

SISTEM *INTERNET OF THINGS* (IoT) UNTUK INSTALASI PENGOLAHAN AIR LIMBAH (IPAL) SEBAGAI SOLUSI *SMART BUILDING* RAMAH LINGKUNGAN

Agung Indarto, Eneng Susilistia Agustini

Sistem Komputer, Universitas Pamulang

Jl. Lintas Serang - Jakarta Kampung Malandang Kel. Kelodran

Kec. Walantaka, Kota Serang - Banten 42183

agungindarto001@gmail.com

ABSTRAK

Pengelolaan air limbah yang kurang optimal dapat menyebabkan pencemaran lingkungan dan berdampak pada kesehatan masyarakat. Sistem IPAL konvensional masih bergantung pada pengukuran manual sehingga tidak menyediakan data *real-time*, kurangnya otomatisasi menyebabkan inefisiensi operasional, serta respons terhadap gangguan sistem menjadi lambat karena belum adanya sistem peringatan berbasis IoT. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem IoT untuk pemantauan kualitas air limbah secara *real-time* guna menggantikan metode manual, meningkatkan efisiensi operasional instalasi pengolahan air limbah melalui sistem otomatis, serta mempercepat respons terhadap permasalahan melalui notifikasi berbasis IoT. Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimen dengan pendekatan kuantitatif dan deskriptif. Sistem dikembangkan menggunakan mikrokontroler NodeMCU ESP32 yang terintegrasi dengan sensor pH, kekeruhan (*Turbidity*), dan suhu. Pengujian dilakukan menggunakan sampel air limbah *laundry* dan air sumur bor sebagai pembanding, dengan hasil dibandingkan terhadap data laboratorium Dinas Lingkungan Hidup Kota Serang. Hasil pengujian menunjukkan sistem mampu membaca pH air limbah *laundry* sebesar 9,52 mendekati hasil laboratorium 9,43 dengan selisih $\pm 0,1$ pH setelah kalibrasi tiga titik. Sensor *Turbidity* membaca 99 NTU pada larutan uji 100 NTU dan sensor suhu stabil pada kisaran 27,2 °C, dengan waktu respons sistem $\pm 1-2$ detik.

Kata kunci: *Internet of Things, IPAL, Kualitas Air Limbah, Monitoring Real-Time, ESP32*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dalam beberapa dekade terakhir telah memberikan dampak signifikan dalam berbagai aspek kehidupan manusia, termasuk dalam konteks lingkungan binaan. Salah satu inovasi teknologi yang telah mengubah paradigma pengelolaan bangunan adalah *Internet of Things* (IoT), yang memungkinkan pengintegrasian perangkat elektronik dan sensor untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas dalam penggunaan sumber daya [1].

Dalam konteks infrastruktur bangunan, pengolahan air limbah melalui Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) merupakan aspek penting karena berhubungan langsung dengan kualitas lingkungan. Namun, pengelolaan IPAL domestik masih menghadapi berbagai tantangan, terutama pada sistem pemantauan kualitas air yang umumnya masih dilakukan secara manual. Kondisi ini menyebabkan data kualitas air tidak tersedia secara *real-time* sehingga deteksi dini terhadap pencemaran atau gangguan sistem menjadi kurang efisien [2].

Selain itu, kurangnya otomatisasi dalam pengendalian proses pengolahan air limbah juga dapat menimbulkan inefisiensi operasional serta memperlambat respons terhadap permasalahan yang terjadi pada sistem IPAL.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa sistem pemantauan *real-time* berbasis *Internet of Things* (IoT) dapat meningkatkan efisiensi pengelolaan air limbah dengan memanfaatkan sensor untuk mengukur parameter seperti pH, dan suhu air secara langsung dan otomatis [3].

Selain itu, pemeliharaan IPAL yang tidak terjadwal bisa menyebabkan penurunan kualitas pengolahan air limbah. Salah satu studi menunjukkan bahwa implementasi IoT dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya dan mengurangi biaya operasional melalui pemantauan kondisi peralatan secara *real-time*, sehingga memungkinkan perencanaan pemeliharaan yang lebih efektif [4].

Dalam konteks tersebut, konsep *smart building* dengan penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) menawarkan solusi yang menarik. Dengan memanfaatkan sensor-sensor cerdas dan sistem otomatisasi, *smart building* dapat meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan air limbah, memungkinkan *monitoring* yang *real-time* serta memberikan respons yang cepat saat terjadi gangguan atau kerusakan.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sekaligus menjawab bagaimana penerapan sistem pemantauan dan pengendalian IPAL berbasis IoT yang mampu menyediakan data kualitas air limbah secara *real-time*, meningkatkan efisiensi operasional pengolahan air limbah melalui sistem otomatis, serta mempercepat respons terhadap gangguan sistem melalui mekanisme notifikasi berbasis IoT. Dengan tersedianya data kualitas air secara kontinu dan terintegrasi, sistem yang dikembangkan diharapkan mampu mendukung pengelolaan air limbah yang lebih efektif, adaptif, dan berbasis data.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang menjadi acuan dalam penelitian ini di antaranya,

Penelitian terdahulu dengan judul Sistem Monitoring Tingkat pH, Kekeruhan dan Suhu Air Limbah Batik pada Instalasi Pengolahan Air Limbah Berbasis LoRa yang dilakukan oleh Faza dkk. Penelitian tersebut membuat rancangan sistem monitoring kualitas air limbah batik berbasis modul LoRa. Penelitian tersebut menggunakan tiga sensor utama yang terintegrasi ke modul LoRa dan Arduino yaitu sensor pH air (PH4502C), sensor kekeruhan air (SEN0189) dan sensor suhu air (DS18B20). Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai RSSI pada jarak 100 meter adalah -95,23dBm dengan SNR sebesar 9,94dB, pada jarak 200 meter nilai RSSI adalah -96,76dBm dengan SNR sebesar 8,87dB, dan pada jarak 400 meter nilai RSSI adalah -108,13dBm dengan SNR sebesar -1,97dB. Jarak Maksimum LoRa terhadap pengujian adalah sebesar 760m, Semakin jauh jarak data yang dikirim akan mempengaruhi nilai *Quality of Service* (QoS) LoRa [5].

Penelitian terdahulu dengan judul *Perencanaan Desain Instalasi Pengolahan Air Limbah dengan Metode Biofilter Anaerob–Aerob* yang dilakukan oleh Neshart dkk, membahas perencanaan desain instalasi pengolahan air limbah menggunakan metode biofilter anaerob-aerob di Pasar Tradisional Mandonga. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan debit air limbah yang akan diolah dan merancang basin pengolahan di area lods basah Pasar Tradisional Mandonga. Hasil analisis menunjukkan karakteristik air limbah yang harus diolah, dan desain IPAL mencakup kompartemen-kompartemen seperti bak kontrol, pengendap awal, biofilter anaerob, biofilter aerob, hingga bak pengendap akhir. Kendari mengalami pertumbuhan penduduk yang pesat, menyebabkan peningkatan aktivitas perekonomian, terutama di pasar tradisional. Pasar tradisional Mandonga di Kendari memiliki lods basah yang menghasilkan air limbah dari aktivitas pembersihan dan persiapan dagangan, namun limbahnya tidak diolah dengan baik. Penelitian dilakukan di lods basah Pasar Tradisional Mandonga dari Oktober 2019 hingga Mei 2020 dengan pengambilan sampel air limbah untuk analisis pH, BOD, dan TSS. Karakteristik air limbah termasuk pH, BOD, dan TSS dianalisis dan melebihi baku mutu yang diizinkan. Desain IPAL mencakup bak kontrol, pengendap awal, biofilter anaerob, biofilter aerob, hingga bak pengendap akhir I dan II [6].

