

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan kebutuhan vital bagi seluruh makhluk hidup dan berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem. Seiring dengan pertumbuhan populasi dan meningkatnya aktivitas manusia, tekanan terhadap ketersediaan air bersih semakin meningkat. Di sisi lain, kualitas air di berbagai wilayah juga mengalami penurunan akibat pencemaran yang berasal dari sumber alami maupun aktivitas antropogenik, sehingga krisis ketersediaan air bersih kini menjadi tantangan global (Jayaraman dkk., 2024; Sheikh dkk., 2023). Pencemaran air dapat berasal dari proses alami, seperti aktivitas mikroba dan kondisi geologi, maupun dari aktivitas manusia. Aktivitas manusia yang berkontribusi terhadap pencemaran air meliputi kegiatan industri, praktik pertanian, permukiman perkotaan, pembuangan limbah yang tidak tepat, serta sistem pengolahan limbah yang tidak memadai (Jiang dkk., 2025). Degradasi kualitas air yang ditimbulkan oleh berbagai sumber tersebut tidak hanya mengancam keberlanjutan sumber daya lingkungan, tetapi juga berdampak langsung pada kesehatan masyarakat dan keseimbangan ekosistem perairan (Babuji dkk., 2023).

Salah satu sumber pencemar yang perlu mendapat perhatian serius adalah limbah cair yang dihasilkan oleh fasilitas pelayanan kesehatan, terutama rumah sakit (Li dkk., 2024). Limbah cair dari rumah sakit dapat mengandung senyawa organik, anorganik, bahan kimia, serta mikroorganisme patogen yang dapat menimbulkan risiko kesehatan dan kerusakan lingkungan apabila tidak diolah secara benar (Bhandari dkk., 2023). Oleh karena itu, keberadaan Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL) merupakan komponen penting dalam sistem pengelolaan limbah rumah sakit yang berfungsi menghilangkan zat pencemar dan kontaminan sehingga air buangan memenuhi baku mutu lingkungan yang ditetapkan sebelum dilepas ke lingkungan (Ghinea dkk., 2023).

Meskipun IPAL berperan penting, kinerja pengolahan limbah tidak selalu stabil. Variasi beban limbah, perubahan kondisi operasional, serta kendala teknis dapat menyebabkan fluktuasi parameter efluen (Aguilar-Rangel dkk., 2025). Parameter kualitas air seperti pH, suhu, dan *Total Dissolved Solids* (TDS) dapat mengalami fluktuasi akibat berbagai faktor, seperti ketidakseimbangan beban limbah, kegagalan proses biologis, maupun masalah teknis pada sistem pengolahan (Yang dkk., 2025). Perubahan signifikan pada parameter tersebut dapat menjadi indikator terjadinya anomali, yaitu penyimpangan kondisi dari pola normal yang berpotensi mempengaruhi efisiensi proses pengolahan air limbah (Liu dkk., 2025). Apabila anomali ini tidak terdeteksi dan ditangani secara cepat, IPAL berisiko mengalami penurunan kinerja, kegagalan memenuhi standar baku mutu, serta peningkatan potensi pencemaran lingkungan (El-Shafeiy dkk., 2023).

Metode pemantauan kualitas air limbah secara manual memerlukan waktu yang lama serta biaya yang relatif tinggi. Pendekatan konvensional ini memiliki keterbatasan, antara lain tidak mampu menyediakan informasi secara *real-time*, membutuhkan proses analisis yang panjang, dan kurang efektif dalam mendeteksi perubahan cepat pada parameter kualitas air (Zidaoui dkk., 2025). Kondisi tersebut mendorong perlunya sistem pemantauan berbasis sensor yang dapat bekerja kontinu dan memberikan peringatan dini ketika terjadi penyimpangan pola.

Perkembangan *Internet of Things* (IoT) membuka peluang untuk membangun sistem pemantauan kualitas air limbah yang lebih efisien, akurat, dan responsif. Melalui integrasi sensor pH, suhu, dan TDS dengan mikrokontroler Arduino Uno dan ESP32, data kualitas air dapat diakuisisi dan dikirimkan secara *real-time* melalui jaringan nirkabel ke *platform* pemantauan digital (Chavhan dkk., 2025). Salah satu *platform* IoT yang banyak digunakan adalah Blynk, yang menyediakan antarmuka digital berupa *dashboard* untuk menampilkan tren data, grafik historis, serta notifikasi ketika terjadi penyimpangan parameter kualitas air (Erawati dkk., 2025). Sistem ini memungkinkan operator IPAL rumah sakit melakukan pemantauan kondisi air buangan secara berkelanjutan dan merespons potensi penyimpangan kualitas air secara lebih cepat.

Meskipun IoT memungkinkan pemantauan kondisi air limbah secara *real-time*, pemanfaatan data sensor saja masih terbatas untuk mengidentifikasi penyimpangan kecil yang tidak tampak secara langsung (El-Shafeiy dkk., 2023). Teknologi kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) berperan dalam meningkatkan kemampuan analisis data dengan memanfaatkan pola historis parameter kualitas air untuk mengidentifikasi penyimpangan dari kondisi normal (Zidaoui dkk., 2025). Integrasi antara IoT dan AI kemudian dapat dioptimalkan menjadi sistem peringatan dini. Ketika terdeteksi adanya anomali, sistem secara otomatis mengirimkan notifikasi melalui *platform* Blynk. Peringatan dini ini memungkinkan operator untuk melakukan tindakan korektif secara lebih cepat sebelum gangguan berkembang dan mempengaruhi kinerja proses pengolahan (Chavhan dkk., 2025). Dengan demikian, penerapan IoT dan AI memungkinkan pemantauan parameter kualitas air secara kontinu serta deteksi dini terhadap penyimpangan kondisi operasional IPAL.

