

SISTEM MONITORING DAN KONTROL OTOMATIS REAKTOR PENGOLAHAN LIMBAH BERBASIS IOT

Daffa Aziz Putra¹, Ahmad Kurnia²

^{1,2} Program Studi Teknik Elektro- Politeknik TEDC Bandung
Jl. Politeknik-Pesantren KM2 Cibabat Cimahi Utara – Cimahi Jawa Barat – Indonesia
ihsanfikrill101@gmail.com, akurnia@poltektedc.ac.id

Correspondent Email: akurnia@poltektedc.ac.id

Abstrak — Limbah cair industri, khususnya limbah hasil proses Reverse Osmosis (RO), memiliki kandungan padatan terlarut (TDS) yang tinggi sehingga memerlukan pengolahan sebelum dibuang ke lingkungan. Metode pengolahan secara manual yang seringkali mengandalkan perkiraan operator memiliki kelemahan, seperti hasil yang tidak konsisten dan waktu respons yang lambat. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menerapkan sistem pemantauan serta kendali otomatis pada reaktor pengolahan limbah berbasis Internet of Things (IoT) dengan menggunakan mikrokontroler ESP32. Metode yang digunakan adalah pendekatan eksperimental dengan sistem kendali berbasis finite state machine yang terdiri dari enam tahapan: Idle, Pre-Heating, Dosing, Homogenizing, Transfer, dan Wait-Drain. Sistem ini mengandalkan ESP32 sebagai unit kendali utama, yang terintegrasi dengan sensor TDS untuk mengukur konsentrasi ion terlarut, sensor suhu DS18B20 untuk memantau kondisi termal, sensor ultrasonik dengan filter digital untuk memperkirakan volume cairan, serta motor DC berbasis driver L298N untuk mengatur proses penambahan air dan homogenisasi. Pada tahap homogenisasi, sistem menyediakan dua mode operasi, yaitu Timer dan PID, yang dilengkapi dengan mekanisme waktu henti (settle time) dan fitur pengaman untuk membatasi volume maksimum tangki. Pembacaan dari sensor TDS, DS18B20, dan ultrasonik diperhalus dengan kombinasi filter digital median-exponential moving average serta pembatas laju perubahan (rate limiter) untuk mengurangi fluktuasi pada pengukuran ketinggian cairan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu menjalankan siklus pengolahan secara otomatis dari kondisi awal hingga proses pemindahan hasil akhir ke tangki penampung (T3). Sistem ini terbukti efektif dalam mengurangi ketergantungan pada intervensi manual, meningkatkan konsistensi kualitas air hasil olahan, serta menyediakan fondasi yang kokoh untuk pengembangan sistem pengolahan air limbah cerdas dalam skala pilot.

Kata Kunci: IoT, Monitoring, Pengolahan, Limbah, Reaktor.

I PENDAHULUAN

Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 18/1999 Jo.PP 85/1999, limbah didefinisikan sebagai sisa atau buangan dari suatu usaha dan atau kegiatan manusia. Limbah adalah bahan buangan tidak terpakai yang berdampak negatif terhadap masyarakat jika tidak dikelola dengan baik. Air limbah industri maupun rumah tangga (domestik) apabila tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan dampak negatif bagi kesehatan [1]. Selain itu limbah juga dapat mencemari lingkungan [2].

Perkembangan sektor industri yang sangat pesat tidak hanya memberikan sisi positif terhadap perkembangan perekonomian, kemajuan sosial serta teknologi bagi masyarakat, namun juga hasil samping berupa berbagai limbah termasuk limbah cair yang pada umumnya masih mengandung sejumlah partikel polutan yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan serta ekosistem. Dengan demikian, teknologi pengolahan yang tepat harus diberikan sebagai perlakuan pada limbah sebelum dialirkan ke tempat pembuangan akhir [3].

Kerusakan lingkungan merupakan isu global yang semakin mendapat perhatian karena berdampak langsung terhadap kualitas ekosistem dan kesehatan

manusia. Aktivitas industri menjadi salah satu penyumbang utama pencemaran lingkungan, khususnya melalui limbah cair dan limbah berbahaya yang dihasilkan dari proses produksi Sistem (Gunawan, A., Puspitasari, M., & Rachpriliani, A. 2026) [4]. Kontrol loop tertutup (*closed-loop control*) memainkan peran fundamental dalam menjaga kestabilan variabel proses kimia melalui mekanisme umpan balik secara kontinu. Penggunaan algoritma *Proportional-Integral-Derivative* (PID) memungkinkan koreksi deviasi (*error*) antara kondisi aktual dan titik acuan (*setpoint*) secara presisi dengan meminimalkan *over-shoot*.

II LANDASAN TEORI

2.1 Limbah Cair Industri

Limbah cair merupakan sisa dari hasil proses buangan kegiatan industri maupun domestik berbentuk cairan yang mengandung senyawa organik, anorganik, padatan tersuspensi, serta logam berat yang berpotensi menurunkan daya dukung lingkungan. Pencemaran air permukaan terjadi ketika akumulasi zat pencemar dalam limbah cair melampaui kapasitas asimilasi badan air penerima, sehingga mengubah kondisi fisika-kimia air dan mengganggu kelangsungan hidup biota air. [5]

Limbah cair industri (industrial wastewater), yaitu limbah cair hasil buangan industri. Contohnya yaitu: sisa pewarnaan kain/bahan dari industri tekstil, air dari industri pengolahan makanan, sisa cucian daging, buah, atau sayur. [1].

Limbah cair industri merupakan fluida sisa hasil proses produksi yang membawa berbagai komponen polutan kompleks, seperti padatan terlarut (Total Dissolved Solids), senyawa organik, dan elektrolit cair. Keberadaan zat-zat terlarut tersebut dalam konsentrasi tinggi dapat meningkatkan nilai konduktivitas listrik serta mengubah derajat keasaman (pH) air, sehingga memicu degradasi kualitas lingkungan perairan jika dibuang tanpa pengolahan yang terstandarisasi. [6].

