

MERANCANG DAN MEMBANGUN SISTEM IOT PORTABEL UNTUK PEMETAAN SPASIAL DAN PENENTUAN KELAYAKAN KUALITAS AIR MINUM MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY

Zahid Faqih Alim Rabbani

ABSTRAK

Ketersediaan air minum yang aman dan layak konsumsi, terutama dari sumber mata air alami, merupakan kebutuhan fundamental bagi masyarakat. Namun, informasi mengenai kualitas air di berbagai lokasi tersebut seringkali sulit diakses secara *real-time*, bersifat statis, dan tidak memiliki kemampuan prediktif. Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun sebuah sistem cerdas portabel berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu melakukan pemetaan spasial dan prediksi kualitas air minum. Metode yang digunakan adalah rancang bangun, di mana sistem dikembangkan melalui tiga komponen utama: perangkat keras portabel, platform *backend* dan *frontend*, serta model *machine learning*. Perangkat keras dibangun menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor multi-parameter (pH, TDS, Suhu, dan Kekeruhan) dan sebuah modul GPS untuk akuisisi data lokasi. Data yang terkumpul secara nirkabel dikirim ke server *cloud* untuk disimpan dan diolah. Hasil monitoring divisualisasikan pada sebuah aplikasi interaktif yang menampilkan peta spasial dengan penanda kualitas air. Untuk penentuan kelayakan, diterapkan metode logika fuzzy yang mengolah parameter fisik-kimia menjadi kategori linguistik seperti *Layak*, *Perlu Perlakuan*, dan *Tidak Layak*. Pengujian dilakukan untuk menilai akurasi sensor, keandalan transmisi data, serta validitas klasifikasi fuzzy terhadap standar kualitas air yang berlaku. Hasil penelitian ini berupa prototipe sistem portabel terintegrasi yang tidak hanya menyajikan data kualitas air, tetapi juga memberikan interpretasi langsung mengenai kelayakan air minum berdasarkan lokasi. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi praktis dan informatif bagi masyarakat untuk mengakses informasi kualitas air secara cepat, murah, dan mudah dipahami.

Kata Kunci: *IoT*, Kualitas Air Minum, Pemetaan Spasial, GPS, *Logika Fuzzy*

DESIGN AND BUILD A PORTABLE IOT SYSTEM FOR SPATIAL MAPPING AND DETERMINING THE FEASIBILITY OF DRINKING WATER QUALITY USING FUZZY LOGIC

Zahid Faqih Alim Rabbani

ABSTRACT

The availability of safe and drinkable drinking water, especially from natural springs, is a fundamental need for the community. However, information on water quality in various locations is often difficult to access in real time, is static, and lacks predictive capabilities. This study aims to design a portable, Internet of Things (IoT)-based intelligent system capable of spatial mapping and predicting drinking water quality. The method used is design and construction, where the system is developed through three main components: portable hardware, backend and frontend platforms, and a machine learning model. The hardware is built using an ESP32 microcontroller integrated with multi-parameter sensors (pH, TDS, Temperature, and Turbidity) and a GPS module for location data acquisition. The collected data is wirelessly sent to a cloud server for storage and processing. The monitoring results are visualized in an interactive application that displays a spatial map with water quality markers. To determine feasibility, a fuzzy logic method is applied that processes physical-chemical parameters into linguistic categories such as Feasible, Needs Treatment, and Not Feasible. Testing was conducted to assess sensor accuracy, data transmission reliability, and the validity of fuzzy classification against applicable water quality standards. The result of this research is a prototype of an integrated, portable system that not only presents water quality data but also provides direct interpretation of the water's potability based on location. This system is expected to be a practical and informative solution for the public to access water quality information quickly, affordably, and easily understood.