Pemanfaatan teknologi IoT dan AI dalam pemantauan kualitas air limbah telah banyak dikembangkan untuk mendukung pengawasan proses secara *real-time*. Forhad dkk. (2024) mengembangkan sistem pemantauan berbasis IoT pada instalasi pengolahan air yang mampu memantau parameter kualitas air secara kontinu, meliputi pH, *Dissolved oxygen* (DO), TDS, dan suhu, serta mekanisme peringatan dini yang ditentukan berdasarkan ambang batas tetap (*fixed threshold*) atau *rule-based* yang mengacu pada nilai baku kualitas air untuk masing-masing parameter. Selain itu, Chavhan dkk. (2025) mengembangkan sistem pemantauan air limbah industri berbasis IoT dan AI untuk pemantauan secara *real-time*. Parameter kualitas air yang dipantau meliputi pH, DO, *Electrical Conductivity* (EC), TDS, kekeruhan, dan suhu yang dilengkapi dengan mekanisme peringatan dini ketika terdeteksi gangguan proses pengolahan. Dalam konteks metode deteksi anomali, beberapa penelitian menunjukkan efektivitas *autoencoder* dalam pemrosesan data sensor, seperti yang dilakukan Zidaoui dkk. (2025) mengkaji penerapan model deep learning untuk deteksi anomali pada data jaringan air limbah perkotaan dengan membandingkan pendekatan *supervised* menggunakan ResNet dan pendekatan *unsupervised* menggunakan *autoencoder*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *autoencoder* memiliki keunggulan dalam mendeteksi anomali tanpa memerlukan data berlabel.

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pemantauan kualitas air limbah secara umum dan belum secara spesifik mengintegrasikan IoT, deteksi anomali berbasis kecerdasan buatan, serta mekanisme peringatan dini secara *real-time* pada *outlet* IPAL rumah sakit. Oleh karena itu, penelitian

ini menawarkan kontribusi berupa integrasi sistem *end-to-end* (sensor – IoT – server AI – *dashboard* – notifikasi) dengan *autoencoder* untuk mendeteksi penyimpangan pola data multivariat (pH, suhu, TDS) tanpa memerlukan label anomali. Status anomali merepresentasikan pola terhadap data latih dan tidak langsung diartikan sebagai penyebab tertentu maupun sebagai indikator kepatuhan terhadap baku mutu lingkungan. Berdasarkan pendekatan tersebut, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem pemantauan dan peringatan dini kualitas air limbah berbasis IoT dan AI pada *outlet* IPAL rumah sakit. Sensor yang digunakan berupa sensor pH 4502C, sensor DS18B20 (suhu air), dan sensor TDS Gravity V1.0. Data sensor diterima oleh Arduino Uno dan selanjutnya dikirimkan ke ESP32 sebagai modul Wi-Fi yang mendukung pengiriman data secara *real-time*. Data yang terkirim kemudian ditampilkan pada platform Blynk dalam bentuk *dashboard* digital yang dapat diakses melalui *smartphone*, sekaligus digunakan sebagai masukan bagi model AI untuk mendeteksi anomali. Melalui integrasi tersebut, sistem mampu memberikan notifikasi peringatan dini ketika terdeteksi penyimpangan pada parameter kualitas air, sehingga mendukung pemantauan jarak jauh dan respons operasional yang lebih cepat.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Membangun sistem pemantauan kualitas air limbah IPAL rumah sakit berbasis IoT yang mampu melakukan akuisisi dan transmisi data pH, suhu, dan TDS secara kontinu dan *real-time*.
2. Menerapkan algoritma kecerdasan buatan berbasis *autoencoder* untuk mengidentifikasi pola normal dan mendeteksi anomali pada data kualitas air limbah secara otomatis.
3. Mengintegrasikan sistem pemantauan dan deteksi anomali dengan mekanisme peringatan dini melalui platform digital guna mendukung respons cepat terhadap potensi penyimpangan parameter kualitas air limbah.

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini antara lain:

1. Meningkatkan efektivitas pemantauan kualitas air limbah IPAL rumah sakit, melalui sistem berbasis IoT yang mampu menyediakan data pH, suhu, dan TDS secara kontinu dan *real-time*.
2. Meningkatkan efektivitas pengawasan operasional IPAL rumah sakit melalui penerapan deteksi anomali berbasis data yang mampu mengidentifikasi penyimpangan awal pada parameter kualitas air limbah sebelum berkembang menjadi gangguan proses yang lebih serius.
3. Mendukung pengendalian dampak lingkungan dengan membantu operator IPAL dalam melakukan pemantauan dini terhadap perubahan kondisi kualitas air limbah sehingga dapat dilakukan pengecekan dan tindak lanjut secara tepat waktu.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilakukan mulai bulan Agustus 2025 hingga Desember 2025 di Laboratorium Elektronika dan Instrumentasi, Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin dan Rumah Sakit Umum Daerah (RSUD) Andi Djemma Masamba.