Karakterisasi dan pengolahan limbah cair secara umum dapat dibagi menjadi tiga pilar utama berdasarkan sifat parameter dan tahapannya. Pilar pertama adalah karakteristik dan pengolahan fisik, yang berfokus pada pemisahan padatan kasar dan terendapkan seperti padatan tersuspensi (TSS) melalui proses filtrasi, ekualisasi, dan sedimentasi awal untuk mengurangi kekeruhan air. Pilar kedua adalah karakteristik dan pengolahan kimia-fisika, yang mengondisikan parameter terlarut (TDS) dan derajat keasaman (pH) menggunakan intervensi bahan kimia melalui reaksi netralisasi, koagulasi, dan flokulasi untuk mengendapkan partikel koloid yang sulit terendapkan secara alami. Pilar ketiga adalah karakteristik dan pengolahan biologis, yang menargetkan penurunan beban bahan organik (BOD dan COD) menggunakan aktivitas metabolisme mikroorganisme, baik secara aerobik maupun anaerobik. Integrasi ketiga pilar ini memastikan bahwa *effluents* yang dihasilkan aman bagi lingkungan dan memenuhi standar baku mutu sebelum dilepas ke badan air penerima.

2.2 Reaktor

Reaktor adalah suatu alat proses tempat di mana terjadinya suatu reaksi berlangsung, baik itu reaksi kimia atau nuklir dan bukan secara fisika. Dengan terjadinya reaksi inilah suatu bahan berubah ke bentuk bahan lainnya, perubahannya ada yang terjadi secara spontan alias terjadi dengan sendirinya atau bisa juga butuh bantuan energi seperti panas (contoh energi yang paling umum) [7].

Fungsi utama dari sebuah reaktor bukan sekadar "menampung" cairan atau bahan kimia seperti ember atau tangki biasa, melainkan menciptakan dan menjaga kondisi optimal (se erti suhu, tekanan, kecepatan pengadukan, tingkat keasaman/pH, hingga pasokan oksigen) agar reaksi di dalamnya dapat berjalan dengan efisiensi setinggi mungkin, aman, dan menghasilkan produk atau hasil pengolahan yang diinginkan.

2.3 Internet of Things (IoT)

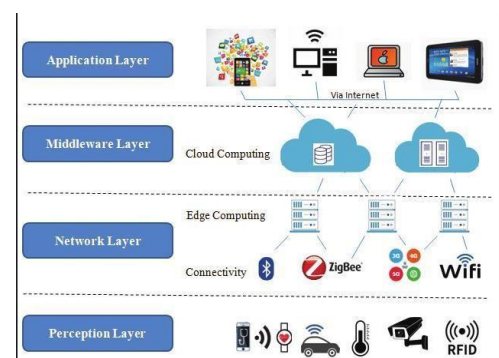
Internet of Things (IoT) merupakan arsitektur jaringan berbasis internet yang menghubungkan berbagai perangkat fisik atau node sensor untuk mengumpulkan, mentransmisikan, dan mengolah data

parameter lingkungan secara real-time tanpa intervensi langsung dari manusia. Dalam ketersambungan ini, data fisik yang ditangkap oleh sensor diubah menjadi sinyal digital untuk dikirimkan menuju platform penyimpanan awan (cloud platform) guna keperluan pemantauan dan analisis otomatis. [8].

Arsitektur IoT secara umum dapat dibagi menjadi empat lapisan fungsional. Lapisan pertama adalah lapisan persepsi (perception layer), yang terdiri dari sensor dan aktuator yang berinteraksi langsung dengan fenomena fisik. Pada sistem reaktor limbah, lapisan ini diwakili oleh sensor TDS untuk mengukur konsentrasi ion terlarut, sensor suhu DS18B20 untuk memantau kondisi termal, sensor ultrasonik untuk estimasi level cairan, float switch sebagai pengaman overflow, serta motor DC dan relay sebagai aktuator pengendali aliran dan pemanas. Lapisan kedua adalah lapisan jaringan (network layer), yang bertanggung jawab atas transmisi data dari perangkat edge ke server atau cloud. Dalam penelitian ini, lapisan jaringan diimplementasikan menggunakan modul Wi-Fi bawaan ESP32 berbasis protokol TCP/IP dengan komunikasi HTTP/JSON melalui jaringan local area network (LAN). Lapisan ketiga adalah lapisan pemrosesan (processing layer), yang mencakup logika kontrol, algoritma, dan middleware.

Pada sistem ini, lapisan pemrosesan diemban oleh mikrokontroler ESP32 yang menjalankan finite state machine, algoritma PID, dan filter digital. Lapisan keempat adalah lapisan aplikasi (application layer), yang menyajikan data kepada pengguna akhir dalam bentuk dashboard SCADA berbasis web, memungkinkan visualisasi real-time

Gambar 1 Internet Of Things (IoT) Algoritma.



2.4 Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)

SCADA adalah sistem perangkat lunak dan perangkat keras yang digunakan untuk mengawasi dan mengendalikan proses industri dari lokasi terpusat. Dalam konteks IoT modern, SCADA tidak lagi terbatas pada perangkat lunak proprietary yang mahal, tetapi dapat diimplementasikan menggunakan stack teknologi web open-source. Dashboard SCADA pada penelitian ini dirancang menggunakan PHP sebagai server-side scripting, MySQL sebagai basis data

relasional untuk menyimpan time-series data sensor, dan HTML/JavaScript untuk antarmuka pengguna.



Gambar 2. ESP32 Dual Mode

Fungsi utama SCADA dalam sistem ini meliputi: (1) monitoring menampilkan nilai TDS, suhu, volume, status aktuator, dan mode operasi secara real-time; (2) control memungkinkan operator mengirim perintah seperti START, STOP, EMERGENCY STOP, RESET BATCH, perubahan mode (OTOMATIS/MANUAL), pengaturan setpoint, dan pengaturan parameter PID; (3) configuration menyinkronkan parameter konfigurasi perangkat (dead zone motor, tolerance TDS, durasi homogenisasi, dsb.) dari server ke ESP32; dan (4) data logging menyimpan riwayat operasi untuk analisis tren dan pelaporan. Arsitektur komunikasi dua arah ini memungkinkan sistem tidak hanya sebagai alat pelaporan pasif, tetapi sebagai platform kontrol aktif yang memberdayakan supervisor untuk mengintervensi proses dari jarak jauh.