Keywords: IoT, Drinking Water Quality, Spatial Mapping, GPS, Fuzzy Logic

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air minum yang aman dan bermutu merupakan kebutuhan dasar masyarakat untuk menjaga kesehatan dan mencegah penyakit. Namun, saat ini akses air bersih sangat terbatas, terutama karena pertumbuhan penduduk, polusi, dan perubahan iklim. [1] Ketersediaan air minum yang berkualitas dan aman untuk dikonsumsi merupakan hak dan kebutuhan primer untuk menjaga kesehatan serta kesejahteraan. Menurut WHO, polusi air adalah isu global yang harus dipantau secara ketat agar pihak berwenang dapat segera mengambil tindakan pencegahan yang diperlukan. Dalam konteks ini, pemantauan parameter kualitas air fisik dan kimia (seperti pH, total padatan terlarut/TDS, kekeruhan, dan suhu) menjadi sangat penting karena parameter-parameter tersebut merupakan indikator utama kelayakan air minum bagi manusia. WHO bahkan menekankan bahwa sifat fisik air (termasuk pH dan kekeruhan) harus dipertahankan dalam batas tertentu untuk memastikan air layak dikonsumsi. [2]

Pendekatan tradisional pemantauan kualitas air pada umumnya mengandalkan pengambilan sampel manual dan pengujian laboratorium periodik. Metode ini bersifat episodik dan memerlukan waktu analisis yang cukup lama. [3] Dengan demikian, data yang diperoleh seringkali terlambat dan tidak real-time, sehingga respons terhadap pencemaran atau perubahan kualitas air menjadi terhambat. Beberapa studi menyatakan bahwa pengujian laboratorium konvensional bersifat manual, mahal, memakan waktu, dan tidak menyediakan umpan balik waktu nyata. [4] Selain itu, sistem monitoring statis hanya melaporkan kondisi di lokasi tertentu saat sampel diambil, tanpa menyajikan gambaran spasial yang dinamis. Keterbatasan temporal dan spasial ini membatasi kemampuan pengawasan kualitas air secara menyeluruh.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) dan sistem lokasi (GPS/GNSS) menawarkan solusi pemantauan kualitas air yang lebih baik. IoT memungkinkan penggunaan sensor berbiaya rendah yang terus-menerus mengukur parameter kualitas air (misalnya pH, TDS, suhu, kekeruhan) secara real-time. Data sensor dikirim melalui jaringan nirkabel ke platform terpusat untuk analisis dan visualisasi, sehingga monitoring menjadi otomatis dan berkelanjutan. Sistem IoT juga dapat memberikan peringatan dini dan pencatatan data historis secara real-time, meningkatkan efisiensi pengumpulan data dan mendukung pengambilan keputusan cepat saat terjadi perubahan kualitas air. Lebih lanjut, integrasi IoT dengan layanan

berbasis lokasi (seperti GPS) memungkinkan pemetaan spasial data kualitas air. Dengan demikian, alat portabel berbasis IoT tidak hanya memberi informasi kualitas air di titik uji, tetapi juga mampu menampilkan peta kualitas di area sekitarnya secara dinamis. Pendekatan ini menyediakan wawasan spasial untuk stakeholder, memberdayakan upaya kolaboratif dalam pengelolaan sumber daya air. [5]

Klasifikasi kelayakan air minum sering melibatkan data yang tidak pasti dan kriteria yang kompleks. Logika fuzzy sangat sesuai digunakan dalam konteks ini karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan kekaburan data. Logika fuzzy memungkinkan penggunaan himpunan fuzzy dan aturan inferensi berbasis keanggotaan, sehingga parameter kualitas air dapat dinyatakan dalam istilah linguistik (misalnya “rendah”, “sedang”, “tinggi”). Hal ini meningkatkan toleransi sistem terhadap data yang tidak presisi serta membuat model klasifikasi lebih fleksibel dan mudah dipahami oleh pengambil keputusan non-teknis. Logika fuzzy juga dapat menyatukan berbagai parameter secara simultan untuk menentukan status kelayakan air, membantu menghasilkan keputusan yang lebih holistik dibandingkan metode indeks kualitas air (WQI) konvensional. Oleh karena itu, penggunaan logika fuzzy dalam sistem IoT portabel ini diharapkan mampu memberikan klasifikasi kelayakan air yang andal dan informatif bagi pengguna. [6] [7]