Penelitian terdahulu dengan judul jurnal *Rancang Bangun Water Treatment Sistem Pemantau Kualitas Air Berbasis Internet of Things (IoT)* yang dilakukan oleh Matondang dkk. Peneliti pada jurnal tersebut menggunakan metode fuzzy classifier untuk menganalisis data parameter air seperti pH, total padatan terlarut, dan kekeruhan dari cara kerja sensor pH air, sensor *Total Dissolve Solid* (TDS) dan sensor

Turbidity yang dijadikan sebagai *input* ke Arduino Mega 256. Sistem ini kemudian mengklasifikasikan kualitas air menjadi baik, cukup, dan buruk. Hebatnya, sistem pakar ini memiliki tingkat keberhasilan 100% dalam pengujian. Pemantauan dan klasifikasi kualitas air dapat diakses secara *online* melalui platform *Internet of Things* (IoT) menggunakan Blynk [7].

Penelitian terdahulu dengan judul jurnal *Pengembangan Instalasi Pengolah Limbah (IPAL) Digital Portabel Untuk Limbah Cair Batik Berbasis IoT (Internet of Things)* yang dilakukan oleh Nurhidayah dkk. Peneliti menggunakan metode elektrokoagulasi, di mana air keruh bisa berubah jernih dengan cara dialiri tegangan 20-30V. Penelitian ini fokus pada pengembangan sistem pengolahan limbah cair batik menggunakan metode elektrokoagulasi. Limbah cair batik diambil dari pengrajin batik di Jambi dan diolah dengan variasi tegangan, jarak elektroda, dan waktu. Pemantauan ketinggian air dalam reaktor dilakukan dengan perangkat berbasis IoT. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi tegangan 30 V, jarak elektroda 5 cm, dan waktu 70 menit menghasilkan pengolahan limbah cair batik yang optimal. Metode ini berhasil menurunkan TDS sebanyak 64,39% dan menetralkan pH limbah cair batik dari 3 menjadi 6, sehingga menghasilkan limbah cair yang aman bagi lingkungan dan sesuai dengan baku mutu yang berlaku. Sistem pengolahan limbah cair batik ini terbukti efektif dan dapat menjadi solusi ramah lingkungan untuk industri batik [8].

Penelitian terdahulu dari judul jurnal *Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Air Pada Ipal Tirtarona Tlogomas Kota Malang Menggunakan IoT Berbasis LoRa* yang dilakukan oleh Roby dkk. Penelitian dalam jurnal tersebut bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem *monitoring* Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) dengan menggunakan modul LoRa SX1278. Sistem ini menggantikan sistem sebelumnya yang menggunakan modem GSM dan sensor pH, DO, *turbidity*, dan DS18B20. Sistem baru ini terdiri dari 1 master *node/gateway* dan empat *transmitter node*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem baru ini memiliki pembacaan nilai eror yang lebih rendah (rata-rata 3,2%) dan konsumsi daya yang lebih efisien (rata-rata 67%). Sistem ini juga memiliki stabilitas pengiriman data yang lebih tinggi (efektivitas 100%). Visualisasi data dapat dimonitor secara real-time melalui webserver ThingSpeak [9].

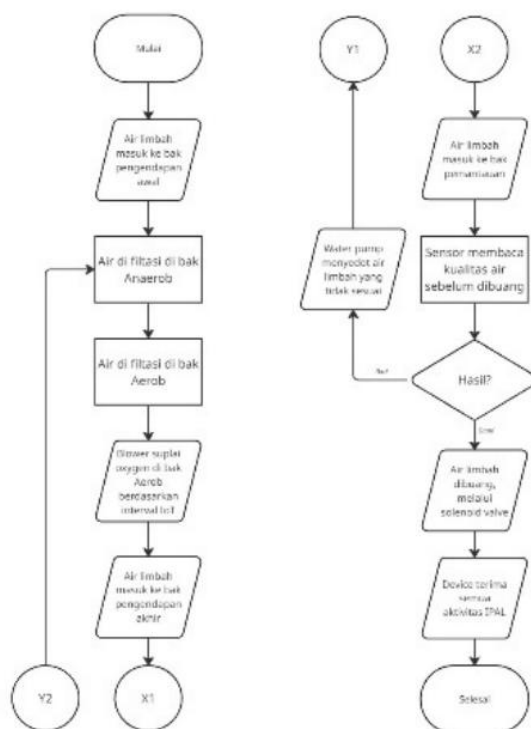
Penelitian terdahulu dari jurnal *Electrical and Electronic Engineering* dengan judul *Prototype Monitoring dan Controlling Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) pada Saluran Output Berbasis IoT* yang dilakukan oleh Iswanto dkk. Penelitian ini bertujuan merancang prototipe *monitoring* dan *controlling* IPAL berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dapat mengukur parameter penting air limbah seperti pH, kekeruhan (*turbidity*), dan kandungan gas amonia. Sistem ini menawarkan dua mode operasi: otomatis dan manual yang semuanya terintegrasi pada

board NodeMCU ESP8266. Pada mode otomatis, sistem akan mengendalikan pompa pembuangan berdasarkan target kualitas air limbah (pH 6-9, *turbidity* <300 NTU, amonia <20 PPM). Jika melebihi ambang batas, air akan dikembalikan ke IPAL untuk diproses ulang. Sementara pada mode manual, operator dapat langsung mengendalikan pompa melalui aplikasi Blynk di *smartphone* [10].

3. METODE PENELITIAN

3.1. Analisa Sistem

Permasalahan sistem IPAL konvensional sekarang yaitu terletak pada proses pengukuran kualitas air yang belum *real-time*, seperti nilai pH, *Turbidity* dan Suhu sehingga data yang diperoleh tidak bisa langsung dipergunakan untuk mengambil keputusan. Manajemen kontrol blower masih menggunakan cara pengaktifan manual sehingga terjadi inefisiensi operasional. Selain itu, belum terdapat sistem otomatisasi pada air yang akan dibuang jika tidak sesuai dengan baku mutu air. Terakhir yaitu minimnya respons tanggap perbaikan sistem apabila terjadi ketidaksesuaian kualitas air limbah. Maka dari itu, cara kerja IPAL konvensional yang memiliki risiko perlu ditingkatkan ke sistem yang memiliki cara kerja otomatis.



Gambar 1. Flowchart Sistem Usulan

Untuk menjawab permasalahan sistem IPAL sekarang, maka perlu pendekatan teknologi canggih yang bisa menjawab masalah di atas yaitu dengan menggunakan sensor pH 4502C, sensor *Turbidity* SEN0189 dan sensor suhu DS18B20 yang terintegrasi ke *Internet of Things* (IoT) sebagai *input* awal penentu langkah selanjutnya. Sistem ini juga dilengkapi mode kontrol otomatis atau manual

pada bagian blower dan *output* tindakan berupa pemrosesan ulang melalui *water pump* apabila kualitas nilai air limbah menurun. Berikut *flowchart* sistem usulan penelitian ini pada Gambar 1 apabila menggunakan konsep IoT.