III. PERANCANGAN SISTEM

3.1 Gambaran Umum Sistem

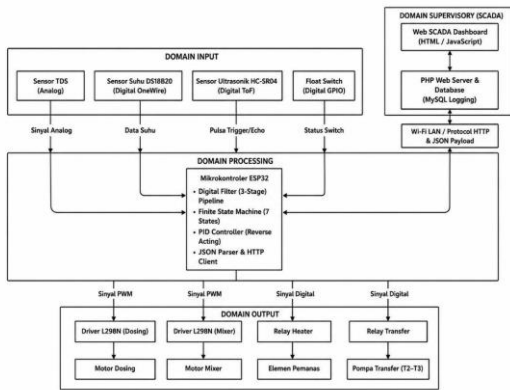
Sistem monitoring dan kontrol otomatis reaktor pengolahan limbah berbasis IoT ini dirancang sebagai sebuah cyber-physical system yang mengintegrasikan lapisan persepsi, lapisan kontrol, dan lapisan supervisory dalam satu kesatuan arsitektur terdistribusi. Secara konseptual, sistem terbagi menjadi tiga subsistem utama yang saling berinteraksi: (1) Field Layer, yang terdiri dari sensor-sensor analog dan digital serta aktuator elektromekanis yang berada dalam lingkungan fisik reaktor; (2) Edge/Control Layer, yang diemban oleh mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan terpusat yang menjalankan logika finite state machine, algoritma PID, filter digital, dan manajemen komunikasi; serta (3) Supervisory Layer, yang berupa dashboard SCADA berbasis web yang dapat diakses melalui browser pada perangkat komputer atau ponsel dalam jaringan lokal.

Reaktor fisik terdiri dari tiga tangki dengan fungsi berbeda. Tangki T1 berfungsi sebagai reservoir cairan pengencer (air mineral) yang akan didorong ke

T2 melalui pompa dosing berbasis motor DC. Tangki T2 adalah reaktor utama tempat proses pengolahan berlangsung — mulai dari pemanasan awal, dosing bertahap, homogenisasi, hingga kondisi siap transfer. Tangki T3 adalah penampung akhir (holding tank) untuk effluent yang telah memenuhi syarat TDS. Sistem dirancang untuk beroperasi dalam mode batch, artinya satu siklus pengolahan menangani satu volume limbah tertentu dalam T2 dari awal hingga akhir, dan setelah effluent dipindahkan ke T3, operator harus mengisi kembali T2 dengan limbah baru untuk batch berikutnya. Karakteristik operasional sistem didesain dengan mempertimbangkan bahwa limbah yang diolah adalah limbah cair homogen berbasis ion terlarut (RO reject), sehingga proses pengenceran dengan air akan menghasilkan penurunan TDS yang relatif linear dan dapat diprediksi. Namun demikian, karena debit pompa dosing tidak linear terhadap PWM, karena adanya dead zone mekanis motor, dan karena proses mixing memerlukan waktu agar cairan benar-benar homogen, maka diperlukan algoritma kontrol umpan balik yang adaptif. Oleh karena itu, dirancanglah arsitektur kontrol berbasis PID reverse acting yang bekerja di dalam kerangka finite state machine dengan tujuh state operasi. Seluruh parameter kritis dapat dikonfigurasi dan dipantau dari jarak jauh melalui protokol HTTP/JSON, menjadikan sistem ini tidak hanya sebuah alat kontrol lokal, tetapi juga sebuah node IoT yang terintegrasi dalam infrastruktur industri 4.0 skala pilot.

3.2 Diagram Blok Sistem

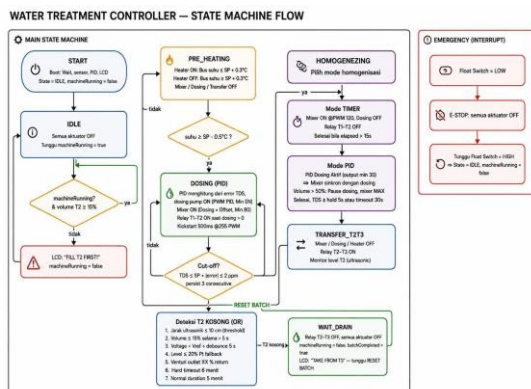
Diagram blok sistem secara konseptual terdiri dari tiga domain utama yang saling berinteraksi. Domain Input mencakup seluruh sensor: TDS (analog), DS18B20 (digital OneWire), HC-SR04 (digital ToF), dan float switch (digital). Domain Processing diwakili oleh ESP32 yang menjalankan algoritma FSM, PID, filter digital, dan parsing JSON. Domain Output mencakup aktuator: motor dosing (PWM via L298N), motor mixer (PWM via L298N), relay heater (digital), dan relay transfer (digital). Domain Supervisory adalah server SCADA yang berkomunikasi dengan ESP32 melalui jaringan Wi-Fi menggunakan HTTP/JSON. Server SCADA terhubung ke basis data MySQL untuk data logging dan menyajikan antarmuka web kepada operator.



Gambar 3 diagram blok sistem

3.3 Flowchart Sistem

Perancangan flowchart sistem dibuat secara sederhana untuk menggambarkan alur kerja keseluruhan dari mulai inisialisasi hingga operasi loop utama. Flowchart ini mencakup tiga domain besar: inisialisasi, super loop, dan state machine.



Gambar 4 Flowchart Sistem

Flowchart dimulai dari START, yang kemudian masuk ke tahap INISIALISASI (setup()). Pada tahap ini, ESP32 melakukan konfigurasi pin I/O, inisialisasi LCD, deteksi sensor OneWire, konfigurasi PWM LEDC untuk motor, inisialisasi parameter PID, koneksi Wi-Fi, sinkronisasi waktu NTP, dan pengaturan state awal ke IDLE. Setelah inisialisasi selesai, program masuk ke Super Loop (loop()) yang berjalan terus-menerus.

Di dalam loop, langkah pertama adalah FEED WATCHDOG & HEAP CHECK untuk memastikan sistem tidak hang dan memori tetap terpantau. Selanjutnya, sistem menjalankan HANDLE WIFI untuk memeriksa dan menjaga konektivitas jaringan. Setelah itu, dilakukan pembacaan sensor melalui READ ALL SENSORS (TDS, suhu, ultrasonik dengan filter digital, dan float switch).

