakan rumus frustum kerucut. Metode validasi dilakukan melalui pengisian air berkala dengan kelipatan 2 Liter menggunakan gelas ukur acuan. Evaluasi kesalahan dianalisis menggunakan rumus error relatif dan Error FSO. berbasis kapasitas total operasional tandon sebesar 21 Liter.

Tabel 12. Rata Rata Hasil Pengujian Volume Air

No	Tandon	rata rata Volume Aktual (L)	Rata rata Volume Ultrasonik (L)	Rata rata Selisih (L)	Rata rata Error% Relatif (%)	Rata rata Error% FSO (%)
1	T1	11.00	10.66	0.37	4.52%	1.76%
2	T2	11.00	10.71	0,40	4.81%	1.91%
3	T3	11.00	10.60	0,41	4.80%	1.93%

Pengujian volume dilakukan dengan mengisi tandon secara bertahap menggunakan gelas takar 1 liter (kelipatan 2 liter, 10 sampel per tandon, FSO = 21 liter). Berdasarkan tabel 12. ringkasan, rata-rata selisih volume pada Tandon 1, 2, dan 3 masing-masing sebesar 0,37 L, 0,40 L, dan 0,41 L dengan rata-rata Error FSO 1,76%, 1,91%, dan 1,93%. Nilai Error FSO di bawah 2% pada ketiga tandon memvalidasi ketepatan rumus frustum yang diimplementasikan pada SCADA. Perbedaan hasil antar tandon sangat kecil dan konsisten, menunjukkan bahwa metode perhitungan volume berbasis sensor ultrasonik dengan rumus frustum dapat digunakan untuk mengukur volume pada sistem monitoring tandon air.

F. Hasil Pengujian Alarm

Pengujian Alarm memastikan fungsi peringatan (alarm) pada sistem SCADA terpicu secara akurat dan andal tepat saat parameter ketinggian air menyentuh batas (threshold) yang telah dikonfigurasi Metode pengujian dilakukan dengan mengondisikan level air hingga mencapai *threshold* ekstrem sensor HC-SR04, yaitu kondisi *High* (> 28 cm) dan *Low* (< 5 cm).

Tabel 13 Hasil Pengujian Alarm

No	Tandon	Water Level Scada (cm)	Alarm Value	Keterangan Alarm	Keterangan
1	T1	4.90	2	Low Level	Berhasil
2	T1	28.4	1	High Level	Berhasil
3	T2	2.45	2	Low Level	Berhasil
4	T2	29.25	1	High Level	Berhasil
5	T3	4.88	2	Low Level	Berhasil
6	T3	28.75	1	High Level	Berhasil

Berdasarkan Tabel 13, sistem menunjukkan tingkat keberhasilan 100% pada ketiga tandon. Saat kondisi air turun di bawah 5 cm, SCADA langsung merespons dengan memicu Alarm Value kode 2 (Low Level). Sebaliknya, ketika air diisi melebihi batas 28 cm, sistem secara otomatis membaca kondisi tersebut sebagai kode 1 (High Level).

Keberhasilan ini membuktikan bahwa logika program pada SCADA telah terintegrasi secara responsif dan real-time dengan sensor ultrasonik. Secara teknis, pemicuan Low Level berfungsi vital sebagai peringatan dini (early warning) bahwa ketersediaan stok air di dalam tandon sudah kritis dan hampir habis, Sementara itu, status High Level berfungsi mencegah air tandon meluap (overflow). Dengan hasil pengujian yang seluruhnya berstatus "Berhasil", fungsi alarm ini dinyatakan valid dan andal untuk menjaga keamanan operasional sistem

G. Hasil Pengujian Kontrol Status Pompa

Pengujian ini dilakukan untuk memvalidasi keandalan logika kendali sistem SCADA dalam mengontrol aktivitas pompa air, baik melalui perintah manual (human-machine interface) maupun secara otomatis berbasis threshold

1) Kontrol Status Pompa Manual

Tabel 14. Hasil Pengujian Kontrol Manual

No	Tandon	Aksi	Status Sebelum	Status Sesudah	Berhasil
1	T1	Tekan ON	OFF	ON	Ya
2	T1	Tekan OFF	ON	OFF	Ya
3	T2	Tekan ON	OFF	ON	Ya
4	T2	Tekan OFF	ON	OFF	Ya
5	T3	Tekan ON	OFF	ON	Ya
6	T3	Tekan OFF	ON	OFF	Ya

Berdasarkan Tabel 14, pengujian kendali manual pada ketiga tandon menunjukkan tingkat keberhasilan 100%. Setiap kali operator menekan tombol ON atau OFF pada dasbor SCADA, sistem langsung merespons sehingga status fisik pompa berubah secara instan tanpa ada kegagalan atau keterlambatan (delay).