Pada Gambar 1 ini terlihat sistem ajuan pada penelitian ini berfokus pada pemantauan kualitas air limbah di bagian bak pemantauan dengan menggunakan bantuan sensor untuk mengetahui data *real-time*. Berikutnya sistem usulan ini juga berfokus pada permasalahan durasi nyala blower yang bisa diatur sesuai kebutuhan. Terakhir adalah sistem usulan ini berfokus metode pembuangan air limbah yang bisa otomatis dan pemberian langkah solusi apabila kualitas air limbah tidak sesuai standar.

3.2. Jenis Penelitian

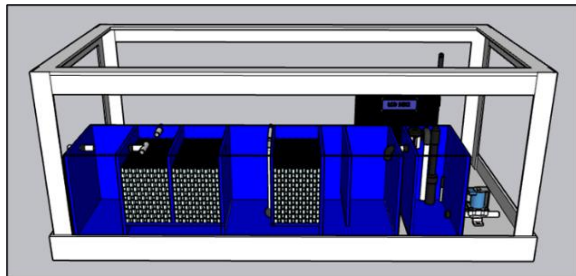
Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimen dengan pendekatan kuantitatif dan deskriptif. Alasan peneliti memilih jenis penelitian eksperimen karena proyek yang dikerjakan berfokus pada perancangan, pembuatan dan pengujian sistem IoT pada prototipe IPAL Anaerob-Aerob untuk mengetahui pembacaan nilai air limbah secara *real-time* dan sistem otomatisasi pergantian nyala blower berdasarkan durasi yang telah diatur, serta otomatisasi pada *water pump* atau solenoid valve yang akan menyala apabila kualitas air limbah sesuai standar atau tidak beserta bentuk responsnya. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk memperoleh dan menganalisis hasil pembacaan sensor pH, *Turbidity* dan Suhu dalam bentuk numerik, sedangkan pendekatan deskriptif digunakan untuk menjelaskan dari setiap langkah dari awal perancangan, pembuatan sampai ke pengujian. Pemilihan jenis penelitian ini berlandaskan dengan tujuan menguji keefektifan dari proyek yang dibuat.

Proses pengujian prototipe menggunakan *purposive sampling*, yaitu teknik pengambilan sampel berdasarkan pertimbangan atau tujuan tertentu dari peneliti. Setelahnya data uji coba dikumpulkan untuk mengetahui kinerja sistem. Data pengujian juga turut melibatkan dari Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kota Serang sebagai mitra dan validasi konseptual sistem terhadap aspek pengawasan kualitas lingkungan, sehingga metode penelitian yang diterapkan tetap berada dalam lingkup pengembangan dan evaluasi prototipe.

3.3. Teknik Perancangan Sistem

Tahap awal dalam teknik perancangan sistem penelitian ini adalah pembuatan desain tiga dimensi menggunakan perangkat lunak SketchUp 2024 versi 24.0.594 berupa prototipe IPAL Anaerob-Aerob yang dibuat menggunakan bahan akrilik dengan ketebalan 0,5 mm. Prototipe yang dibuat memiliki dimensi luar dengan panjang 56 cm, lebar 16 cm, dan tinggi 15,5 cm. Sistem IPAL ini terdiri atas empat bak proses utama dan satu bak pemantauan akhir. Bak pertama merupakan bak pengendapan awal berukuran panjang

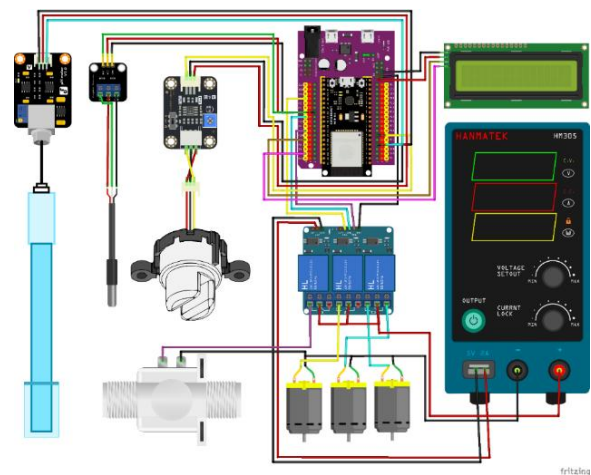
8 cm, lebar dan tinggi masing-masing 15 cm. Bak kedua dan ketiga adalah bak filtrasi anaerob dan aerob dengan dimensi yang sama, yaitu panjang 16,5 cm serta lebar dan tinggi 15 cm. Pada kedua bak tersebut ditambahkan sekat tengah dan filter sarang tawon sebagai media penempatan bakteri anaerob dan aerob. Bak keempat merupakan bak pengendapan akhir dengan panjang 12,5 cm, lebar 15 cm, dan tinggi 15 cm, yang dilengkapi sekat pemisah sehingga membentuk dua ruang. Setelah proses tersebut, air limbah dialirkan ke bak pemantauan akhir berukuran panjang 9 cm, lebar 16 cm, dan tinggi 15,5 cm, yang berfungsi sebagai lokasi penempatan seluruh sensor kualitas air sebelum air dibuang. Setiap bak dihubungkan menggunakan lubang pipa pada bagian atas dengan diameter sekitar 1,2 cm serta saluran bawah berukuran panjang 0,5 cm, tinggi 2 cm, dan lebar 15 cm.



Gambar 2. Desain prototipe IPAL anaerob-aerob

Tahap kedua yaitu membuat skema atau desain jalur elektronik. Peneliti merancang skema jalur elektronik ini menggunakan *software* Fritzing versi 0.9.3 untuk memvisualisasikan hubungan antara komponen dengan jelas. Sensor pH, *Turbidity* dan Suhu digunakan sebagai *input* pembacaan kualitas air limbah. Mikrokontroler (NodeMCU ESP32) digunakan sebagai pusat kendali yang menghubungkan *input* untuk diproses lalu dikirim ke Blynk dan Firebase. Sedangkan untuk LCD 16x2 I2C, motor pompa (*blower*), dan solenoid *valve* dirancang

sebagai *output*. Semua komponen terhubung ke sumber daya *power supply*. Sedikit ada perbedaan pada *power supply* yang digambar dengan yang nanti dipakai. Pada kondisi di lapangan, peneliti menggunakan *power supply* tiga *output* yang masing-masing bisa memberi daya untuk NodeMCU ESP32 sebesar 12 volt, 5 volt untuk suplai daya Relay 3 *channel* dan *output adjustable* untuk menyuplai daya ke motor pompa dan solenoid *valve*. Penggunaan *power supply* tiga ini bertujuan untuk menyesuaikan kebutuhan *output* tegangan masing-masing komponen agar sistem dapat beroperasi secara stabil dan aman. Berikut desain rangkaian elektronik pada penelitian ini seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain rangkaian elektronik

3.4. Teknik Pengujian

Pengujian sistem dilakukan secara eksperimental pada prototipe IPAL dengan menggunakan sampel air limbah *laundry* dan air sumur bor sebagai pembanding. Tahapan pengujian meliputi uji fungsional, uji respons waktu, uji akurasi sensor, dan uji kestabilan sistem.