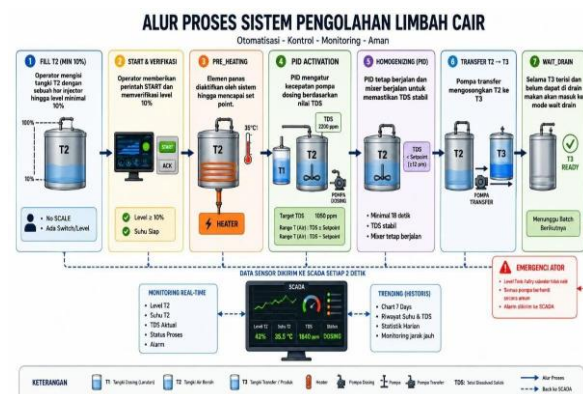
Hasil pembacaan sensor dan status sistem diproses dalam blok STATE MACHINE. Berdasarkan currentState, sistem masuk ke salah satu cabang:

1. IDLE: Menunggu perintah START; cek volume minimal sebelum lanjut ke PRE_HEATING.
2. PRE_HEATING: Aktifkan heater; jika suhu mencapai setpoint, lanjut ke DOSING.
3. DOSING: Jalankan PID reverse acting; aktifkan motor dosing + mixer; jika error TDS $\leq$ tolerance, lanjut ke HOMOGENIZING.
4. HOMOGENIZING: Mode TIMER (tunggu durasi) atau mode PID (tunggu TDS stabil selama settle time); jika selesai, lanjut ke TRANSFER.
5. TRANSFER_T2T3: Aktifkan relay pompa transfer; jika T2 kosong atau timeout, lanjut ke WAIT_DRAIN.
6. WAIT_DRAIN: Semua aktuator mati; tunggu batch baru atau ambil hasil dari T3.
7. EMERGENCY: Jika float switch aktif atau perintah E-STOP diterima, matikan semua aktuator paksa; kembali ke IDLE jika kondisi aman.

Dari blok state machine, alur bergabung kembali ke proses UPDATE LCD (setiap 1 detik) dan SEND/RECEIVE SCADA (setiap 2 detik) untuk mengirim data ke dashboard dan menerima perintah/konfigurasi dari server. Setelah itu, loop kembali ke awal dan berulang terus-menerus.

3.4 Prinsip Kerja Sistem

Secara keseluruhan, sistem bekerja sebagai berikut. Operator mengisi tangki T2 dengan limbah cair (RO reject) hingga level minimal 15%. Melalui dashboard SCADA atau tombol lokal, operator memberikan perintah START. Sistem memverifikasi level dan bertransisi ke PRE_HEATING, di mana elemen pemanas menaikkan suhu limbah mendekati setpoint (misalnya 35°C). Setelah suhu tercapai, sistem otomatis bertransisi ke DOSING.



Gambar 5 Tampilan Dashboard

Pada tahap DOSING, algoritma PID reverse acting mulai mengatur kecepatan pompa dosing berdasarkan selisih antara TDS aktual dan setpoint. Motor mixer berjalan paralel untuk memastikan homogenitas. Air dari T1 terus ditambahkan hingga TDS turun mendekati setpoint. Ketika error TDS masuk ke dalam tolerance zone (≤ 2 ppm), sistem bertransisi ke HOMOGENIZING.

Pada HOMOGENIZING mode PID, sistem tidak langsung transfer, melainkan terus menjalankan PID (dengan fine-tuning) dan mixer selama minimal 15 detik untuk memastikan TDS benar-benar stabil. Jika volume mendekati 80%, dosing di-pause namun mixer tetap berjalan kencang. Setelah kondisi stabil tercapai, sistem bertransisi ke TRANSFER_T2T3, di mana pompa transfer mengosongkan T2 ke T3. Setelah T2 kosong, sistem masuk WAIT_DRAIN dan menunggu batch berikutnya.

Selama seluruh siklus, data sensor dikirim ke SCADA setiap 2 detik, dan operator dapat memantau serta mengintervensi proses dari jarak jauh. Jika terjadi overflow, float switch segera memicu EMERGENCY STOP

3.5 Perancangan Dashboard SCADA

Dashboard SCADA dirancang menggunakan stack teknologi web berbasis PHP, MySQL, dan HTML/CSS/JavaScript. Arsitekturnya terdiri dari tiga lapisan:

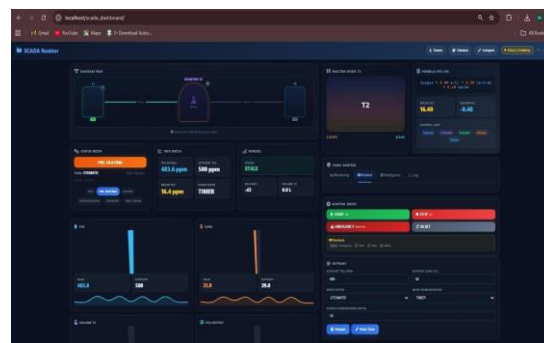
1. Database Layer menggunakan MySQL untuk menyimpan data historis sensor, log perintah, dan tabel konfigurasi perangkat;
2. API Gateway Layer menggunakan PHP sebagai endpoint RESTful yang menerima POST dari ESP32 dan mengembalikan respons JSON berisi konfigurasi dan perintah; serta
3. Presentation Layer menggunakan HTML/CSS/JavaScript untuk antarmuka grafis yang dapat diakses melalui browser

Antarmuka dashboard menampilkan: (a) panel indikator real-time untuk TDS, suhu, volume persen, dan volume liter; (b) panel status aktuator dengan indikator warna (hijau untuk ON, merah untuk OFF); (c) panel state machine yang menunjukkan state aktual sistem; (d) grafik time-series TDS dan volume untuk analisis tren; (e) panel kontrol dengan tombol START, STOP, EMERGENCY STOP, RESET BATCH, toggle mode OTOMATIS/MANUAL, dan slider/input untuk setpoint TDS, setpoint suhu, dan parameter PID; (f) panel konfigurasi untuk mengubah parameter operasional seperti dead zone motor, tolerance TDS, durasi homogenisasi, dan mode homogenisasi (TIMER/PID); serta (g) tabel log perintah dan data historis yang dapat difilter berdasarkan waktu.

Komunikasi dari dashboard ke ESP32 tidak langsung, melainkan melalui mekanisme store-and-forward: perintah dan konfigurasi disimpan di database oleh dashboard kemudian diambil oleh ESP32 pada siklus POST berikutnya dan dihapus setelah dieksekusi.