Secara teknis, keberhasilan ini membuktikan bahwa jalur komunikasi data dua arah antara perangkat lunak SCADA dan

relai penggerak pompa di lapangan sudah bekerja dengan sangat baik.

2) Kontrol Status Pompa Otomatis

Tabel 15. Hasil Pengujian Kontrol Pompa Otomatis

No	Tandon	Kondisi Pemicu	Water Level (cm)	Threshold (cm)	Status Pompa	Berhasil
1	T1	Low Level	1.62	≤ 5	ON	Ya
2	T1	High Level	28.6	≥ 28	OFF	Ya
3	T2	Low Level	4.8	≤ 5	ON	Ya
4	T2	High Level	29.3	≥ 28	OFF	Ya
5	T3	Low Level	3.6	≤ 5	ON	Ya
6	T3	High Level	28.2	≥ 28	OFF	Ya

Berdasarkan data pada Tabel 15, logika otomatisasi pada ketiga tandon menunjukkan tingkat keberhasilan mutlak sebesar 100%. Saat level air surut hingga menyentuh threshold ≤ 5 cm SCADA secara instan menyalakan pompa. Sebaliknya, ketika pengisian air telah memenuhi tandon hingga ≥ 28 cm, sistem langsung mematikan pompa. Secara analisis teknis, hasil ini membuktikan bahwa algoritma Script pada SCADA telah bekerja dengan sangat responsif dan *real-time*. Ketepatan pemicuan ini sangat krusial untuk menjamin kontinuitas ketersediaan stok air di dalam tandon sekaligus mengeliminasi risiko air meluap (overflow).

H. Hasil Pengujian Telegram

Mengukur waktu tunda (delay/latensi) komunikasi data antara platform Telegram dengan sistem SCADA untuk memastikan fungsi Notifikasi, monitoring dan kontrol jarak jauh berjalan responsif. Metode pengujian ini menggunakan stopwatch untuk mengukur delay respons dari sistem.

1) Pengujian Delay Monitoring

Tabel 16. Hasil Pengujian Delay Monitoring Telegram

No	Provider	Jumlah Pengujian /Cek	Delay Minimal (dtk)	Delay Maximal (dtk)	Rata – Rata Delay (dtk)	Keberhasilan
1	Paket Data 4G Indoosat	10	1.00	3.13	2.25	100%
2	Wifi	10	1.12	4.21	2.32	100%

Berdasarkan Tabel 16, kedua jenis jaringan internet menunjukkan tingkat keberhasilan mutlak sebesar 100%. Hal ini membuktikan bahwa seluruh pesan interupsi atau status monitoring yang dikirim oleh sistem berhasil diterima oleh aplikasi Telegram tanpa ada yang gagal (drop). Dari segi kecepatan, Paket Data 4G Indoosat sedikit lebih cepat dengan rata-rata delay 2,25 detik, sedangkan jaringan Wifi memiliki rata-rata 2,32 detik. Selisih performa yang sangat tipis (0,07

detik) membuktikan kedua koneksi sama-sama andal. Munculnya delay maksimal hingga 4,21 detik pada Wifi merupakan hal wajar akibat fluktuasi latensi lokal (network jitter) dan pembagian pita lebar (sharing bandwidth).

2) Pengujian Notifikasi Early Warning System

Tabel 17. Hasil Pengujian Delay Notifikasi Telegram

No	Provider	Jumlah Pengujian (Low & High Level)	Delay Minimal (dtk)	Delay Maximal (dtk)	Rata – Rata Delay (dtk)	Keberhasilan
1	Paket Data 4G Indoosat	18	2.04	5.38	3.54	100%
2	Wifi	18	2.38	5.80	3.61	100%

Berdasarkan Tabel 17, kedua jenis jaringan internet menunjukkan tingkat keberhasilan mutlak 100%. Hal ini menjamin bahwa seluruh pesan peringatan kondisi kritis tandon berhasil terkirim ke perangkat pengguna tanpa ada yang gagal (drop).