Tabel 1. Jenis Teknik Pengujian Sistem

Jenis Pengujian	Parameter yang Diuji	Metode Pengujian	Kriteria Keberhasilan	Keterangan
Uji Fungsional	Sensor pH	Membandingkan nilai pembacaan sensor dengan larutan <i>buffer</i> pH 4,01; 6,86; dan 9,18	Sensor mampu membaca perubahan nilai pH	Berfungsi / Tidak berfungsi
	Sensor Kekeruhan	Mengamati perubahan <i>output</i> sensor saat tingkat kekeruhan air berubah	Sensor menunjukkan perubahan nilai kekeruhan	Berfungsi / Tidak berfungsi
	Sensor Suhu	Membandingkan pembacaan sensor dengan suhu lingkungan	Sensor membaca suhu dengan konsisten	Berfungsi / Tidak berfungsi
	Water Pump	Mengaktifkan pompa berdasarkan kondisi sensor	Pompa aktif sesuai logika sistem	Berfungsi / Tidak berfungsi
	Solenoid Valve	Menguji kondisi ON/OFF melalui mode manual dan otomatis	Valve bekerja sesuai perintah sistem	Berfungsi / Tidak berfungsi
	Blower	Menguji kerja blower berdasarkan interval waktu	Blower aktif sesuai durasi yang ditentukan	Berfungsi / Tidak berfungsi
Uji Respons Waktu	Waktu pengiriman data	Mengukur selisih waktu perubahan nilai sensor hingga tampil di Blynk/Firebase	Waktu respons < 5 detik	Sesuai / Tidak sesuai

Jenis Pengujian	Parameter yang Diuji	Metode Pengujian	Kriteria Keberhasilan	Keterangan
Uji Akurasi	Sensor pH	Membandingkan hasil sensor dengan larutan <i>buffer</i> standar	Selisih pembacaan $\leq \pm 0,5$ pH	Akurat / Tidak akurat
	Sensor Kekeruhan	Membandingkan perubahan sensor dengan kondisi visual air	Selisih pembacaan ≤ 10 NTU (indikatif)	Akurat / Tidak akurat
	Sensor Suhu	Membandingkan dengan termometer referensi	Selisih pembacaan $\leq \pm 3$ °C	Akurat / Tidak akurat
Uji Kestabilan	Operasi sistem	Menjalankan sistem secara terus-menerus	Sistem berjalan stabil tanpa eror	Stabil / Tidak stabil

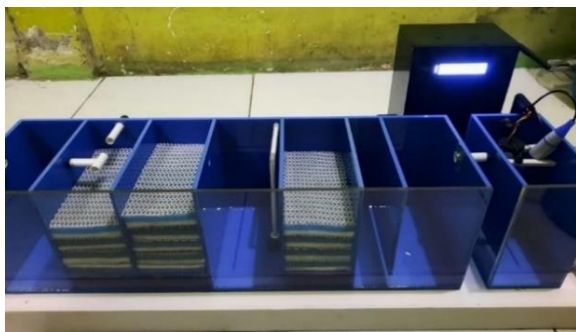
4. PEMBAHASAN

4.1. Hasil Perancangan

Pada prototipe IPAL terdapat lima bak pemrosesan. Bak pertama yaitu bak pengendapan awal, pada bak ini air pertama kali masuk melalui jalur *inlet* lalu ditampung sementara untuk memisahkan partikel-partikel berat dalam air. Setelah ditampung di bak pengendapan awal, lalu air akan langsung masuk ke bak Anaerob untuk dilakukan proses penguraian bahan organik berkonsentrasi tinggi tanpa kehadiran oksigen, terutama pada tahap awal pengolahan, dengan memecah senyawa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana sekaligus menghasilkan gas seperti metana dan karbon dioksida.

Pada prototipe ini yang berdasarkan desain dan studi literatur seperti pada sub bab landasan teori, bak Anaerob memiliki sekat pemisah di bagian tengah. Berdasarkan telaah peneliti, maksud dari pembuatan sekat tersebut adalah sebagai mekanisme penghambatan laju air biar pemrosesan filtrasi yang dilakukan bakteri Anaerob lebih optimal mengingat durasi penjernihan yang dilakukan oleh bakteri tersebut bisa memakan berhari-hari dan itu juga tergantung kapasitas tabung IPAL yang akan digunakan dalam kondisi nyata.

Selanjutnya air masuk ke bak Aerob untuk diproses lebih lanjut dari sisa bahan organik terlarut, amonia, dan senyawa berbahaya lainnya menjadi bentuk yang lebih stabil dan aman bagi lingkungan. Secara struktur dan tujuan desain, bak Aerob memiliki kesamaan dengan bak Anaerob namun yang membedakan pada bak Aerob proses penguraian air limbah dibantu dengan bantuan *oxygen*.



Gambar 4. Bentuk *real* prototipe IPAL anaerob-aerob

Air limbah yang sudah melewati fase filtrasi Anaerob-Aerob kemudian masuk ke bak pengendapan akhir, dari sini apabila ada partikel-partikel organik

yang berat akan mengendap di dasar bak sebelum dikeluarkan melalui *outlet* yang nantinya terhubung ke bak pemantauan. Fase terakhir yaitu bak pemantauan, pada bak ini air yang sudah melewati serangkaian filtrasi nantinya akan dipantau terlebih dahulu guna menjamin kelayakan kandungan di dalamnya sebelum dibuang ke lingkungan. Berikut bentuk prototipe IPAL Anaerob-Aerob seperti pada Gambar 4.

Hasil perancangan selanjutnya adalah rangkaian elektronik beserta konsep tata letaknya. Peneliti membuat konsep susunan rangkaian elektronik ini dalam tiga tahap, *input*, *process* dan *output*. Tahap *input*, yaitu berisikan sensor pH, kekeruhan dan suhu air yang ketiganya ditempatkan di bak pemantauan akhir. Penempatan posisi sensor di bak pengendapan akhir disesuaikan dengan panjang kabel dan ketahanan sensor saat berada di dalam air, karena seperti sensor pH dan kekeruhan tidak diperbolehkan untuk tenggelam sepenuhnya di dasar bak karena masih terdapat celah terbuka yang dikhawatirkan bisa merusak kedua sensor tersebut.

Sensor yang tahan terhadap air adalah sensor suhu, sensor ini sudah dirancang dengan lapisan karet di luarnya sebagai pembungkus sambungan pipa sensor dengan kabelnya. Tahap berikutnya adalah *process*, pada tahap ini segala semua pusat kendali dijadikan satu dalam sebuah wadah berupa panel kontrol yang di dalamnya memuat mikrokontroler, modul sensor, LCD dan Relay.



Gambar 5. Rangkaian elektronik

Pada tahap *process* ini juga menjadi tempat untuk kalibrasi setiap modul sensor maupun penyesuaian ulang *script coding* yang dibikin. Tahap terakhir yaitu *output*, maksud dari tahap ini adalah segala rangkaian

elektronik yang bekerja setelah menerima dari pusat kendala di tahap *process*. Pada tahap output ini berisikan komponen elektronik yaitu blower, solenoid *valve*, *water pump* dan LCD. Peneliti menempatkan blower dan *water pump* tepat berada di belakang prototipe IPAL, sedangkan untuk solenoid *valve* ditempatkan di samping bak pemantauan akhir. Berikut tampilan rangkaian elektronik sistem IoT seperti pada Gambar 5.