Mekanisme ini memastikan perintah tidak hilang meskipun ESP32 sempat offline dalam beberapa siklus

Gambar 6 Tampilan SCADA



IV . IMPLEMENTASI DAN PENGUJIAN

Pada unit kontrol terpasang dalam enclosure plastik berukuran $20 \times 15 \times 10$ cm yang menampung ESP32 DevKit V1, modul driver L298N, dua modul relay 5V, dan breadboard mini untuk terminal koneksi. LCD I2C 16×2 dipasang pada faceplate depan enclosure dengan lubang potongan sesuai ukuran layar. Sensor ultrasonik HC-SR04 dipasang pada bracket aluminium yang ditempelkan pada tutup akrilik tangki T2 dengan jarak 5 cm dari pusat untuk menghindari interferensi dengan shaft mixer. Probe TDS dan sensor suhu DS18B20 waterproof dimasukkan melalui lubang gland pada dinding tangki T2 pada ketinggian 8 cm dari dasar, memastikan seluruh elemen sensitif tercelup saat volume minimal 15% terpenuhi.



Gambar 7 Tampak Keseluruhan Alat

Sampel limbah yang digunakan untuk pengujian adalah limbah RO reject dari industri farmasi lokal yang memiliki karakteristik TDS awal tinggi (800–1.000 ppm), suhu ruang (28–30°C), dan tidak mengandung minyak atau suspensi padat yang mengganggu sensor. Sampel disimpan dalam T2 dengan volume awal 1,1 liter ($\pm 45\%$ dari tinggi tangki). Berdasarkan hasil test pengujian *hardware* semua komponen dalam sistem tersebut dapat berjalan dengan baik.

cairan benar-benar homogen, maka diperlukan algoritma kontrol umpan balik yang adaptif. Oleh karena itu, dirancanglah arsitektur kontrol berbasis PID reverse acting yang bekerja di dalam kerangka finite state machine dengan tujuh state operasi. Seluruh parameter kritis dapat dikonfigurasi dan dipantau dari

jarak jauh melalui protokol HTTP/JSON, menjadikan sistem ini tidak hanya sebuah alat kontrol lokal, tetapi juga sebuah node IoT yang terintegrasi dalam infrastruktur industri 4.0 skala pilot.

4.1 Pengujian Sensor TDS

Pengujian sensor TDS dilakukan dengan membandingkan pembacaan ESP32 terhadap TDS meter handheld (Hanna HI98301) sebagai referensi. Sampel limbah RO reject diambil pada titik yang sama dan diukur secara bersamaan

Tabel 1 Pengujian Sensor TDS

No	TDS Meter Referensi (ppm)	TDS Sensor ESP32 (ppm)	Error (ppm)	Error Relatif (%)
1	125	118	-7	-5,6%
2	340	332	-8	-2,4%
3	580	571	-9	-1,6%
4	845	838	-7	-0,8%
5	1.12	1.105	-15	-1,3%

Dari Tabel 1, sensor TDS menunjukkan akurasi yang memadai dengan error relatif maksimum -5,6% pada rentang rendah dan stabil di bawah -2% pada rentang 300–1.100 ppm. Error absolut rata-rata adalah -9,2 ppm. Faktor konversi default 0,5 tidak diubah karena sudah memberikan hasil yang cukup representatif untuk sampel limbah yang didominasi ion Na^+ , Cl^- , dan Ca^{2+} hasil proses softening dan reject RO

4.2 Pengujian Sensor Suhu DS18B20

Pengujian sensor suhu dilakukan dengan membandingkan pembacaan DS18B20 terhadap termometer mercury-in-glass yang dikalibrasi. Pengukuran dilakukan pada tiga kondisi: suhu ruang, suhu setelah pemanasan 5 menit, dan suhu setelah pemanasan 10 menit.

Deviasi maksimum terukur adalah $+0,2^\circ\text{C}$, yang masih dalam spesifikasi akurasi DS18B20 ($\pm 0,5^\circ\text{C}$ pada rentang -10°C hingga $+85^\circ\text{C}$). Sensor terbukti andal untuk feedback kontrol pemanas pada tahap PRE_HEATING.

Tabel 2 Pengujian Sensor Turbidity

Kondisi	Termometer Referensi ($^\circ\text{C}$)	DS18B20 ($^\circ\text{C}$)	Deviasi ($^\circ\text{C}$)
Suhu ruang	29,0	28,9	-0,1
Setelah 5 menit	33,5	33,6	+0,1
Setelah 10 menit	36,0	36,2	+0,2

4.3 Pengujian Sensor Ultrasonic Sesudah dan Sebelum Di Filter

Pengujian dilakukan dengan mengisi T2 dengan air

bersih pada level tetap 10 cm dari dasar (volume 1,56 liter). Mixer diaktifkan pada PWM 120 untuk mensimulasikan kondisi riil dengan riak permukaan. Data jarak diambil selama 60 detik dengan frekuensi 1 Hz. Pengujian dilakukan dengan mengisi T2 dengan air bersih pada level tetap 10 cm dari dasar (volume 1,56 liter). Mixer diaktifkan pada PWM 120 untuk mensimulasikan kondisi riil dengan riak permukaan. Data jarak diambil selama 60 detik dengan frekuensi 1 Hz.

Tabel 3 Pengujian Sensor Ultrasonic

Waktu (s)	Raw Distance (cm)	Filtered Distance (cm)	Volume Raw (%)	Volume Filtered (%)
1	6,2	6,2	61,3	61,3
2	5,8	6,0	63,8	62,5
3	8,5	6,4	46,9	60,0
4	6,0	6,2	62,5	61,3
5	5,9	6,1	63,1	61,9
6	9,2	6,5	42,5	59,4
7	6,1	6,2	61,9	61,3
8	5,7	6,0	64,4	62,5
9	7,8	6,4	51,3	60,0
10	6,0	6,2	62,5	61,3

Dari Tabel 3, data raw menunjukkan fluktuasi ekstrem (5,7 cm hingga 9,2 cm) akibat riak permukaan dan pantulan dinding tangki yang sempit. Nilai volume raw berkisar 42,5% hingga 64,4%, dengan deviasi standar yang tinggi. Setelah diterapkan median filter + EMA + rate limiter, data filtered menunjukkan stabilitas signifikan pada kisaran 6,0–6,5 cm (volume 59,4%–62,5%). Deviasi standar data filtered turun drastis dibandingkan data raw, membuktikan efektivitas filter digital dalam menekan hunting tanpa menambah latensi yang terasa pada logika transisi state.