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan membangun sebuah perangkat keras portabel yang mampu mengintegrasikan sensor multi-parameter (pH, TDS, suhu, kekeruhan) dan modul GPS secara efisien?
2. Bagaimana membangun sistem IoT yang dapat menerima, menyimpan, dan menyajikan data kualitas air berbasis lokasi (geospasial) pada sebuah platform peta digital secara *real-time*?
3. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem klasifikasi berbasis logika fuzzy untuk menentukan tingkat kelayakan kualitas air minum berdasarkan parameter fisik-kimia yang terukur?
4. Bagaimana menguji dan mengevaluasi kinerja sistem secara keseluruhan, mencakup akurasi perangkat keras, fungsionalitas platform, dan validitas model prediksi?

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan perumusan masalah, tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan membuat prototipe sistem cerdas portabel untuk monitoring kualitas air minum yang dilengkapi sensor multi-parameter dan GPS.
2. Membangun sebuah sistem IoT yang mampu melakukan pemetaan spasial data kualitas air secara *real-time* pada antarmuka peta digital.
3. Mengimplementasikan metode klasifikasi berbasis logika fuzzy untuk menilai kelayakan kualitas air minum dari parameter fisik-kimia yang diukur.
4. Membuktikan bahwa sistem yang terintegrasi dapat berfungsi dengan baik sebagai alat bantu bagi masyarakat untuk mengetahui dan memprediksi kualitas air minum di berbagai sumber mata air.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus, maka ruang lingkup atau batasan masalahnya adalah sebagai berikut:

1. Perangkat keras yang dirancang berbasis mikrokontroler ESP32 dengan sensor yang digunakan adalah sensor pH, TDS, suhu (DS18B20), dan kekeruhan (turbidity).
2. Pengambilan data lokasi menggunakan modul GPS yang terintegrasi pada perangkat.
3. Transmisi data dari perangkat ke server menggunakan konektivitas Wi-Fi.
4. Visualisasi data pemetaan spasial disajikan dalam bentuk aplikasi web (*web app*), bukan aplikasi mobile natif.
5. Penelitian ini tidak mencakup pengujian parameter biologis (seperti bakteri *E. coli*) dan kimia kompleks yang memerlukan analisis laboratorium.

1.5 Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran yang jelas dan terstruktur mengenai laporan penelitian ini, maka sistematika penulisannya adalah sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN Bab ini berisi latar belakang masalah, perumusan masalah, ruang lingkup, tujuan penelitian, metode penelitian, serta sistematika penulisan laporan skripsi.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI Bab ini menguraikan teori-teori fundamental yang mendukung penelitian, mencakup konsep *Internet of Things* (IoT),

mikrokontroler, jenis-jenis sensor yang digunakan, sistem pemosisi global (GPS), serta standar kualitas air minum.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN Bab ini menjelaskan secara rinci langkah-langkah penelitian yang dilakukan, mulai dari analisis kebutuhan, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak dalam bentuk diagram blok dan diagram alir, hingga jadwal pelaksanaan penelitian.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN Bab ini menyajikan hasil dari implementasi dan pengujian sistem. Meliputi wujud prototipe perangkat yang telah dibuat, hasil pengujian fungsionalitas alat, tampilan antarmuka platform pemetaan, serta analisis kinerja dan akurasi dari model prediksi *machine learning*.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN Bab ini berisi rangkuman dari seluruh hasil penelitian yang menjawab tujuan dan perumusan masalah, serta menyajikan saran-saran untuk pengembangan sistem di masa mendatang.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