Kalibrasi awal sensor pH dilakukan dengan memastikan kestabilan *output* dan menentukan titik nol (*offset*) modul menggunakan metode *short* pada konektor Bayonet Neill-Concelman (BNC) sebagai tahap pengecekan rangkaian. Hubungan nilai tegangan antar sensor dan nilai pH dituliskan menggunakan persamaan linier berikut ini,

$$pH = m \cdot V + c \quad (1)$$

Keterangan:

- pH = Derajat keasaman hasil perhitungan
- m = *Slope* atau kemiringan (per pH unit) yang didapatkan dari hasil perbedaan tegangan antar *buffer* dibagi dengan pH *buffer*
- V = Tegangan keluaran sensor dalam satuan (V)
- c = Nilai *offset*, yang umumnya menggunakan nilai pH 7 atau *intercept*.

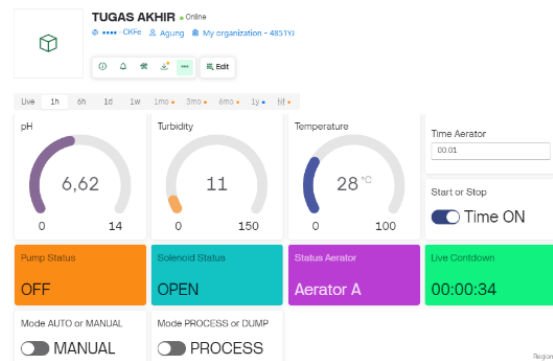
Sensor *turbidity* digunakan untuk mengukur tingkat kekeruhan air dalam satuan *Nephelometric Turbidity Unit* (NTU). Sensor ini menghasilkan keluaran analog yang dipengaruhi oleh intensitas cahaya yang diterima oleh fotodioda. Adapun rumus dasar kalibrasi sensor *Turbidity* menggunakan perhitungan berikut ini:

$$NTU = m \cdot V + c \quad (2)$$

Keterangan:

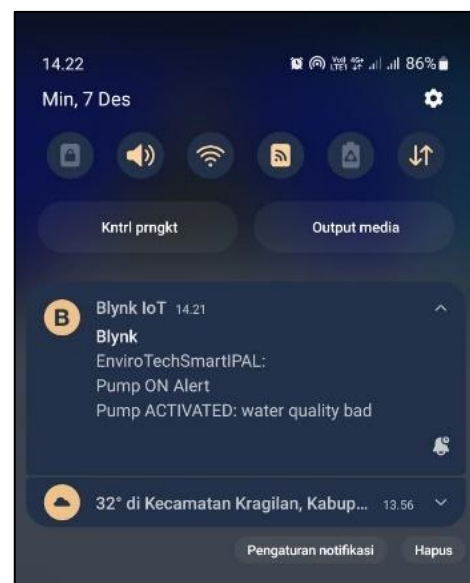
- NTU = Nilai kekeruhan air
- m = *Slope* atau kemiringan yang didapatkan dari hasil perbedaan tegangan air keruh dengan air jernih dibagi NTU air keruh dengan NTU air jernih
- V = Tegangan keluaran sensor dalam satuan (V)
- c = Nilai *offset*, *intercept* kalibrasi.

Blynk juga digunakan untuk mengatur mode kerja sistem, yaitu mode otomatis (AUTO) dan mode manual (MANUAL). Pemilihan mode dilakukan melalui *widget switch* yang terhubung ke virtual pin tertentu. Dalam mode manual, pengguna dapat mengontrol pompa dan solenoid *valve* secara langsung melalui aplikasi Blynk. Kontrol ini memberikan fleksibilitas bagi pengguna saat melakukan pengujian sistem atau penanganan kondisi tertentu. Berikut Gambar 6 yang menampilkan *dashboard* sekaligus sistem mode pengontrolan otomatis atau manual untuk aktuator *water pump* dan solenoid *valve*:



Gambar 6. *Dashboard* sistem IoT IPAL

Konfigurasi notifikasi pada sistem ini memanfaatkan fitur Events & Notifications yang tersedia pada platform Blynk. Dalam perancangan ini, peneliti memfokuskan notifikasi pada kondisi perubahan status aktuator utama, yaitu motor pompa atau *water pump* dan solenoid *valve*. Secara khusus, notifikasi untuk *water pump* diberi label “Pump ON Alert” dengan kode event *pump_on*, yang akan aktif ketika *water pump* menyala sebagai respons terhadap kualitas air yang tidak memenuhi syarat. Sementara itu, notifikasi untuk solenoid *valve* menggunakan label “Valve Close Alert” dengan kode event *valve_close*, yang menandakan bahwa aliran air *outlet* ditutup untuk mencegah pembuangan air limbah yang belum memenuhi standar. Berikut Gambar 7 yang menampilkan contoh notifikasi di perangkat seluler.

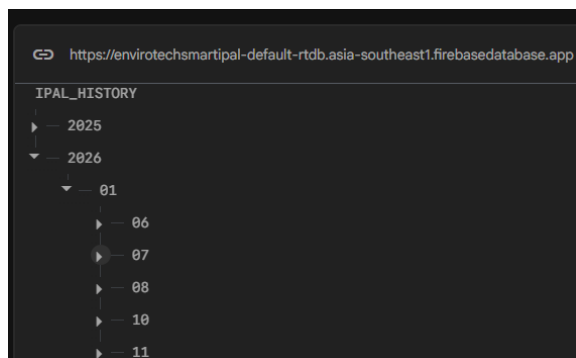


Gambar 7. Tampilan notifikasi kualitas air

Pada Gambar 7 menunjukkan hasil notifikasi yang terkirim ke perangkat seluler dengan keterangan bahwa kualitas air yang akan dibuang “bad” sehingga *water pump* aktif. Nama event, kode notifikasi, serta tingkat urgensi notifikasi (seperti *warning* atau *info*) dapat *dicustom* sesuai kebutuhan pengguna. Fleksibilitas ini memungkinkan sistem IoT IPAL untuk dikembangkan lebih lanjut agar sesuai dengan

kebutuhan operasional di lapangan, khususnya dalam mendukung pemantauan jarak jauh dan pengambilan keputusan yang lebih cepat oleh operator.

Data yang dihasilkan oleh sistem disimpan dalam struktur basis data yang dirancang secara sistematis untuk mendukung kemudahan pengelolaan informasi. Oleh karena itu, data disusun dalam bentuk hierarki berbasis tanggal yang mencakup tahun, bulan, dan hari guna mempermudah proses pencarian serta analisis data historis. Struktur utama pada Firebase Realtime Database dibagi ke dalam tiga kategori, yaitu MONITOR, EVENT, dan ACTION, yang masing-masing berfungsi untuk menyimpan data pemantauan, kejadian sistem, serta aktivitas pengendalian. Berikut struktur *path* Firebase di Gambar 8.



Gambar 1. Struktur Path Firebase

4.2. Hasil Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini berlandaskan dua peraturan kementerian yang digunakan sebagai tolok ukur keberhasilan sistem dalam membaca kualitas air limbah. Peraturan pertama yaitu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 tentang Baku Mutu Air Limbah dan peraturan kedua yaitu Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2017 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan Dan Persyaratan Kesehatan Air Untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, Solus Per Aqua, Dan Pemandian Umum. Kedua peraturan tersebut dijadikan acuan dalam menentukan nilai ambang batas parameter pH, kekeruhan, dan suhu air yang digunakan dalam sistem IoT pada prototipe penelitian IPAL ini.