2.2 Peralatan Penelitian

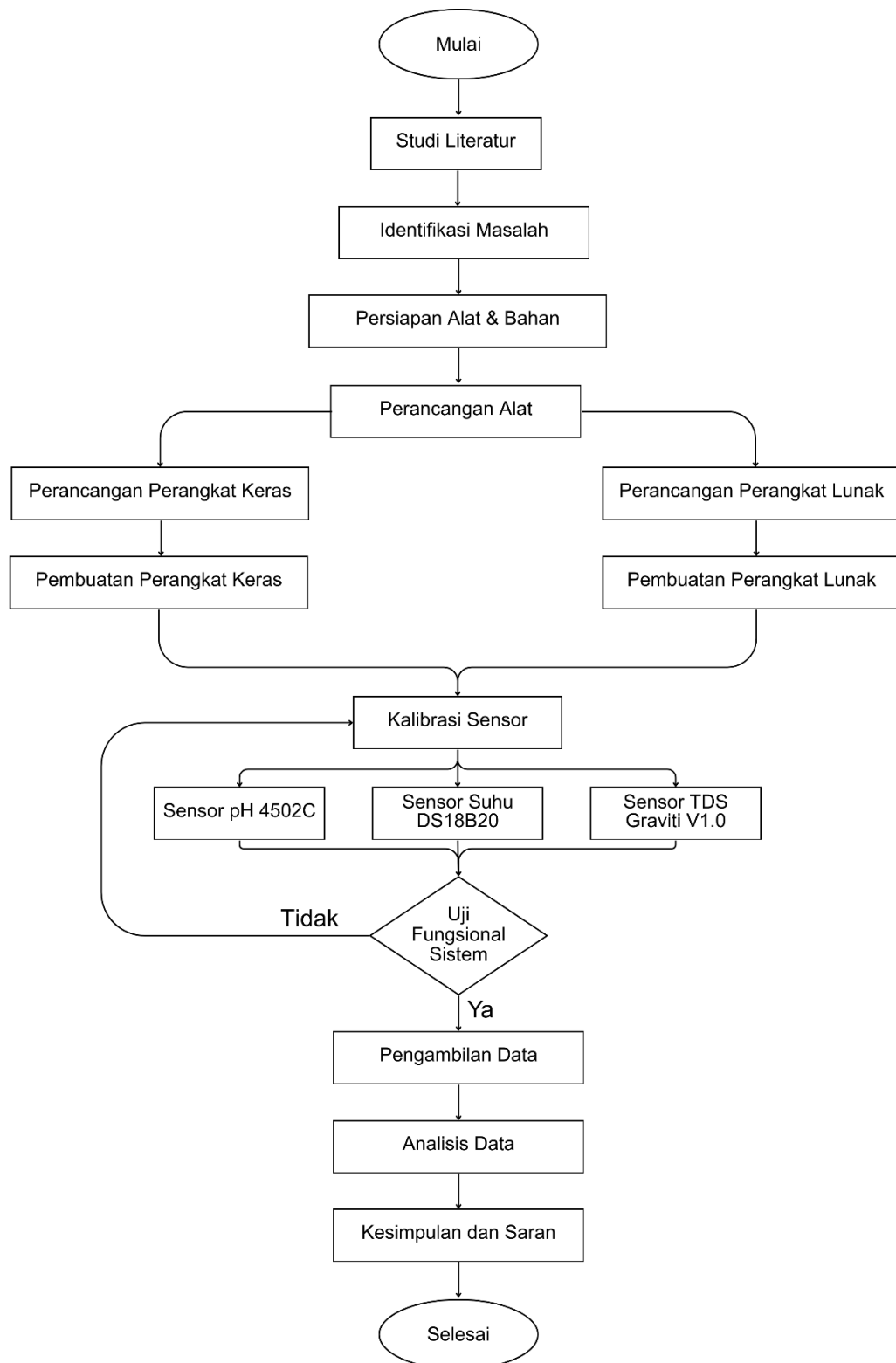
Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Arduino Uno, digunakan sebagai mikrokontroler utama yang menerima data dari sensor.
2. Board ESP32 (30 Pin), digunakan sebagai mikrokontroler tambahan untuk menghubungkan koneksi IoT ke internet.
3. Sensor pH 4502C, digunakan untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan dalam air.
4. Sensor suhu DS18B20, digunakan untuk mengukur suhu air.
5. Sensor TDS Gravity V1.0, digunakan untuk mengukur TDS dalam air.
6. Termometer digital, digunakan sebagai pembanding pengukuran suhu air.
7. pH meter, digunakan sebagai pembanding pengukuran pH air.
8. TDS meter, digunakan sebagai pembanding pengukuran TDS air.
9. Laptop, digunakan untuk menjalankan Arduino IDE dan pemrosesan data.
10. Kabel *jumper*, digunakan untuk menghubungkan mikrokontroler ke laptop.
11. Kabel USB, digunakan untuk menghubungkan Arduino Uno ke laptop dan menghubungkan *power bank* ke ESP32.
12. *Power bank*, digunakan sebagai sumber daya bagi mikrokontroler.
13. *Printed Circuit Board* (PCB), berfungsi untuk menghubungkan berbagai komponen elektronik secara rapi dan terorganisir.
14. Kotak elektronik, berfungsi sebagai wadah penyimpanan sistem komponen yang telah dirakit.
15. pH *buffer*, berfungsi sebagai larutan standar dengan nilai pH tertentu (yaitu 4,01, 6,86, 7,00, 9,18, dan 10,02) untuk mengkalibrasi pH meter agar pembacaannya akurat.
16. Akuades, berfungsi sebagai pelarut pH *buffer*, pelarut pengenceran larutan standar TDS, serta untuk membilas elektrode pada pH meter sebelum dan sesudah kalibrasi agar menghindari kontaminasi.
17. HCl (Asam Klorida), berfungsi sebagai larutan asam untuk menurunkan pH larutan uji.
18. NaOH (Natrium Hidroksida), berfungsi sebagai larutan basa untuk menaikkan pH larutan uji.
19. Gelas kimia 500 mL, digunakan sebagai wadah untuk melarutkan dan mencampur larutan *buffer* pada proses kalibrasi sensor pH 4502C.
20. Pipet tetes, digunakan untuk meneteskan larutan dalam jumlah kecil (seperti HCl dan NaOH) dalam menyesuaikan pH larutan uji.