No	Penelitian	Ringkasan	Kelebihan & Kekurangan
1	Low-Cost Internet-of-Things Water-Quality Monitoring System for Rural Areas (Bogdan et al., 2023)	Mengembangkan prototipe sistem IoT berbiaya rendah untuk memantau kualitas air. Sistem menggunakan Arduino UNO dengan modul Bluetooth BT04 dan sensor pH, TDS, suhu, serta kekeruhan untuk mengukur kualitas beberapa sumber air. Data dibaca melalui aplikasi mobile dan dianalisis untuk menentukan kelayakan air; hasil pengujian menunjukkan sebagian besar sumber air layak minum, kecuali satu sumber dengan nilai TDS melebihi ambang 500 ppm.	<p>Kelebihan</p> <p>Sistem ini berbiaya murah namun mampu mengukur multi-parameter kualitas air penting (pH, TDS, suhu, kekeruhan) secara simultan. Pendekatan IoT yang diusulkan mudah diimplementasikan di daerah pedesaan karena memanfaatkan perangkat sederhana dengan biaya terjangkau.</p> <p>Kekurangan</p> <p>Jangkauan pemantauan terbatas (hanya jarak dekat) karena menggunakan koneksi Bluetooth, dan pembacaan data tidak berjalan kontinu (harus diinisiasi melalui aplikasi). Sistem juga bergantung pada keberadaan smartphone sebagai perantara uplink data ke cloud.</p>
2	Smartphone-based System for Water Quality Analysis (Srivastava et al., 2018)	Menawarkan sistem monitoring kualitas air berbasis smartphone dengan integrasi GPS untuk pemetaan lokasi sampel pada Google Maps. Sistem ini mengukur pH, TDS, dan suhu, kemudian menggunakan model kecerdasan buatan (ANN) untuk mengestimasi parameter lain seperti salinitas, konduktivitas, dan ORP dari data terbatas tersebut. Data hasil pengukuran dikirim ke basis	<p>Kelebihan</p> <p>Menyediakan konteks spasial terhadap data kualitas air. setiap pengukuran memiliki koordinat lokasi yang divisualisasikan dalam peta, memudahkan identifikasi sebaran kualitas air. Selain itu, sistem ini mampu memperkaya informasi dengan memprediksi parameter kualitas lain tanpa menambah sensor fisik (berkat penerapan model ANN),</p>

		data cloud (Firebase), dan notifikasi kualitas air disampaikan kepada pengguna melalui aplikasi (misalnya WhatsApp/SMS) secara real-time.	sehingga lebih komprehensif dalam menilai kondisi air. Kekurangan Prototipe dinilai kurang feasibel untuk skala luas karena biaya dan kompleksitas relatif tinggi. Kendala lainnya adalah ketergantungan pada koneksi internet dan smartphone; hal ini dapat menjadi hambatan di area yang minim infrastruktur atau jika pengguna tidak selalu memantau aplikasi.
3	Rancang Bangun Sistem Monitoring Kelayakan Air Minum Berbasis IoT Menggunakan Fuzzy Logic Tsukamoto (Qulub et al., 2023)	Penelitian ini membuat alat monitoring kualitas air minum menggunakan sensor pH, TDS, suhu (DS18B20), dan turbidity yang dikontrol oleh Arduino UNO dan ESP8266. Data dikirim ke web server dan dianalisis dengan metode Fuzzy Tsukamoto untuk menentukan tingkat kelayakan air.	Kelebihan Menggabungkan IoT dan logika fuzzy untuk menilai kelayakan air secara otomatis. Dan mengirim data ke web server untuk mengevaluasi Kekurangan Sistem hanya menampilkan data melalui web, belum memiliki integrasi aplikasi Android dan peta lokasi.
4	Real-Time Water Quality Assessment via IoT: Monitoring pH, TDS, Temperature, and Turbidity (Sugiharto et al., 2023)	Memperkenalkan kerangka kerja IoT berbasis cloud untuk evaluasi kualitas air secara real-time. Menggunakan sensor pH, suhu, TDS, dan kekeruhan untuk mengukur parameter utama kualitas air, dengan hasil data secara <i>live</i> dikirim ke platform cloud. Sistem diuji pada Sungai Troso, Indonesia, dan berhasil mengumpulkan ~4.833 data dalam 2 jam pemantauan. Hasil menunjukkan tingkat akurasi sensor yang tinggi (98–99% untuk pH, suhu, dll.) dan kemampuan sistem melakukan surveilans kualitas air terus-menerus.	Kelebihan Menerapkan integrasi IoT dan komputasi awan yang tangguh, mampu menampung data besar secara real-time. Akurasi pengukuran sangat tinggi Kekurangan Tidak menerapkan algoritme kecerdasan buatan apapun (tanpa logika fuzzy atau metode machine learning untuk klasifikasi otomatis, hanya menampilkan data mentah). Tidak menyertakan informasi lokasi geografis pada data (setiap pengukuran tidak di-tag GPS). Aspek portabilitas