Pada Tabel 2, peneliti mengambil parameter pH dan suhu sebagai data validasi terhadap sistem IoT yang diuji dalam membaca kualitas air limbah. Pada peraturan tersebut dituliskan bahwa batas nilai pH untuk air limbah di antara 6-9, sedangkan batas maksimal untuk suhu di angka 38°C. Kedua parameter diterapkan untuk sensor pH 4502C dan sensor suhu DS18B20 dalam membaca sampel air limbah.

Tabel 2. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup RI Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah

Parameter	Konsentrasi Paling Tinggi	
	Nilai	Satuan
Fisika		
Suhu	38	°C
Zat padat terlarut	2.000	mg/L
Zat padat tersuspensi	200	mg/L
Kimia		
pH	6–9	-
BOD	50	mg/L
COD	80	mg/L
TSS	30	mg/L
Minyak dan Lemak	10	mg/L
MBAS	10	mg/L
Amonia Nitrogen	10	mg/L
Total Coliform	5.000	(MPN/100 ml)

Untuk memenuhi validasi kinerja sistem IoT pada parameter kekeruhan, maka peneliti mengambil Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2017. Adapun ketentuan nilai kekeruhan dalam peraturan tersebut dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 3. Peraturan Menteri Kesehatan RI Nomor 32 Tahun 2017

No.	Parameter Wajib	Unit	Standar Baku Mutu (kadar maksimum)
1.	Kekeruhan	NTU	25
2.	Warna	TCU	50
3.	Zat padat terlarut (Total Dissolved Solid)	mg/L	1000
4.	Suhu	°C	suhu udara ± 3
5.	Rasa	-	tidak berasa
6.	Bau	-	tidak berbau

Berdasarkan Tabel 3, nilai ketetapan batas maksimal kadar kekeruhan pada air untuk keperluan higienis dan sanitasi di angka 25 NTU. Angka tersebut diimplementasikan pada sensor *Turbidity* SEN0189 dalam membaca kualitas air limbah.

4.3. Hasil Pengolahan Data Sensor pH

Hasil pengolahan data sensor pH 4502C berasal dari hasil pengujian sampel air limbah *laundry* dan air sumur bor yang dilakukan sebanyak lima kali untuk masing-masing sampel guna melihat konsistensi dan kestabilan nilai pH yang terbaca oleh sistem IoT. Hasil pembacaan yang dilakukan sensor kemudian dibandingkan dengan data acuan hasil uji sampel di laboratorium DLH Kota Serang dan alat pH meter digital yang telah dikalibrasi menggunakan serbuk *buffer* pH 4.01, 6.86 dan pH 9.18.

Tabel 4. Hasil pengujian sensor pH dari sistem IoT dengan sampel air limbah *laundry* dan air sumur bor

Jenis Sampel	Percobaan ke-	Nilai pH	Indikator (pH)	Keterangan
Air <i>laundry</i>	1	9,51	6-9	Tidak layak
	2	9,52	6-9	Tidak layak
	3	9,50	6-9	Tidak layak
	4	9,53	6-9	Tidak layak
	5	9,56	6-9	Tidak layak
Air sumur bor	1	7,28	6-9	Layak
	2	7,30	6-9	Layak
	3	7,34	6-9	Layak
	4	7,33	6-9	Layak
	5	7,31	6-9	Layak
Rata-rata	Air <i>laundry</i> = 9,52			
	Air sumur bor = 7,31			

Berikut Tabel 5 yang menyajikan data perbandingan hasil uji sampel menggunakan sensor pH yang digunakan pada sistem IoT dengan dua instrumen yaitu hasil lab DLH dan alat komersial (pH meter digital).

Tabel 5. Perbandingan nilai sensor pH dengan hasil lab. dan pH meter digital

Jenis Sampel	Lab DLH (pH)	pH Meter Dig. (pH)	Sistem IoT (pH)	Akurasi (%)	
	(a)	(b)	(c)	(a-c)	(b-c)
Air <i>laundry</i>	9,43	9,56	9,52	99,04	99,58
Air sumur bor	6,43	7,56	7,31	86,31	96,69

4.4. Hasil Pengolahan Data Sensor *Turbidity*

Berdasarkan hasil pengujian pada sampel air limbah *laundry* menunjukkan tingkat kekeruhan yang cukup signifikan, hal ini menunjukkan kadar detergen yang terkandung di dalamnya terbilang masif dan berbanding terbalik dengan sampel air sumur bor yang terlihat lebih jernih. Berikut Tabel 4.5 yang memuat hasil pengujian sensor *Turbidity* (kekeruhan)

Tabel 6. Hasil pengujian sensor *Turbidity* air *laundry* dan air sumur bor

Jenis Sampel	Percobaan ke-	Nilai Kekeruhan (NTU)	Indikator Kekeruhan (NTU)	Keterangan
Air <i>laundry</i>	1	91	25	Tidak layak
	2	90	25	Tidak layak
	3	89	25	Tidak layak
	4	90	25	Tidak layak
	5	88	25	Tidak layak
Air sumur bor	1	5	25	Layak
	2	6	25	Layak
	3	4	25	Layak
	4	4	25	Layak
	5	5	25	Layak
Rata-rata	Air <i>laundry</i> = 89,6 NTU			
	Air sumur bor = 4,8 NTU			

Untuk meyakinkan tingkat keakuratan dari hasil pengujian tabel di atas, maka peneliti menggunakan sampel larutan *Turbidity* 100 NTU yang dikeluarkan oleh laboratorium pihak luar, mengingat laboratorium dari DLH Kota Serang tidak menyertakan hasil pengukuran kekeruhan (air limbah *laundry* dan air sumur bor) karena terkendala teknis alat.

Tabel 7. Hasil pengujian sensor *Turbidity* dengan larutan *Turbidity* 100 NTU

Jenis Sampel	Percobaan ke-	Nilai Kekeruhan (NTU)	Indikator (NTU)	Selisih (NTU)
Larutan <i>Turbidity</i> 100 NTU	1	109	100	+9
	2	99	100	-1
	3	103	100	+3
	4	92	100	-8
	5	93	100	-7
Rata-rata	Uji sampel larutan <i>Turbidity</i> 100 NTU = 99,2 NTU			

Berdasarkan tabel di atas, nilai rata-rata hasil pengujian sensor *Turbidity* dari sistem IoT sebanyak lima kali menunjukkan bahwa pada sampel larutan *Turbidity* 100 NTU mampu memperoleh nilai rata-rata sebanyak 99,2 NTU dengan *presentase* keberhasilan 99,2 persen.

4.5. Hasil Pengolahan Data Sensor Suhu

Hasil pembacaan sensor DS18B20 pada sampel air limbah *laundry* dan air sumur bor menunjukkan angka yang relatif stabil dan berada pada rentang suhu lingkungan. Berikut hasilnya seperti dijelaskan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil pengolahan data suhu

Jenis Sampel	Percobaan ke-	Nilai Suhu (°C)	Indikator (°C)	Keterangan
Air <i>laundry</i>	1	27,3	38	Layak
	2	27,2	38	Layak
	3	27,2	38	Layak
	4	27,2	38	Layak
	5	27,2	38	Layak
Air sumur bor	1	27,3	38	Layak
	2	27,2	38	Layak
	3	27,2	38	Layak
	4	27,2	38	Layak
	5	27,2	38	Layak
Rata-rata	Air <i>laundry</i> = 27,22 °C			
	Air sumur bor = 27,22 °C			

Untuk memperoleh tingkat akurasi yang lebih valid dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, peneliti melakukan perbandingan data dengan hasil uji laboratorium dari DLH Kota Serang serta pengukuran manual menggunakan termometer digital pada jenis sampel yang sama.