21. Sendok pengaduk, berfungsi untuk mengaduk larutan *buffer* atau larutan uji agar homogen sebelum proses kalibrasi sensor pH 4502C.
22. Kompor portabel, digunakan untuk meningkatkan suhu air pada saat kalibrasi sensor DS18B20.
23. Wadah air, digunakan sebagai wadah air pada saat kalibrasi sensor DS18B20.
24. Es kristal, digunakan untuk menurunkan suhu air pada saat kalibrasi sensor DS18B20.
25. Cairan kalibrasi TDS 1382 ppm, digunakan untuk kalibrasi sensor TDS Gravity V1.0.

2.3 Metode Kerja

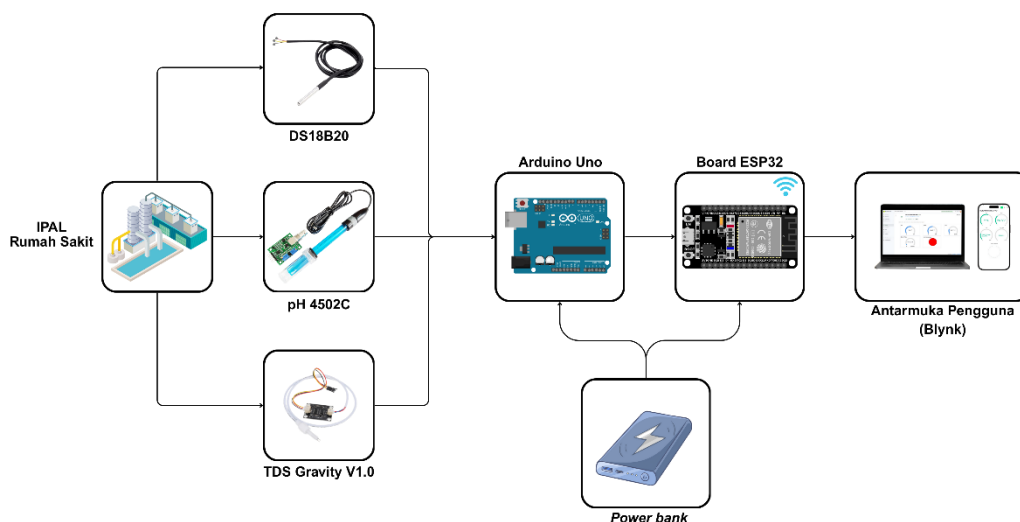
Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk mencari referensi yang relevan dengan sistem deteksi anomali pada kualitas air limbah berbasis IoT dan AI. Selanjutnya dilakukan identifikasi masalah sebagai dasar penentuan tujuan penelitian. Tahap berikutnya adalah persiapan alat dan bahan yang digunakan selama penelitian. Setelah itu dilakukan perancangan sistem, yang meliputi perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*). Perancangan perangkat keras meliputi integrasi sensor dengan mikrokontroler, sedangkan perancangan perangkat lunak meliputi pembuatan program pembacaan sensor, pengolahan data, pengiriman data ke sistem pemantauan berbasis IoT, serta perancangan model AI untuk mendeteksi anomali pada data kualitas air limbah *outlet* IPAL rumah sakit. Selanjutnya dilakukan kalibrasi sensor pH 4502C, sensor DS18B20, dan sensor TDS Gravity V1.0 untuk memastikan akurasi pengukuran. Tahap berikutnya adalah pengujian sistem, yang bertujuan untuk memastikan seluruh komponen sistem, termasuk model AI untuk deteksi anomali dan mekanisme notifikasi, dapat bekerja dengan baik dan saling terintegrasi. Apabila sistem telah berfungsi dengan baik, maka dilakukan pengambilan data secara periodik. Data yang diperoleh selanjutnya dilakukan analisis data menggunakan AI untuk mengidentifikasi penyimpangan atau anomali pada kualitas air limbah. Hasil deteksi anomali tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam pemberian notifikasi kepada pengelola IPAL rumah sakit apabila terjadi kondisi yang tidak normal. Secara umum, tahapan penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan alir penelitian

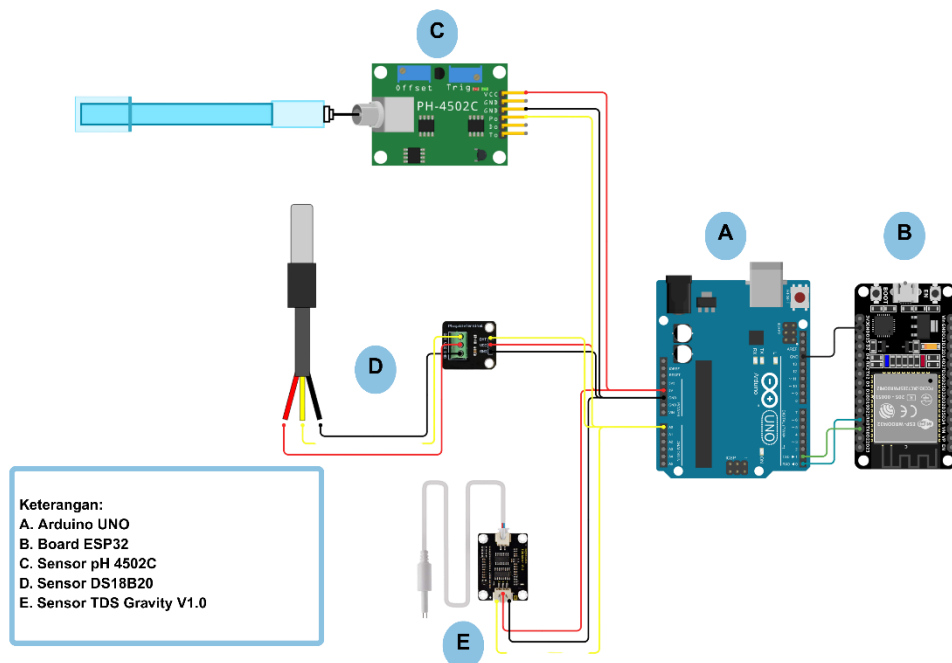
2.3.1 Perancangan Perangkat Keras

Penelitian ini diawali dengan perancangan perangkat keras. Komponen perangkat keras yang digunakan meliputi mikrokontroler, sensor pH 4502C untuk mengukur tingkat keasaman air, sensor DS18B20 untuk mengukur suhu air, sensor TDS Gravity V1.0 untuk mengukur total padatan terlarut, serta laptop yang digunakan sebagai media pemrosesan algoritma. Adapun perancangan perangkat keras ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perancangan perangkat keras