			perangkat tidak dibahas (fokus pada arsitektur IoT dan analisis data).
5	Alat Monitoring Kualitas Air Minum Menggunakan Sensor TDS Berbasis Internet of Things (Rauhillah, 2024)	Membuat alat monitoring kualitas air minum isi ulang dengan satu parameter (Total Dissolved Solids/TDS). NodeMCU ESP8266 digunakan sebagai mikrokontroler yang mengirim data sensor TDS ke database cloud Firebase, kemudian data tersebut diteruskan ke aplikasi Android secara real-time. Hasil pengujian pada lima sampel air menunjukkan semua bacaan TDS < 300 ppm, menandakan kualitas air sangat baik (sesuai ambang baku mutu).	<p>Kelebihan</p> <p>Implementasi Firebase Cloud memungkinkan penyimpanan data online dan pemantauan melalui smartphone secara langsung. Desain sistem sederhana dan berbiaya rendah, cukup dengan sensor TDS dan NodeMCU; cocok untuk depot air minum skala kecil. Memberikan informasi kualitas air secara cepat kepada pengguna (notifikasi apabila TDS melebihi ambang batas).</p> <p>Kekurangan</p> <p>Parameter kualitas yang dipantau sangat terbatas. Tidak ada mekanisme klasifikasi cerdas (penilaian “baik” didasarkan langsung pada ambang TDS statis 300 ppm). Tidak dilengkapi fitur GPS maupun penyimpanan local. Sistem sepenuhnya bergantung pada koneksi internet untuk fungsionalitasnya.</p>

Pemantauan kualitas air minum berbasis IoT umumnya menggunakan sensor pH, TDS, suhu, dan kekeruhan (turbidity) untuk menilai kelayakan air. Beberapa penelitian, seperti Qulub et al. (2023), Bogdan et al. (2023), dan Sugiharto et al. (2023), telah merancang sistem dengan kombinasi sensor tersebut guna memantau kualitas air secara real-time. Data yang diperoleh kemudian dikirim ke aplikasi, misalnya melalui Bluetooth, sehingga aspek penting seperti keasaman, kandungan padatan, suhu, dan kejernihan air dapat dipantau sesuai standar air minum aman.

Sistem IoT umumnya mengirim data ke server atau cloud sehingga kondisi air dapat dipantau dari jarak jauh. Sugiharto et al. (2023) mengintegrasikan sensor pH, suhu, TDS, dan kekeruhan dengan platform cloud untuk memantau kualitas air sungai secara live dengan akurasi tinggi. Pasika & Gandla (2020) menggunakan ThinkSpeak untuk menyimpan dan menampilkan data kualitas air melalui dashboard web real-time. Dengan demikian kombinasi IoT dan dukungan cloud membuat data tersimpan terpusat, mudah diakses, dan dapat dimanfaatkan lebih lanjut.

Untuk meningkatkan akurasi penilaian kualitas air, beberapa penelitian menggunakan logika fuzzy sebagai metode klasifikasi. Qulub et al. (2023) merancang alat monitoring dengan fuzzy Tsukamoto untuk menentukan kelayakan air minum, dengan tingkat error hanya 4%. Sementara itu, Ramadhan et al. (2020) mengembangkan sistem pakar berbasis IoT dengan fuzzy inference system yang mampu mengklasifikasikan kualitas air menjadi “baik”, “sedang”, atau “buruk” sesuai standar higienis. Pendekatan ini membuat sistem tidak sekadar menampilkan data mentah, tetapi juga memberi interpretasi kelayakan air secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan sistem Ramadhan dkk mencapai akurasi penuh (100%), membuktikan bahwa logika fuzzy efektif sebagai decision support dalam penentuan kualitas air, menggantikan prosedur manual yang rawan kesalahan atau keterlambatan.