Dari segi kecepatan transmisi, Paket Data 4G Indoosat sedikit lebih unggul dengan rata-rata delay 3,54 detik dan waktu respons tercepat pada 2,04 detik. Sementara itu, jaringan Wifi memiliki rata-rata delay 3,61 detik dengan titik puncaknya mencapai 5,80 detik. Selisih rata-rata yang hanya 0,07 detik membuktikan bahwa kedua media komunikasi ini memiliki keandalan yang setara. Lonjakan delay maksimal hingga di atas 5 detik pada kedua provider karena sangat dipengaruhi oleh fluktuasi latensi jaringan (network jitter) serta kepadatan lalu lintas data pada waktu pengujian.

3) Pengujian Kontrol Status Pompa

Tabel 18. Hasil Pengujian Kontrol Pompa Telegram

No	Provider	Jumlah Pengujian (/on & /off)	Delay Minimal (dtk)	Delay Maximal (dtk)	Rata – Rata Delay (dtk)	Keberhasilan
1	Paket Data 4G Indoosat	15	0.50	4.45	2.54	100%
2	Wifi	15	0.90	4.00	2.17	100%

Berdasarkan Tabel 18, kedua jenis jaringan internet menghasilkan tingkat keberhasilan mutlak 100%. Hal ini menunjukkan bahwa seluruh instruksi /on maupun /off yang dikirimkan oleh operator melalui Telegram Bot berhasil diterima dan dieksekusi oleh sistem Scada.

Dari aspek kecepatan respons, jaringan Wifi memiliki rata-rata delay sedikit lebih cepat yaitu 2,17 detik, sementara Paket Data 4G Indoosat mencatatkan rata-rata 2,54 detik dengan waktu respons tercepat mencapai 0,50 detik. Selisih rata-rata yang sangat tipis (0,37 detik) membuktikan kedua media komunikasi memiliki keandalan yang setara. Munculnya

fluktuasi delay hingga kisaran 4 detik di karenakan kualitas sinyal seluler, dan latensi jaringan lokal saat pengujian.

I. Pengujian Keseluruhan Sistem

Pengujian keseluruhan sistem bertujuan untuk memverifikasi integrasi seluruh fungsi Water Level Control berbasis SCADA IoT. Evaluasi dilakukan terhadap keandalan pemantauan real-time (ketinggian, volume, dan status pompa) pada HMI SCADA dan Telegram, efektivitas kontrol pompa secara otomatis maupun manual, serta ketepatan pengiriman notifikasi Early Warning System (EWS) secara otomatis saat sistem mendeteksi kondisi kritis.

1) alarm & Monitoring

Tabel 19. Hasil Pengujian Keseluruhan Alarm & Monitoring

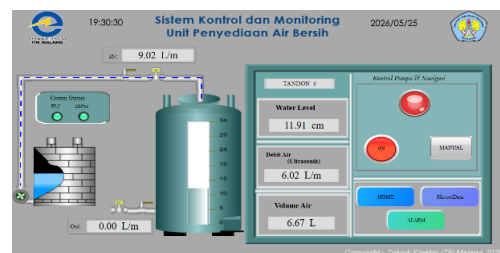
Skenario Pengujian	Parameter Validasi	Rentang Delay Respons Telegram (detik)	Status
Pemantauan On-Demand (/cek)	Pembacaan Water Level, Volume, dan dan Status Pompa antara SCADA & Telegram	0.54 – 4.25	Berhasil
Pemicuan Low Level (≤ 5 cm)	Indikator visual HMI SCADA dan penerimaan notifikasi teks EWS di Telegram	2.58 – 4.25	Berhasil
Pemicuan High Level (≥ 30 cm)	Indikator visual HMI SCADA dan penerimaan notifikasi teks EWS di Telegram	2.33 – 4.22	Berhasil

2) Pengujian Kontrol Pompa

Tabel 20. Hasil Pengujian Keseluruhan Kontrol Pompa

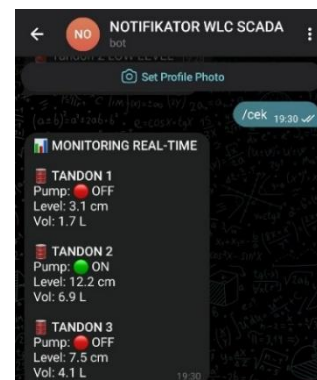
Metode Kontrol	Skenario Eksekusi	Rentang Delay Respons (detik)	Status
Manual Lokal	Eksekusi tombol ON/OFF langsung melalui antarmuka HMI SCADA	Instan (< 1)	Berhasil
Otomatis (Threshold)	Status pompa mati otomatis saat WL ≥ 30 cm dan status pompa menyala otomatis WL ≤ 5 cm	Instan (< 1)	Berhasil
Manual Jarak Jauh (WiFi)	Instruksi teks /on dan /off melalui jaringan broadband lokal	1.05 – 4.25	Berhasil
Manual Jarak Jauh (Seluler)	Instruksi teks /on dan /off melalui jaringan operator Indosat	2.33 – 5.50	Berhasil