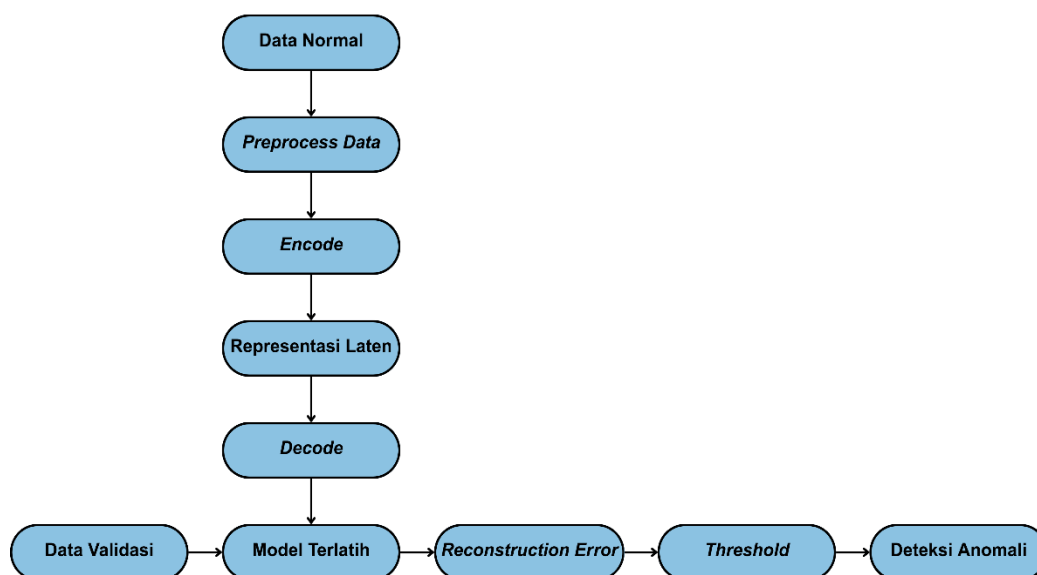
Alur kerja sistem dimulai ketika tiga sensor kualitas air, yaitu sensor pH 4502C, sensor DS18B20, dan sensor TDS Gravity V1.0, melakukan pembacaan parameter air limbah pada *outlet* IPAL rumah sakit. Sensor pH 4502C berfungsi untuk mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air limbah, sensor DS18B20 digunakan untuk mengukur suhu air limbah, sedangkan sensor TDS Gravity V1.0 berfungsi untuk mengukur kadar zat terlarut dalam air limbah. Data hasil pembacaan sensor selanjutnya diproses oleh Arduino Uno sebagai unit akuisisi data, yang dipilih karena mampu memberikan pembacaan sensor pH 4502C dan TDS Gravity V1.0 yang lebih stabil pada sinyal analog dibandingkan penggunaan langsung ADC ESP32. Data yang telah diakuisisi kemudian dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi serial. ESP32 berperan sebagai unit pemrosesan dan komunikasi data yang dilengkapi dengan konektivitas Wi-Fi terintegrasi untuk mengirimkan data ke *platform* pemantauan berbasis web atau aplikasi. Platform pemantauan digunakan sebagai antarmuka pengguna untuk menampilkan data kualitas air limbah secara *real-time*, menyimpan data historis, serta mendukung proses analisis dan deteksi anomali. Dengan sistem ini, pengguna dapat memantau kondisi *outlet* IPAL secara berkelanjutan dan memperoleh peringatan dini apabila terjadi penyimpangan kualitas air. Seluruh sistem ini mendapat suplai daya dari *power bank* dengan tegangan 5 volt. Skema rangkaian antar komponen perangkat keras dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema rangkaian sistem

2.3.2 Perancangan Perangkat Lunak

Pada perancangan perangkat lunak, sistem terdiri dari dua bagian utama, yaitu proses pelatihan model AI dan antarmuka pengguna berbasis IoT. Perangkat lunak dirancang untuk mendukung deteksi anomali kualitas air limbah *outlet* IPAL rumah sakit secara *real-time* berdasarkan parameter pH, suhu, dan TDS. Proses pelatihan model AI diawali dengan pengumpulan data hasil pengukuran lapangan yang digunakan sebagai dataset. Dataset ini merepresentasikan kondisi normal kualitas air limbah *outlet* IPAL dan digunakan sebagai data pelatihan model menggunakan Python. Selanjutnya, dataset tersebut dilakukan *preprocessing* data yang meliputi pembersihan data untuk menghapus data duplikat, memperbaiki data kosong, serta normalisasi data agar memiliki skala yang seragam sebelum digunakan dalam pelatihan model AI. Setelah melalui tahap *preprocessing*, dataset kemudian dibagi menjadi data latih dan data uji. Data latih digunakan untuk membangun model AI hingga diperoleh model terlatih, sedangkan data uji digunakan untuk mengevaluasi kinerja model melalui perhitungan galat rekonstruksi (*reconstruction error*). Nilai galat rekonstruksi dari data uji selanjutnya dianalisis untuk menentukan nilai ambang batas (*threshold*) yang digunakan sebagai acuan dalam proses deteksi anomali. Alur proses pelatihan dan pengujian model AI pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pelatihan model AI