Selain memantau parameter secara temporal, beberapa penelitian juga menggabungkan data kualitas air dengan informasi lokasi untuk pemetaan spasial. Bandara et al. (2025) melaporkan bahwa banyak sistem IoT kualitas air menggunakan modul GPS/GNSS (misalnya u-blox Neo-6M) agar setiap data sensor memiliki koordinat lokasi. Dengan cara ini, data kualitas air dapat ditautkan ke titik tertentu dan dipetakan secara real-time melalui server cloud. Misalnya, data dikumpulkan secara berkala, disimpan di SD card, lalu dikirim lewat jaringan seluler lengkap dengan koordinat. Strategi ini memungkinkan pengguna melihat peta sebaran kualitas air dan mengidentifikasi area tercemar dengan cepat. Srivastava et al. (2018) bahkan memanfaatkan GPS dari smartphone pengguna yang terhubung ke cloud Firebase.

Berdasarkan telaah pustaka, belum ada penelitian yang menggabungkan seluruh aspek utama dalam satu sistem terpadu. Beberapa studi hanya menyoroti penggunaan sensor dan IoT tanpa analisis cerdas, ada yang memakai fuzzy logic tanpa data spasial, atau menambahkan GPS tanpa evaluasi otomatis kualitas air. Hingga kini belum tersedia sistem portabel yang memadukan sensor multi-parameter (pH, TDS, suhu, kekeruhan), klasifikasi kelayakan air dengan logika fuzzy, koneksi IoT berbasis ESP32 ke cloud, serta pencatatan GPS untuk pemetaan. Inovasi skripsi ini adalah merancang sistem komprehensif pertama yang mengintegrasikan semua fitur tersebut: perangkat IoT portabel dengan fuzzy logic, peta lokasi hasil uji, dan koneksi cloud (dengan opsi backup lokal) guna mendukung monitoring kualitas air secara real-time dan berkelanjutan.

2.2 ESP32

ESP32 merupakan sebuah *System-on-a-Chip* (SoC) yang terintegrasi penuh. Fitur yang paling membedakannya dari mikrokontroler tradisional seperti ATmega328P pada Arduino Uno adalah integrasi konektivitas nirkabel.

arsitektur inti ESP32 didasarkan pada CPU *dual-core* Tensilica Xtensa LX6 32-bit. Adanya dua inti prosesor memungkinkan fleksibilitas desain yang tinggi, di mana satu inti dapat didedikasikan untuk menangani tumpukan protokol nirkabel, sementara inti lainnya fokus menjalankan logika aplikasi utama (Espressif Systems, 2023). Fitur konektivitasnya mencakup Wi-Fi (802.11 b/g/n), Bluetooth Classic *Bluetooth Classic* (BR/EDR) dan *Bluetooth Low Energy* (BLE). BLE sangat penting untuk aplikasi yang membutuhkan komunikasi jarak dekat dengan konsumsi daya sangat rendah, seperti pada perangkat *wearable* atau *beacon* (Al-Masri, 2021).

Selain konektivitas, ESP32 dilengkapi dengan serangkaian periferai yang kaya, termasuk ADC (Analog-to-Digital Converters) presisi tinggi, DAC (Digital-to-Analog Converters), sensor sentuh kapasitif, sensor efek Hall, dan berbagai antarmuka komunikasi standar (SPI, I2C, UART) (Al-Masri, 2021). Fitur penting lainnya adalah mode *deep-sleep* yang canggih, yang memungkinkan konsumsi daya sangat rendah saat perangkat tidak aktif, menjadikannya ideal untuk aplikasi IoT bertenaga baterai (Espressif Systems, 2023).