Tabel 9. Hasil perbandingan data pengujian sensor suhu DS18B20 dengan lab. DLH dan alat thermometer digital

Jenis Sampel	Lab DLH (°C)	Termometer Dig. (°C)	Sistem IoT (°C)	Akurasi (%)	
	(a)	(b)	(c)	(a-c)	(b-c)
Air laundry	27,1	27,8	27,2	99,63	97,84
Air sumur bor	27,1	27,8	27,2	99,63	97,84

Hasil Tabel 9 menunjukkan perbedaan nilai suhu pada sensor dengan hasil uji laboratorium dan

termometer digital sedikit berbeda namun masih tergolong aman, mengingat beberapa faktor seperti lingkungan dan waktu pengujian juga bisa mempengaruhi hasil pembacaan pada sensor.

4.6. Hasil Pengolahan Data Aplikasi Blynk

Pengujian pada aplikasi Blynk dilakukan untuk mengetahui waktu respons (*delay*) sistem ketika pengguna memberikan perintah melalui aplikasi hingga sistem IPAL merespons perintah tersebut. Perintah yang diuji meliputi perubahan mode sistem, pengendalian aktuator, serta permintaan status kondisi sistem. Berikut hasil pengolahan data aplikasi Blynk yang tersaji pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil pengolahan data perintah aplikasi Blynk

Percobaan ke-	Perintah Blynk	Fungsi Perintah	Status Sistem	Delay (Detik)
1	Mode AUTO	Mengaktifkan kontrol otomatis	Aktif	± 1,52
2	Mode MANUAL	Mengaktifkan kontrol manual	Aktif	± 1,97
3	Pump ON dan Solenoid valve CLOSE	Menyalakan <i>water pump</i> dan otomatis menutup solenoid valve	ON untuk <i>water pump</i> dan CLOSE untuk solenoid valve	± 2,06
4	Pump OFF dan Solenoid valve OPEN	Mematikan <i>water pump</i> dan otomatis membuka solenoid valve	OFF untuk <i>water pum</i> dan OPEN untuk solenoid valve	± 1,79
5	Blower START	Mengaktifkan blower	<i>Live Countdown</i>	± 1,91
6	Status System	Melihat status sensor & aktuator	Tampil	± 2,03
7	Notifications & Events	Menampilkan notifikasi peringatan kualitas air tidak sesuai standar	Tampilan notifikasi Pump ACTIVATED: <i>Water quality bad</i>	± 2,50
Rata-Rata	$\frac{1,52 + 1,97 + 2,06 + 1,79 + 1,91 + 2,03 + 2,50}{7}$			= 1,96

4.7. Hasil Pengolahan Data Realtime Database Firebase

Firebase digunakan untuk menyimpan data historis hasil pemantauan dan aktivitas sistem IPAL secara terstruktur berdasarkan tanggal dan waktu

(*timestamp*). Data yang tersimpan mencakup nilai sensor, status aktuator, mode sistem (AUTO/MANUAL), serta catatan kejadian (*event*) dan aksi pengguna.

Tabel 11. Contoh hasil pengolahan data di Firebase

Timestamp	pH	NTU	Suhu (°C)	Blower	Pump	Solenoid	Mode
2026-01-25 18:24:45	7,12	22	28,31	A	OFF	OPEN	AUTO
2026-01-25 18:29:45	6,95	19	28,31	B	OFF	OPEN	AUTO
2026-01-25 18:37:09	6,40	21	28,31	A	ON	CLOSE	AUTO

4.8. Rekapitulasi dan Interpretasi Data Sistem

Rekapitulasi data dilakukan dengan menggabungkan seluruh hasil pengolahan data yang diperoleh dari setiap komponen sistem IoT pada prototipe Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). Data tersebut meliputi hasil pemantauan sensor, respons aplikasi Blynk, penyimpanan data pada Firebase, serta kinerja aktuator dalam berbagai kondisi

pengujian. Rekapitulasi ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang komprehensif mengenai performa sistem secara keseluruhan selama proses pengujian berlangsung. Hasil rekapitulasi setiap komponen sistem secara ringkas disajikan pada Tabel 12 untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai performa sistem.

Tabel 12. Rekapitulasi dan interpretasi data sistem

Komponen Sistem	Fungsi Utama	Parameter Pengujian	Hasil Pengujian	Interpretasi
Sensor pH	Mengukur tingkat keasaman air limbah	Nilai pH (0–14)	Data terbaca stabil dan mendekati nilai acuan	Sensor pH layak digunakan untuk pemantauan kualitas air
Sensor Turbidity	Mengukur tingkat kekeruhan air	Nilai NTU	Respons sesuai perubahan kondisi air	Sensor mampu mendeteksi kejernihan air limbah
Sensor Suhu (DS18B20)	Mengukur suhu air limbah	Suhu (°C)	Data terbaca konsisten	Sensor berfungsi normal dalam sistem
Aplikasi Blynk	Monitoring dan kontrol sistem	Waktu respons & tampilan data	Rata-rata $\text{delay} \pm 1\text{--}2$ detik	Sistem cukup responsif untuk kendali jarak jauh
Firestore Database	Penyimpanan data historis	Keberhasilan upload data	Data tersimpan sesuai waktu pengujian	Database dapat digunakan untuk analisis lanjutan
Water Pump	Sirkulasi ulang air limbah	Status ON/OFF	Aktif sesuai kondisi kualitas air	Pengendalian pompa berjalan sesuai logika sistem
Solenoid Valve	Mengatur aliran air limbah	Buka/Tutup	Respons sesuai perintah dan kondisi sensor	Kontrol aliran air limbah berjalan optimal
Blower (Aerator)	Proses aerasi air limbah	Interval waktu operasi	Beroperasi sesuai timer	Sistem aerasi berjalan sesuai perancangan

4.9. Hasil Pengujian

Berdasarkan seluruh hasil pengujian sistem IoT pada prototipe Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa seluruh fungsi utama sistem berjalan sesuai dengan spesifikasi yang telah dirancang. Sistem mampu melakukan pemantauan kualitas air limbah secara *real-time* menggunakan sensor pH, kekeruhan (*turbidity*), dan suhu, serta mengendalikan proses pengolahan melalui aktuatur berupa *water pump*, solenoid valve dan blower. Selain itu, sistem juga mampu menampilkan data pemantauan, menyimpan data historis, serta mengirimkan notifikasi melalui aplikasi Blynk secara responsif.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor mampu membaca parameter kualitas air dengan tingkat akurasi yang mendekati nilai acuan, sedangkan sistem kendali otomatis dan notifikasi mampu merespons perubahan kondisi kualitas air dengan waktu respons yang relatif cepat. Dengan demikian, sistem IoT IPAL yang dikembangkan dinilai mampu meningkatkan efisiensi pemantauan, pengendalian, dan respons terhadap kondisi kualitas air limbah dibandingkan dengan metode pemantauan manual. Maka dari itu, keputusan hipotesis yang bisa ditarik adalah seperti pada Tabel 13 berikut ini.