Berdasarkan data pada Tabel 19 dan Tabel 20, seluruh skenario pengujian integrasi sistem mencatatkan tingkat keberhasilan mutlak sebesar 100%. Sinkronisasi data pemantauan real-time (/cek) berjalan presisi dengan respons tercepat 0,54 detik, diikuti pengiriman alarm EWS yang andal dalam rentang 2,33–4,25 detik saat kondisi kritis terdeteksi. Dari aspek pengendalian, intervensi lokal (manual HMI dan otomatis threshold) mampu mengeksekusi perintah secara instan (< 1 detik) karena berjalan langsung di jaringan lokal tanpa intervensi cloud, sedangkan kendali jarak jauh melalui Telegram Bot memiliki fluktuasi latensi yang dipengaruhi oleh media transmisi, di mana jaringan WiFi sedikit lebih responsif (1,05–4,25 detik) dibandingkan jaringan seluler 4G Indosat (2,33–5,50 detik) karena adanya tahapan routing data pada gateway operator. Secara keseluruhan, karena seluruh rentang delay pemantauan, alarm, dan kontrol jarak jauh secara konsisten berada jauh di bawah ambang batas toleransi skala prototipe (maksimal 10 detik), maka sistem SCADA IoT ini dinyatakan valid, sangat responsif, dan andal untuk dioperasikan secara mandiri.



Gambar 18. Monitoring Tandon 2 Via SCADA

Gambar 18, merupakan hasil monitoring Tandon via Scada dimana terdapat data water level, debit air (ultrasonik), volume, flow in dan flow out. Serta panel navigasi dan panel kontrol.



Gambar 19. Monitoring T2 via Telegram

Gambar 19, merupakan hasil monitoring Tandon via Telegram dimana terdapat data water level, volume, Serta status pompa pada tandon 1 hingga tandon 3.



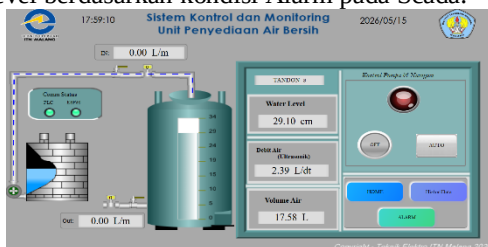
Gambar 20. Alarm High Tandon 3

Gambar 20, merupakan hasil Alarm High Level Tandon3 dimana terdapat ketika Water Level menyentuh angka 28,95 cm, sistem secara instan mengaktifkan alarm High Level.



Gambar 21 Nofitikasi Alarm Via Telegram

Gambar 21, merupakan hasil Notifikasi Alarm via Telegram menunjukkan pergantian kondisi High Level, Normal dan Low Level berdasarkan kondisi Alarm pada Scada.



Gambar 22. Auto Off Tandon 3

Gambar 22, merupakan hasil kontrol pompa tandon 1 mode otomatis dimana ketika nilai water level diatas 28cm secara otomatis mematikan pompa tandon 3.



Gambar 23. Kontrol Status Pompa /on 2 Telegram

Gambar 23, merupakan hasil kontrol pompa via Telegram dimana ketika ada perintah /on2 maka pompa tandon 2 akan menyala berdasarkan perintah tersebut. Dan dibuktikan dengan perintah /cek (monitoring)

V. KESIMPULAN

Sistem SCADA IoT berbasis Haiwell SCADA berhasil diimplementasikan untuk monitoring water level, volume, dan debit air secara real-time pada tiga tandon, serta kontrol pompa manual dan otomatis dengan tingkat keberhasilan 100%. ESP32 dan Telegram Bot API berhasil diimplementasikan sebagai alternatif efektif dan ekonomis terhadap fitur IoT SCADA, dengan delay notifikasi monitoring 0,54 – 4,25 detik, EWS (*Early Warning System*) 2,33 – 4,25 detik, dan kontrol pompa 1,05 – 5,50 detik tanpa ketergantungan signifikan terhadap jenis jaringan. Ketiga, sensor HC-SR04 terbukti mampu mengukur water level, volume, dan debit air hanya dengan satu instrumen yang sudah terpasang menggunakan pendekatan matematis, dengan rata-rata Error FSO water level dan volume di bawah 2% serta rata-rata selisih debit 0,19 hingga 1,47 L/menit pada ketiga tandon. Selisih debit yang lebih besar pada Tandon 3 disebabkan oleh debit aliran masuk yang lebih deras sehingga menimbulkan riak permukaan yang mempengaruhi konsistensi pembacaan sensor, bukan karena ketidakakuratan metode secara menyeluruh.