Algoritma kecerdasan buatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah *autoencoder*, yang dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan hubungan nonlinear serta mempelajari pola dasar data sensor tanpa memerlukan pelabelan data. *Autoencoder* bekerja dengan memetakan data masukan ke dalam representasi berdimensi lebih rendah (*encoding*) dan kemudian merekonstruksinya kembali ke bentuk semula (*decoding*) (Nicholaus dkk., 2021). Pada tahap pelatihan, model dilatih menggunakan data kualitas air limbah dalam kondisi normal sehingga mampu merepresentasikan karakteristik umum parameter pH, suhu, dan TDS. Proses pelatihan model dievaluasi menggunakan nilai *loss*, yang merepresentasikan tingkat kesalahan rekonstruksi antara data masukan dan data hasil keluaran model. Nilai *loss* yang semakin kecil menunjukkan bahwa model semakin baik dalam mempelajari pola normal data (Esmaeili dkk., 2023). Karena *autoencoder* dilatih secara *unsupervised* menggunakan data kondisi normal tanpa label anomali, evaluasi kinerja model tidak dapat dilakukan menggunakan metrik klasifikasi konvensional seperti akurasi, *precision*, *recall*, dan *confusion matrix*. Oleh karena itu, evaluasi difokuskan pada analisis nilai *loss* dan galat rekonstruksi sebagai indikator kemampuan model dalam mempelajari pola normal data. Setelah model terlatih, proses deteksi anomali dilakukan dengan menghitung galat rekonstruksi, yaitu selisih antara nilai data masukan dan nilai hasil rekonstruksi model untuk setiap data pengamatan. Ketika data baru yang masuk memiliki pola yang berbeda dari kondisi normal, *autoencoder* akan menghasilkan nilai galat rekonstruksi yang lebih tinggi, yang mengindikasikan adanya penyimpangan atau anomali pada kualitas air limbah (Zygal dkk., 2024). Untuk membedakan antara kondisi normal dan anomali, digunakan *threshold* yang ditentukan berdasarkan metode tiga simpangan baku (3σ) dari distribusi galat rekonstruksi data pelatihan. *Threshold* ditetapkan sebagai nilai rata-rata galat rekonstruksi ditambah tiga kali standar deviasi, sehingga data yang memiliki nilai galat rekonstruksi melebihi *threshold* diklasifikasikan

sebagai anomali (Nicholaus dkk., 2021). Selanjutnya, model terlatih diuji menggunakan data validasi untuk memastikan kemampuannya dalam mengenali data baru secara konsisten dan stabil. Evaluasi kinerja model dilakukan dengan menganalisis distribusi galat rekonstruksi terhadap *threshold* yang telah ditetapkan. Pendekatan ini memungkinkan *autoencoder* digunakan sebagai metode deteksi anomali berbasis data yang efektif tanpa memerlukan data berlabel, sehingga sangat sesuai untuk diterapkan pada sistem pemantauan kualitas air limbah secara *real-time*.

Selanjutnya dilakukan perancangan antarmuka pemantauan berbasis IoT menggunakan aplikasi Blynk untuk menampilkan hasil pembacaan sensor secara *real-time*. Platform Blynk digunakan karena memungkinkan data sensor dipantau melalui *smartphone* maupun *website*. Langkah awal yang dilakukan adalah membuat akun Blynk menggunakan alamat surel. Setelah akun berhasil dibuat, selanjutnya dibuat template perangkat dengan nama “Deteksi Anomali IPAL”, kemudian dipilih ESP32 sebagai perangkat keras yang digunakan, serta Wi-Fi sebagai jenis koneksi. Tahap berikutnya adalah pembuatan *datastream* untuk masing-masing parameter yang diukur, yaitu pH, suhu, TDS, galat rekonstruksi, serta status anomali. *Datastream* ini berfungsi untuk menentukan virtual pin yang menjadi penghubung antara aplikasi Blynk dan mikrokontroler ESP32, sehingga data hasil pembacaan sensor dapat dikirim dan ditampilkan secara *real-time*. Pembuatan *datastream* dapat dilihat pada Gambar 5.