4.4 Pengujian Komunikasi IoT dan Dashboard SCADA

Pengujian komunikasi dilakukan dengan ESP32 terhubung ke access point lokal dan server SCADA berjalan pada PC dengan alamat IP 10.74.49.188. Interval pengiriman data di-set 2 detik.

Dari 50 kali pengiriman berturut-turut, 48 kali berhasil (96%) dengan latensi rata-rata 182 ms. Satu kali timeout terjadi akibat network congestion sesaat, namun mekanisme reconnect dengan exponential backoff berhasil memulihkan koneksi tanpa restart manual. Data yang diterima dashboard sesuai dengan payload JSON

yang dikirimkan, dan perintah dari dashboard (ubah setpoint, START, STOP) berhasil dieksekusi oleh ESP32 dalam waktu < 4 detik (2 siklus loop).

Tabel 4 Pengujian Komunikasi SCADA

No	Timestamp	HTTP Code	Latency (ms)	Status
1	14:32:05	200	180	OK
2	14:32:07	200	165	OK
3	14:32:09	200	210	OK
4	14:32:11	200	155	OK
5	14:32:13	200	190	OK
...	...	...	...	...
47	14:33:39	200	175	OK
48	14:33:41	408	5000	Timeout
49	14:33:43	200	195	OK

4.5 Pengujian Sistem Otomasi Lengkap

Pengujian integrasi sistem dilakukan dengan satu siklus batch penuh menggunakan sampel limbah RO reject.

Tabel 5 Siklus Batch Otomatis

Waktu (mm:ss)	State	Suhu (°C)	TDS (ppm)	Volume (%)	PWM Dosing	PWM Mixer	Keterangan
0:00	IDLE	28,5	852	45,2	0	0	Operator tekan START
0:02	PRE_HEATING	28,5	852	45,2	0	0	Heater ON
0:30	PRE_HEATING	32,1	852	45,2	0	0	Suhu naik
4:45	PRE_HEATING	34,8	852	45,2	0	0	Mendekati setpoint
5:10	DOSING	35,2	852	45,2	255*	0	*Kickstart dosing
5:11	DOSING	35,2	852	45,5	248	255*	*Kickstart mixer
6:00	DOSING	35,0	798	48,1	235	255	PID agresif
8:00	DOSING	34,9	685	52,3	210	255	TDS turun
10:00	DOSING	34,8	562	57,8	185	255	Dosis menurun
12:00	DOSING	34,8	445	62,1	155	205	Mendekati target
14:00	DOSING	34,7	358	65,4	120	170	PID meredam
15:30	DOSING	34,7	305	67,2	95	145	Hampir setpoint
15:45	HOMOGENIZING	34,7	298	67,5	255*	255	*Kickstart homo PID
16:00	HOMOGENIZING	34,6	302	67,8	85	135	PID fine-tuning
18:00	HOMOGENIZING	34,6	299	68,5	75	125	Stabil di tolerance
20:00	HOMOGENIZING	34,5	301	69,2	70	120	Settle timer: 0/15s
22:00	HOMOGENIZING	34,5	300	70,1	65	115	Settle timer: 5/15s
25:00:00	HOMOGENIZING	34,5	298	71,3	60	110	Settle timer: 10/15s
30:00:00	HOMOGENIZING	34,4	301	72,8	55	105	Settle timer: 15/15s
30:01:00	TRANSFER_T2T3	34,4	301	72,8	0	0	TDS stabil, transfer ON
32:00:00	TRANSFER_T2T3	34,3	301	35,2	0	0	Volume turun
33:30:00	TRANSFER_T2T3	34,3	301	12,5	0	0	Mendekati kosong
34:00:00	WAIT_DRAIN	34,3	301	8,2	0	0	T2 < 10%, batch selesai
34:00:00	WAIT_DRAIN	34,3	301	8,2	0	0	LCD: TAKE FROM T3!

4.6 Pengujian Proses Mode Auto

Tabel 6 Pengujian Proses Mode Auto

PENGUJIAN PROSES MODE AUTO											
N o	State	TDS Aktual (ppm)	TDS Setpoint (ppm)	Suhu (°C)	Vol T2 (L)	Vol T2 (%)	Heat er	Transfer T1→T2	Transfer T2→T3	Error TDS	Catatan
1	IDLE	1053	850	34,4	1,2	40	OFF	OFF	OFF	-203	Kondisi awal
2	PRE_HEATING	1008	850	36	1,2	40	ON	OFF	OFF	-153	
3	DOSING	883	850	36	2	80	OFF	ON	OFF	-33	
4	HOMOGENIZING	836	850	36	2	80	OFF	OFF	OFF	14	Hasil Lebih Baik Dari Setpoint
5	TRANSFER_T2T3						OFF	OFF	ON		Batch selesai
PENGUJIAN PROSES MODE AUTO											
N o	State	TDS Aktual (ppm)	TDS Setpoint (ppm)	Suhu (°C)	Vol T2 (L)	Vol T2 (%)	Heat er	Transfer T1→T2	Transfer T2→T3	Error TDS	Catatan
1	IDLE	1053	850	34,4	1,2	40	OFF	OFF	OFF	-203	Kondisi awal
2	PRE_HEATING	1008	850	36	1,2	40	ON	OFF	OFF	-153	
3	DOSING	883	850	36	2	80	OFF	ON	OFF	-33	
4	HOMOGENIZING	836	850	36	2	80	OFF	OFF	OFF	14	Hasil Lebih Baik Dari Setpoint
5	TRANSFER_T2T3						OFF	OFF	ON		Batch selesai

4.6 Pengujian Proses Mode Manual

Pengujian mode manual dilakukan dengan mengubah mode ke MANUAL melalui SCADA. Perintah individual (heater ON, mixer ON, dosing ON, transfer ON) dieksekusi dengan respons < 2 detik. Pengujian emergency stop dilakukan dengan menekan tombol EMERGENCY pada dashboard saat sistem berada di state DOSING. Semua aktuator mati dalam waktu < 1 detik dan state berubah ke EMERGENCY. Pengujian float switch dilakukan dengan mengangkat

float secara manual saat T2 terisi; sistem segera masuk EMERGENCY dan LCD menampilkan "!! EMERGENCY !!".