Beberapa hal yang disarankan untuk pengembangan sistem ke depan. Pertama, untuk meningkatkan akurasi water level dan debit air, disarankan memperbesar jumlah sampel pada filter rata-rata yang sudah diimplementasikan atau menggantinya dengan filter median. Selain itu, disarankan mengganti sensor HC-SR04 dengan sensor ultrasonik yang lebih baik seperti JSN-SR04. Penelitian ini juga belum memperhitungkan pengaruh pantulan gelombang ultrasonik dari dinding tandon yang berpotensi mengganggu sinyal, terutama pada prototipe berdiameter kecil, sehingga disarankan melakukan kalibrasi sudut pemasangan sensor secara lebih teliti serta mempertimbangkan penambahan baffle di sekitar sensor untuk meredam pantulan yang tidak diinginkan. Karena perhitungan debit dan volume langsung bergantung pada data water level, perbaikan pada saran pertama akan berdampak langsung terhadap stabilitas nilai debit yang dihasilkan oleh metode $\Delta V/\Delta t$ pada SCADA.

Kedua, sistem bot Telegram saat ini belum dilengkapi mekanisme autentikasi pengguna yang ketat sehingga berpotensi disalahgunakan apabila token bot diketahui pihak lain. Untuk mencegah akses dan kendali tidak sah terhadap sistem pompa, disarankan menambahkan validasi Chat ID pengguna yang diizinkan atau sistem PIN sebelum setiap perintah kontrol dapat dieksekusi.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Studi, M. Teknik, E. Diajukan, And A. Zohirin, "Prototype Rancang Bangun Distribusi Air Bersih Otomatis Berbasis Scada Tesis S-2 Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Gelar Magister Teknik."