Virtual Pin Datastream

General Expose to Automations

NAME: pH ALIAS: pH

PIN: V0 DATA TYPE: Double

UNITS: None

MIN: 0 MAX: 14 DECIMALS: ### DEFAULT VALUE: Default Value

☒ Enable history data

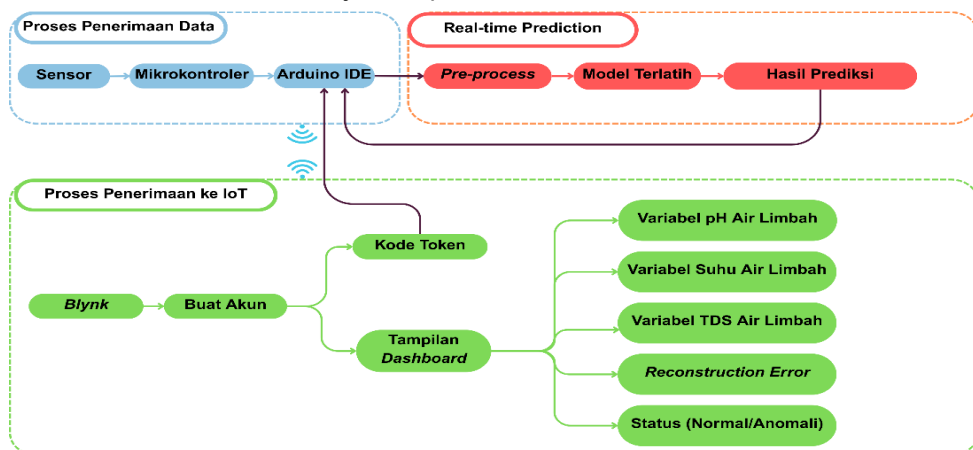
Cancel Save

Gambar 5. Pembuatan *datastream* pada Blynk

Tahap berikutnya adalah perancangan tampilan *dashboard* pada platform Blynk untuk memvisualisasikan hasil pemantauan kualitas air limbah outlet IPAL secara *real-time*. Perancangan diawali dengan menyeret *widget Box* pada halaman *web dashboard* ke atas kanvas, kemudian dilakukan pengaturan dan penyesuaian sesuai dengan *datastream* yang telah dibuat. Setelah pembuatan *template dashboard* dan *datastream* selesai, diperoleh Blynk IDE *template* dan token autentikasi (*auth token*) yang digunakan sebagai identitas perangkat agar ESP32 dapat terhubung dengan server Blynk. Selanjutnya, ID *template*, nama *template*, token autentikasi, dan server URL dimasukkan

ke dalam program ESP32 melalui Arduino IDE sebagai bagian dari konfigurasi komunikasi IoT. Konfigurasi ini memungkinkan ESP32 terhubung dengan server Blynk dan mengirimkan data sensor secara *real-time*. Program ESP32 yang terintegrasi dengan aplikasi Blynk disajikan pada Lampiran 11. Setelah proses pemrograman pada Arduino IDE selesai dan program berhasil diunggah ke ESP32, tahap selanjutnya adalah menjalankan server FastAPI sebagai *Application Programming Interface* (API) yang menghubungkan sistem IoT dengan model kecerdasan buatan. Server FastAPI dijalankan melalui terminal menggunakan perintah `"uvicorn main:app --host 0.0.0.0 --port 8000 --reload"`. Apabila perintah tersebut berhasil dijalankan, terminal akan menampilkan informasi `"Uvicorn running on http://..."` yang menandakan bahwa server FastAPI telah aktif dan siap menerima permintaan data. Munculnya kode status 200 menunjukkan bahwa layanan prediksi berbasis model autoencoder telah berhasil dimuat dan dapat digunakan untuk memproses data sensor. Kode program server FastAPI disajikan pada Lampiran 12.

Model *autoencoder* yang telah terlatih dan tervalidasi selanjutnya digunakan untuk melakukan deteksi anomali kualitas air limbah secara *real-time*. Hasil deteksi anomali digunakan sebagai dasar dalam sistem peringatan dini terhadap penyimpangan kualitas air limbah pada *outlet* IPAL rumah sakit dan ditampilkan melalui *dashboard* Blynk dalam bentuk pH, suhu, TDS, galat rekonstruksi, serta status anomali. Rancangan perangkat lunak secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perancangan perangkat lunak

2.4 Kalibrasi Sensor

2.4.1 Kalibrasi Sensor pH 4502C

Kalibrasi sensor pH 4502C dilakukan dengan membandingkan nilai analog hasil pembacaan sensor dengan nilai yang ditunjukkan oleh pH meter sebagai alat pembanding. Proses kalibrasi dimulai dengan menempatkan sensor pH 4502C dan pH meter secara bersamaan ke dalam larutan *buffer* standar yang disiapkan di dalam gelas kimia berkapasitas 500 mL. Larutan *buffer* dibuat menggunakan akuades sebagai pelarut dan bubuk *buffer* dengan nilai pH tertentu, yaitu pH 4,01; 6,86; 7,00; 9,18; dan 10,01. Untuk memperluas cakupan pengujian, dilakukan variasi nilai pH larutan dari kondisi sangat asam hingga sangat basa. Larutan dengan pH asam diperoleh melalui

penambahan larutan HCl, sedangkan larutan dengan pH basa dihasilkan melalui penambahan larutan NaOH. Data kalibrasi selanjutnya diperoleh dengan membandingkan hasil pembacaan sensor pH 4502C dan pH meter pada seluruh rentang pH yang diuji, mencakup kondisi asam, netral, dan basa.

2.4.2 Kalibrasi Sensor DS18B20

Kalibrasi sensor suhu DS18B20 dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan nilai sensor dengan nilai yang ditampilkan oleh termometer digital. Proses kalibrasi dimulai dengan menurunkan suhu air hingga mendekati 0°C melalui penambahan es kristal ke dalam air, kemudian suhu air dinaikkan secara bertahap hingga mencapai 85°C dengan cara memanaskan air menggunakan kompor portabel. Pada setiap kenaikan suhu dalam rentang 0°C hingga 85°C, pengukuran dilakukan secara bersamaan menggunakan sensor DS18B20 dan termometer digital sebagai alat ukur pembanding. Data hasil pengukuran tersebut selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi akurasi dan tingkat kesesuaian sensor DS18B20 pada seluruh rentang pengujian.

2.4.3 Kalibrasi Sensor TDS Gravity V1.0

Kalibrasi sensor TDS Gravity V1.0 dilakukan dengan membandingkan nilai analog hasil pembacaan sensor terhadap nilai yang ditunjukkan oleh TDS meter sebagai alat ukur pembanding. Proses kalibrasi menggunakan larutan kalibrasi TDS 1382 ppm sebagai larutan standar. Untuk memperoleh variasi nilai TDS pada rentang 0 ppm hingga 1000 ppm, digunakan akuades sebagai larutan dasar, kemudian larutan kalibrasi TDS ditambahkan secara bertahap hingga mencapai nilai TDS yang diinginkan. Pada setiap variasi konsentrasi TDS, pengukuran dilakukan secara bersamaan menggunakan sensor TDS Gravity V1.0 dan TDS meter. Data hasil pengukuran tersebut selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi akurasi dan tingkat kesesuaian sensor TDS Gravity V1.0 pada seluruh rentang pengujian.