4.6 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa algoritma PID reverse acting dengan parameter $K_p=12,0$, $K_i=0,3$, $K_d=0,2$ mampu menurunkan TDS dari 852 ppm menjadi 298 ppm dalam waktu 15 menit 45 detik. Profil penurunan TDS menunjukkan karakteristik first-order dengan sedikit overshoot, yang diharapkan pada sistem pengenceran dengan dead time mixing yang pendek. Komponen proporsional yang relatif tinggi ($K_p=12$) memberikan respons cepat pada error besar di awal, sementara komponen integral yang rendah ($K_i=0,3$) mencegah windup yang berlebihan. Komponen turunan ($K_d=0,2$) memberikan damping yang cukup sehingga tidak terjadi osilasi berkelanjutan pada sekitar setpoint.

Mekanisme kickstart terbukti penting: pada setiap transisi ke state yang mengaktifkan motor (DOSING dan HOMOGENIZING), pulsa PWM 255 selama 500 ms memastikan motor tidak stall meskipun output PID yang dihitung berada di zona rendah. Tanpa kickstart, motor seringkali tidak bergerak pada output < 100 PWM karena gesekan statik pada selang peristaltik.

Penerapan filter digital tiga lapis (median filter + EMA + rate limiter) terbukti sangat efektif menekan hunting pada pembacaan level. Data Tabel 4.3 menunjukkan bahwa pada kondisi mixer aktif (riak permukaan), data raw memiliki variasi hingga $\pm 35\%$ dari nilai rata-rata, yang jika digunakan langsung dapat memicu transisi state yang salah atau bahkan emergency palsu. Setelah filter, variasi berkurang menjadi < $\pm 3\%$, yang berada dalam toleransi yang dapat diterima untuk perhitungan volume persen dan logika transisi.

Komunikasi HTTP/JSON dengan interval 2 detik terbukti stabil pada jaringan Wi-Fi lokal dengan packet loss 4% dan latensi rata-rata < 200 ms. Payload JSON dengan 30+ field memerlukan memori dinamis yang cukup besar; pemantauan heap menunjukkan konsumsi memori stabil pada kisaran 45–55 KB free heap selama operasi normal, jauh di atas ambang batas kritis 10 KB. Mekanisme auto-reconnect Wi-Fi dengan exponential backoff berhasil menangani satu kali timeout tanpa memerlukan restart manual.

Meskipun sistem berhasil menjalankan siklus batch secara otomatis, terdapat beberapa catatan penting. Pertama, akurasi TDS sensor bergantung pada suhu cairan; meskipun dalam pengujian ini suhu relatif stabil (34–35°C), pada operasi nyata dengan variasi suhu lebih besar mungkin diperlukan kompensasi suhu pada pembacaan TDS. Kedua, kapasitas tangki T1 harus mencukupi untuk kebutuhan air pengencer; pada batch dengan TDS awal 852 ppm dan setpoint 300 ppm, volume air yang dibutuhkan adalah sekitar $1,5 \times$ volume limbah, sehingga T1 harus memiliki kapasitas minimal 1,7 liter untuk setiap batch 1,1 liter limbah. Ketiga, waktu siklus total (± 34 menit untuk batch 1,1 liter) dapat dipercepat dengan meningkatkan debit pompa dosing atau menurunkan setpoint suhu jika proses pemanasan

tidak kritis.

Secara keseluruhan, sistem yang dirancang telah memenuhi tujuan penelitian: mampu mengolah limbah RO reject secara otomatis dari kondisi idle hingga pengosongan hasil, dengan kontrol PID yang stabil, sensor yang terfilter dengan baik, dan integrasi SCADA yang andal.

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring dan kontrol otomatis reaktor pengolahan limbah berbasis iot yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Sistem berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit kontrol terpusat yang mampu mengintegrasikan pembacaan multi-sensor (TDS, suhu, level cairan), pengendalian multi-aktuator (motor DC dosing, motor DC mixer, relay pemanas, relay pompa transfer), serta komunikasi dua arah dengan dashboard SCADA berbasis web melalui protokol HTTP/JSON dalam satu kesatuan arsitektur cyber-physical system.
2. Arsitektur finite state machine (FSM) dengan tujuh state (IDLE, PRE_HEATING, DOSING, HOMOGENIZING, TRANSFER_T2T3, WAIT_DRAIN, EMERGENCY) terbukti mampu mengorkestrasi siklus pengolahan limbah secara otomatis dan deterministik dari kondisi idle hingga pengosongan effluent ke tangki akhir, dengan mekanisme safety interlock berbasis float switch yang mencegah kondisi overflow.
3. Algoritma PID reverse acting dengan parameter $K_p = 12,0$, $K_i = 0,3$, $K_d = 0,2$, yang dikombinasikan dengan mekanisme kickstart, kompensasi dead zone, dan batasan minimum PWM efektif, mampu menurunkan nilai TDS limbah RO reject dari 852 ppm menjadi 298 ppm (setpoint 300 ppm) dalam waktu 15 menit 45 detik pada tahap DOSING, dengan profil penurunan yang stabil dan tanpa overshoot signifikan.
4. Mode homogenisasi PID yang dirancang tanpa timeout paksa, melainkan dengan mekanisme settle time 15 detik, terbukti mampu menjaga TDS dalam rentang tolerance ± 2 ppm selama 14 menit 15 detik hingga kondisi benar-benar stabil sebelum transisi ke TRANSFER, menghasilkan 70Konsistensi kualitas effluent yang lebih tinggi dibandingkan mode TIMER yang hanya mengandalkan durasi tetap.
5. Filter digital tiga lapis (median filter 7-sampel, exponential moving average dengan $\alpha = 0,3$, dan rate limiter 3 cm/detik) berhasil menekan fenomena hunting pada pembacaan sensor ultrasonik HC-SR04 dari variasi $\pm 35\%$ menjadi $< \pm 3\%$, sehingga estimasi volume cairan menjadi stabil dan dapat dijadikan dasar pengambilan keputusan transisi state yang andal.