- [2] Y. A. Sandi And H. Sulistiani, "Implementasi Internet Of Things Untuk Memonitoring Pengisian Dan Penggunaan Air Secara Otomatis," *Smatika Jurnal*, Vol. 15, No. 01, Pp. 60–69, Jun. 2025, Doi: 10.32664/Smatika.V15i01.1477.
- [3] Raka Dian Mahardi, Muhammad 'Atiq, And Sendy Maulana R, "Sistem Kontrol Level Air Pada Tandon Air Berbasis Microcontroller Dengan Penahan Riak Gelombang," *Uranus : Jurnal Ilmiah Teknik Elektro, Sains Dan Informatika*, Vol. 2, No. 2, Pp. 155–163, Jun. 2024, Doi: 10.61132/Uranus.V2i2.327.
- [4] S. Wardono *Et Al.*, "Sistem Pengendalian Otomatis Pompa Air Berbasis Scada Dengan Komunikasi Modbus Tcp/Ip," 2025.
- [5] A. Azis Rahmansyah, "Prototype Sistem Monitoring Dan Pengontrolan Level Tangki Air Berbasis Scada," *Jurnal Teknologi Terapan* |, Vol. 4, No. 1, 2018.
- [6] B. Dwarakanath, P. Kalpana Devi, A. Ranjith Kumar, A. S. M. Metwally, G. A. Ashraf, And B. L. Thamineni, "Smart Iot-Based Water Treatment With A Supervisory Control And Data Acquisition (Scada) System Process," *Water Reuse*, Vol. 13, No. 3, Pp. 411–431, Sep. 2023, Doi: 10.2166/Wrd.2023.052.
- [7] A. S. P. Ananda, I. M. Ii Munadhif, I. R. Isa, R. Y. A. Ryan, And R. I. Rini, "Integrasi Sistem Komunikasi Modbus Tcp/Ip Pada Plc Siemens S7-1200, Esp32, Dan Hmi," *Jurnal Elektronika Dan Otomasi Industri*, Vol. 10, No. 2, Pp. 234–244, Jul. 2023, Doi: 10.33795/Elkolind.V10i2.3254.
- [8] "Laporan Perancangan Rekayasa Teknologi."
- [9] I. H. Abd Halim, A. I. Mahamad, And M. F. Mohd Fuzi, "Automated Alert System For River Water Level And Water Quality Assessment Using Telegram Bot Api," *Journal Of Computing Research And Innovation*, Vol. 6, No. 3, Pp. 65–74, Sep. 2021, Doi: 10.24191/Jcrinn.V6i3.234.
- [10] O. Hutajulu, M. Mendoza, And Y. Simamora, "Feasibility Study Of Smart House Design With Esp32 And Telegram In A Simple House," *European Alliance For Innovation N.O.*, Dec. 2022. Doi: 10.4108/Eai.11-10-2022.2325332.
- [11] Q. A. Rihadatul 'Aisy, A. Dias Sulisty, And A. A. Ardelia, "Smart Water Heater Berbasis Esp32 Dengan Monitoring Real-Time Via Telegram," *Seminar Nasional Teknologi Informasi Dan Bisnis (Senatib)*, P. 2025.
- [12] A. Suryana And M. A. S. Yudono, "Ultrasonic Sensor For Measurement Of Water Flow Rate In Horizontal Pipes Using Segment Area," *Fidelity : Jurnal Teknik Elektro*, Vol. 5, No. 1, Pp. 60–68, Jan. 2023, Doi: 10.52005/Fidelity.V5i1.143.
- [13] G. A. P, K. I. Dan Warsito Jurusan Fisika, U. Lampung Jl Sumantri Brojonegoro No, And B. Lampung, "Perhitungan Debit Aliran Pada Sistem Aliran Terbuka Melalui Pengukuran Tinggi Muka Air Menggunakan Transduser Ultrasonik (Flow Calculation Of Open Channel System Through Measurement Of Water Level Using Ultrasonic Transducer)."
- [14] J. T. Elektro, D. Komputasi, J. P. Hapsari, And M. A. Ihsan, "Sistem Monitoring Ketinggian Dan Kualitas Air Tandon Berbasis Internet Of Things (Iot)," 2024, Doi: 10.32528/Elkom.V6i2.22424.
- [15] P. Musa *Et Al.*, *Internet Of Things: Konsep Internet Of Things: Konsep Dan Implementasinya Dan Implementasinya*.
- [16] P. Sethi And S. R. Sarangi, "Internet Of Things: Architectures, Protocols, And Applications," 2017, *Hindawi Publishing Corporation*. Doi: 10.1155/2017/9324035.
- [17] A. Imaduddin, A. Kusuma Wardhany, Dan Hatib Setiana, P. Studi Teknik Otomasi Listrik Industri, J. Teknik Elektro, And P. D. Negeri Jakarta Jl Ga Siwabessy, "Sistem Monitoring Trainer Kit Pltph Berbasis Esp32 Dan Plc Dengan Modbus Tcp/Ip," 2025.
- [18] K. Almay Diantoro, W. Pudji Muljanto, And M. Ardita, "Desain Scada Untuk Monitoring Dan Kontrol Pembangkit Listrik Tenaga Sampah Mikro Kampus Ii Itn Malang."
- [19] R. Mahesa, S. Prasetya, And Z. Ma'rup, "Rancang Bangun Sistem Scada Plant Monitoring Control Dengan Menggunakan Scada Berbasis Iot Di Pt.Xyz." [Online]. Available: [Http://Prosiding.Pnj.Ac.Id](http://Prosiding.Pnj.Ac.Id)
- [20] M. M. Abdulwahid, H. K. Abdullah, W. M. Ateah, And S. Ahmed, "Implementation Of Automated Water Based Level Management Model By Using Scada System And Plc," *Journal Of Energy Engineering And Thermodynamics*, No. 33, Pp. 40–51, May 2023, Doi: 10.55529/Jeet.33.40.51.
- [21] T. Tosin, "Perancangan Dan Implementasi Komunikasi Rs-485 Menggunakan Protokol Modbus Rtu Dan Modbus Tcp Pada Sistem Pick-By-Light," *Komputika : Jurnal Sistem Komputer*, Vol. 10, No. 1, Pp. 85–91, Mar. 2021, Doi: 10.34010/Komputika.V10i1.3557.

VII. BIODATA PENULIS



Radityo Indrastata lahir di Sidoarjo pada 23 November 2003. Penulis menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 02 Sidoarjo pada tahun 2022 dan saat ini menempuh pendidikan Strata-1 pada Program Studi Teknik Elektro, Peminatan Elektronika Kendali dan Instrumentasi, Institut Teknologi Nasional Malang