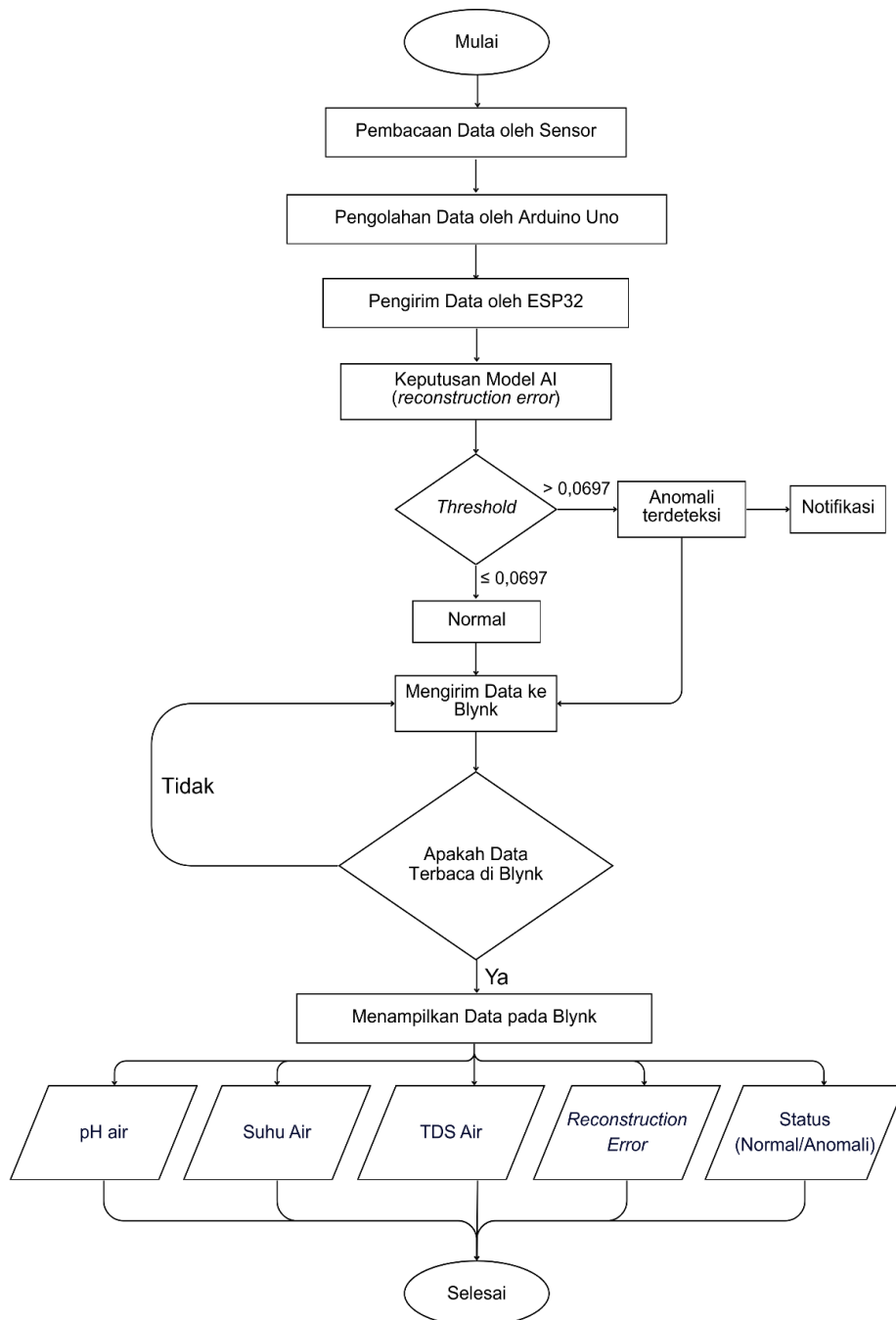
2.5 Uji Fungsional Sistem

Uji fungsional sistem dilakukan untuk memastikan seluruh komponen berfungsi dengan baik, meliputi pembacaan sensor pH 4502C, sensor DS18B20, dan sensor TDS Gravity V1.0, proses pengolahan data oleh Arduino Uno, serta pengiriman data ke sistem pemantauan melalui ESP32. Pengujian juga mencakup verifikasi hasil kalibrasi masing-masing sensor untuk memastikan akurasi data kualitas air limbah yang diperoleh. Selain itu, dilakukan pengujian terhadap sistem deteksi anomali untuk memastikan model *autoencoder* mampu mengidentifikasi penyimpangan kualitas air limbah berdasarkan nilai galat rekonstruksi dan *threshold* yang telah ditentukan. Selanjutnya, pengujian pemantauan pada aplikasi Blynk dilakukan untuk memastikan data kualitas air limbah dan status kondisi (normal/anomali) dapat ditampilkan secara *real-time* dan notifikasi peringatan dini dapat diterima dengan baik.

2.6 Bagan Alir Sistem Kerja Alat

Sistem kerja dimulai ketika sensor pH 4502C, sensor DS18B20, dan sensor TDS Gravity V1.0 melakukan pembacaan parameter kualitas air limbah pada *outlet* IPAL rumah sakit secara *real-time*. Data hasil pembacaan sensor kemudian diproses oleh Arduino Uno dan dikirimkan ke ESP32. Data tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan model AI

autoencoder untuk menghitung nilai galat rekonstruksi dan membandingkannya dengan *threshold* yang telah ditentukan. Apabila nilai galat rekonstruksi melebihi *threshold*, maka terdeteksi anomali dan sistem mengirimkan notifikasi peringatan dini. Seluruh data pengukuran dan status kondisi (normal/anomali) ditampilkan secara *real-time* pada *dashboard* aplikasi Blynk sebagai antarmuka pemantauan kualitas air limbah IPAL rumah sakit.



Gambar 7. Bagan alir sistem kerja alat