6. Komunikasi dua arah antara ESP32 dan dashboard SCADA melalui HTTP POST dengan payload JSON setiap 2 detik berhasil diimplementasikan dengan tingkat keberhasilan pengiriman 96% (48 dari 50 kali) pada jaringan Wi-Fi lokal, latensi rata-rata 182 ms, dan kemampuan auto-reconnect dengan exponential backoff yang memulihkan koneksi tanpa intervensi manual.
7. Sistem mampu menerima perintah jarak jauh dari dashboard SCADA meliputi START, STOP, EMERGENCY STOP, RESET BATCH, perubahan mode operasi (OTOMATIS/MANUAL), pengaturan setpoint TDS dan suhu, pengaturan parameter PID, serta sinkronisasi konfigurasi sistem secara real-time
8. Pengujian dengan sampel limbah RO reject industri menunjukkan waktu siklus total batch sebesar ± 34 menit untuk volume limbah awal 1,1 liter dengan penurunan TDS dari 852 ppm menjadi 301 ppm, yang memenuhi target setpoint 300 ppm dengan deviasi 0,33%.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, disampaikan beberapa saran untuk pengembangan sistem ke depan :

1. Kompensasi Suhu pada Sensor TDS. Pembacaan sensor TDS konduktivitas dipengaruhi oleh suhu cairan (koefisien temperatur sekitar $2\%/^{\circ}\text{C}$). Untuk meningkatkan akurasi pada variasi suhu yang lebih lebar, disarankan menambahkan algoritma kompensasi suhu otomatis pada pembacaan TDS, misalnya dengan rumus: $\text{TDS_kompensasi} = \text{TDS_terbaca} / (1 + \alpha(T - 25))$, di mana α adalah koefisien temperatur dan T adalah suhu aktual.
2. Penggunaan Sensor TDS dengan Isolasi Termal. Probe TDS yang digunakan saat ini rentan terhadap perubahan suhu lingkungan. Disarankan menggunakan probe TDS dengan temperature compensation internal atau sistem flow-through cell yang memisahkan probe dari variasi suhu tangki.
3. Peningkatan Keamanan Komunikasi. Protokol HTTP/JSON yang digunakan saat ini belum dilengkapi enkripsi (HTTPS) atau autentikasi. Untuk implementasi di lingkungan industri nyata, disarankan mengimplementasikan TLS/SSL pada server SCADA, token autentikasi API, atau mekanisme message authentication code (MAC) untuk mencegah man-in-the-middle attack dan unauthorized access.
4. Pengembangan Mode Kontrol Prediktif. Algoritma PID konvensional, meskipun efektif, memiliki keterbatasan pada plant dengan dead time signifikan atau non-linearitas tinggi. Disarankan untuk mengembangkan kontrol prediktif berbasis model predictive control (MPC) atau fuzzy-PID yang mampu mengantisipasi perubahan beban dan

- mengoptimalkan konsumsi air pengencer.
5. Integrasi Sensor pH dan Turbiditas. Untuk aplikasi limbah yang lebih kompleks, disarankan menambahkan sensor pH dan turbiditas (TSS) sebagai variabel proses tambahan, sehingga sistem tidak hanya mengontrol TDS tetapi juga parameter kualitas air lainnya yang diatur dalam baku mutu pembuangan.
 6. Penggunaan Database Time-Series. Untuk skala produksi dengan logging data dalam jumlah besar, disarankan mengganti atau melengkapi MySQL dengan database time-series seperti InfluxDB atau TimescaleDB yang dioptimalkan untuk data sensor dengan timestamp tinggi, sehingga query analisis tren menjadi lebih efisien
 7. Implementasi Over-The-Air (OTA) Update. Mengingat sistem terpasang pada lokasi yang mungkin sulit diakses secara fisik, disarankan menambahkan fitur over-the-air firmware update pada ESP32 sehingga perbaikan bug atau peningkatan fitur dapat dilakukan secara jarak jauh tanpa flash fisik.
 8. Pengujian pada Variasi Limbah yang Lebih Luas. Penelitian ini terbatas pada limbah RO reject dan yang bersifat homogen. Disarankan melakukan pengujian lanjutan pada limbah dengan karakteristik berbeda, seperti limbah domestik, limbah rumah sakit, atau limbah yang mengandung suspensi padat, untuk mengevaluasi robustness sistem pada kondisi non-ideal.
 9. Peningkatan Kapasitas Tangki dan Debit Pompa. Untuk aplikasi skala pilot yang lebih besar, disarankan menggunakan tangki dengan kapasitas 10–50 liter dan pompa dosing dengan debit yang lebih tinggi serta kontrol PID yang disesuaikan dengan dinamika plant baru.
 10. Pengembangan Antarmuka Mobile Application. Selain dashboard web berbasis browser, disarankan mengembangkan aplikasi mobile native (Android/iOS) dengan notifikasi push untuk alarm emergency, sehingga respons operator terhadap kondisi abnormal dapat lebih cepat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Isnaini, H. H. (2020). Potensi Pencemaran Limbah Cair Rumah Pemotongan Ayam X Di Dusun Betakan, Sumberrahayu, Moyudan, Sleman (Doctoral dissertation, Poltekkes Kemenkes Yogyakarta).
- [2] Apriyani, N. (2018). Industri batik: kandungan limbah cair dan metode pengolahannya. *Media Ilmiah Teknik Lingkungan (MITL)*, 3(1), 21-29.
- [3] Martini, S., Yuliwati, E., & Kharismadewi, D. (2020). Pembuatan teknologi pengolahan limbah cair industri. *Jurnal Distilasi*, 5(2), 26-33.
- [4] Gunawan, A., Puspitasari, M., & Rachpriliani, A. (2026). Implementasi Environmental Management Accounting (EMA) dalam Efisiensi Biaya Instalasi Pengelolaan Limbah di Kawasan Industri Kujang Cikampek. *Jurnal Sosial Teknologi*, 6(5), 1624–1633.
- [5] Arsada, B. (2017). Aplikasi sensor ultrasonik untuk deteksi posisi jarak pada ruang menggunakan arduino uno. *Jurnal Teknik Elektro*, 6(2).
- [6] Badruzzaman, N. A., Bhakti, H., & Bachri, O. S. (2024). Implementasi Sistem Monitoring Suhu Dan Ph Air Kolam Budidaya Ikan Lele Menggunakan Arduino Esp8266 Dan Arduino Ide. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12(3S1).
- [7] Espressif Systems. (2024). ESP32 series datasheet. <https://www.espressif.com>
- [8] Huda, M. B. R., & Kurniawan, W. D. (2022). Analisa sistem pengendalian temperatur menggunakan sensor DS18B20 berbasis mikrokontroler Arduino. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 7(02), 18-23.