Tabel 13. Keputusan hipotesis

Hipotesis Penelitian	Hipotesis Nol (H_0)	Hipotesis Alternatif (H_a)	Keputusan
Kemampuan sistem IoT dalam memantau kualitas air limbah	Sistem IoT tidak mampu memantau parameter pH, kekeruhan, dan suhu air limbah secara <i>real-time</i> dengan tingkat akurasi yang dapat diterima	Sistem IoT mampu memantau parameter pH, kekeruhan, dan suhu air limbah secara <i>real-time</i> dengan tingkat akurasi yang dapat diterima	H_a diterima
Efisiensi operasional IPAL dengan aktuatur otomatis berbasis IoT	Penerapan sistem IoT dengan aktuatur otomatis tidak meningkatkan efisiensi operasional Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL)	Penerapan sistem IoT dengan aktuatur otomatis meningkatkan efisiensi operasional Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL)	H_a diterima
Kecepatan respons pengguna melalui sistem notifikasi IoT	Sistem notifikasi berbasis IoT tidak mempercepat respons pengguna terhadap kondisi kualitas air limbah yang tidak sesuai dengan baku mutu	Sistem notifikasi berbasis IoT mempercepat respons pengguna terhadap kondisi kualitas air limbah yang tidak sesuai dengan baku mutu	H_a diterima

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil sampling air limbah laundry dan air sumur bor sebagai pembanding pada prototipe IPAL, serta pengujian fungsional, akurasi sensor, dan respons sistem IoT, diperoleh beberapa kesimpulan utama. Sistem IoT menunjukkan hasil pengukuran pH sebesar 9,52 dibandingkan dengan hasil laboratorium DLH Kota Serang sebesar 9,43 dengan selisih $\pm 0,1$ pH setelah kalibrasi tiga titik. Pada parameter kekeruhan, sensor Turbidity mampu membaca 99 NTU dari larutan uji 100 NTU, sedangkan suhu terbaca stabil

pada kisaran 27,2 °C. Data ditampilkan secara *real-time* melalui Blynk dan tersimpan di Firestore, sehingga sistem mampu menyediakan informasi kualitas air secara kontinu dan terintegrasi, serta meningkatkan efisiensi pemantauan. Dari sisi operasional, aktuatur berupa *water pump* dan solenoid valve bekerja otomatis berdasarkan parameter sensor dengan delay $\pm 1\text{--}2$ detik, sementara blower beroperasi sesuai interval waktu. Sistem mampu mencegah pembuangan air limbah yang belum memenuhi standar dengan mengaktifkan pompa dan menutup valve saat

parameter melebihi ambang batas, sehingga meningkatkan efisiensi dan konsistensi pengolahan. Respons sistem terhadap perubahan nilai sensor rata-rata ± 2 detik dan notifikasi berhasil dikirim melalui Blynk saat kondisi kritis, menunjukkan kemampuan respons cepat.

Untuk pengembangan, disarankan penambahan parameter seperti COD, BOD, dan TSS, penggunaan sensor industri dengan kalibrasi otomatis, integrasi kecerdasan buatan untuk prediksi, pengembangan visualisasi data, serta pengujian skala besar jangka panjang. Dengan pengembangan berkelanjutan, sistem IoT IPAL ini berpotensi menjadi solusi praktis dalam pengelolaan air limbah yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Azmi, "Internet of Things Applications in Environmental Sustainability: A Comprehensive Review of Smart Monitoring Systems in Agriculture and Water Management Aplikasi Internet of Things untuk Keberlanjutan Lingkungan: Tinjauan Komprehensif Sistem Pemantauan Pintar dalam Pertanian dan Pengelolaan Air," *Open Science and Technology*, vol. 04, no. 02, pp. 2776–169, 2024, [Online]. Available: <https://opscitech.com/journal>
- [2] S. A. Sukarno, S. Hidayat, and A. M. Putri, "SISTEM MONITORING KUALITAS AIR LIMBAH RUMAH TANGGA BERBASIS IOT," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.5938.
- [3] I. S. Suasana, "Monitoring Air Limbah Rumah Sakit Berdasarkan Kadar pH Dan Suhu Menggunakan Arduino," *Media Informasi Penelitian Kabupaten Semarang*, vol. 5, no. 1, pp. 166–179, Jul. 2023, doi: 10.55606/sinov.v5i1.573.
- [4] A. Hasanudin Harapan and T. Arrya Gaotama, "PENGARUH INTERNET OF THINGS TERHADAP EFISIENSI MANAJEMEN SUMBER DAYA MANUSIA," *Humanities, Management and Science Proceedings*, vol. 04, no. 2, pp. 339–345, Jul. 2024, Accessed: Mar. 23, 2026. [Online]. Available: <https://openjournal.unpam.ac.id/index.php/SNH/article/view/43827>
- [5] J. Faza, S. I. Purnama, and F. T. Syifa, "Sistem Monitoring Tingkat pH, Kekeruhan dan Suhu Air Limbah Batik pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) Berbasis LoRa," *Journal of Telecommunication, Electronics, and Control Engineering (JTECE)*, vol. 3, no. 1, pp. 11–16, Jul. 2021, doi: 10.20895/jtece.v3i1.146.
- [6] Neshart, Rosdiana, D. Wibowo, and A. Syarif Sukri, "Perencanaan Desain Instalasi Pengolahan Air Limbah dengan Metode Biofilter Anaerob-Aerob," *Teknik Lingkungan UM Kendari*, vol. 1, no. 1, pp. 14–19, Jun. 2021, doi: 10.51454/teluk.v1i1.499.
- [7] R. A. Matondang, P. Lubis, H. T. Frianto, T. Elektronika, T. Elektro, and P. N. Medan, "RANCANG BANGUN WATER TREATMENT SISTEM PEMANTAU KUALITAS AIR BERBASIS INTERNET OF THINGS (IoT)," *Konferensi Nasional Sosial dan Engineering Politeknik Negeri Medan*, pp. 810–822, May 2022, doi: 10.51510/konsep.v3i1.886.
- [8] Nurhidayah, Handayani Linda, Samsidar, Fendriani Yoza, and Rustan, "PENGEMBANGAN INSTALASI PENGOLAH LIMBAH (IPAL) DIGITAL PORTABEL UNTUK LIMBAH CAIR BATIK BERBASIS IOT (INTERNET OF THINGS)," *JOP (Journal Online of Physics)*, vol. 7, pp. 30–34, Jun. 2022, doi: 10.22437/jop.v7i2.18189.
- [9] M. F. Roby, A. Soetedjo, and I. S. Faradisa, "Pengembangan Sistem Monitoring Kualitas Air Pada Ipal Tirtarona Tlogomas Kota Malang Menggunakan IoT Berbasis Lora," *SENIATI*, vol. 6, no. 2, pp. 33–41, Jul. 2022, doi: 10.36040/seniati.v6i1.4839.
- [10] I. Iswanto, F. Hunaini, and D. U. Effendy, "Prototype Monitoring and Controlling of Wastewater Treatment Plant (WWTP) on IoT-Free Output Channels," *JEEE-U (Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA)*, vol. 7, no. 1, pp. 40–63, Apr. 2023, doi: 10.21070/jeeeu.v7i1.1660.