2.3 Sensor PH

Potential of Hydrogen (pH) adalah parameter yang digunakan untuk menyatakan tingkat keasaman atau kebasaan suatu larutan. Skala pH berkisar dari 0 hingga 14, di mana nilai 7 dianggap netral, kurang dari 7 bersifat asam, dan lebih dari 7 bersifat basa (Neliti, 2014). Sensor pH elektronik terdiri dari elektroda gelas dan elektroda referensi yang mengukur perbedaan tegangan yang berbanding lurus dengan konsentrasi ion hidrogen dalam air. Keluaran sensor berupa tegangan analog kemudian dikonversi ke nilai pH (skala 0–14) oleh mikrokontroler. Kalibrasi rutin diperlukan menggunakan larutan buffer standar (pH 4, 7, 10) agar sensor tetap akurat. Nilai pH air minum di luar rentang ideal (misal terlalu asam <6,5 atau terlalu basa >8,5) dapat mengindikasikan kontaminasi atau proses pengolahan yang kurang tepat, sehingga parameter ini krusial dalam penentuan kelayakan air.

2.4 Sensor TDS

Total Dissolved Solids (TDS) menyatakan jumlah padatan terlarut dalam air (mineral, garam, ion organik) dalam satuan ppm (mg/L). Semakin tinggi TDS, air mengandung lebih banyak zat terlarut yang dapat mempengaruhi rasa dan kesehatan. Standar air minum menghendaki TDS tidak lebih dari 500 ppm.

Sensor TDS umumnya bekerja dengan prinsip pengukuran konduktivitas listrik: dua elektroda dicelupkan ke air dan arus listrik dialirkan. Konduktivitas listrik berbanding lurus dengan konsentrasi ion terlarut – mikrokontroler akan mengkonversi nilai konduktivitas menjadi estimasi TDS. Sensor TDS perlu dikalibrasi dengan larutan referensi (misal NaCl) untuk akurasi. Pada sistem IoT, sensor TDS sering dipadukan dengan sensor lain untuk memberikan gambaran kualitas air secara keseluruhan; TDS tinggi dapat menandakan air sadah atau tercemar mineral berlebih, yang jika melampaui ambang dapat membuat air *tidak layak* diminum.

2.5 Sensor Turbidity

Kekeruhan air (turbidity) mengindikasikan tingkat kejernihan air, dipengaruhi oleh partikel tersuspensi seperti lumpur, sedimen, atau mikroorganisme. Satuan kekeruhan biasanya dinyatakan dalam NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Air minum yang baik seharusnya jernih dengan turbidity sangat rendah; standar WHO menetapkan turbidity <5 NTU, dan sebaiknya <1 NTU untuk estetika dan keamanan mikrobiologis.

Sensor turbidity bekerja dengan prinsip optik: sebuah sumber cahaya (LED inframerah) dipancarkan melalui sampel air, kemudian intensitas cahaya yang tersebar atau terhambur akibat partikel diukur oleh fotodetektor. Semakin keruh air, semakin banyak cahaya yang tersebar dan terdeteksi, yang dikonversi menjadi nilai NTU oleh sistem. Sensor kekeruhan perlu *baseline* kalibrasi (misal menggunakan larutan formazin standar). Dalam konteks IoT, sensor turbidity dihubungkan ke mikrokontroler untuk memberikan peringatan saat turbidity melebihi ambang (air mulai tampak keruh). Kekeruhan berlebih (>5 NTU) menandakan air sangat keruh dan kemungkinan mengandung kontaminan yang membuatnya tidak aman dikonsumsi.

2.6 Sensor Suhu

Suhu air merupakan parameter fisik yang turut mempengaruhi kualitas dan cita rasa air minum, meskipun tidak secara langsung menentukan kelayakan kesehatan selama tidak ekstrem. Namun, suhu dapat mempengaruhi aktivitas mikroba dan laju reaksi kimia dalam air.

Sensor suhu digital yang populer untuk aplikasi IoT adalah DS18B20. DS18B20 adalah sensor suhu digital berkomunikasi melalui protokol *1-Wire*, memungkinkan banyak sensor dihubungkan pada satu pin data. Keunggulan DS18B20 yaitu: rentang pengukuran luas (-55°C hingga $+125^{\circ}\text{C}$), akurasi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pada -10°C s/d $+85^{\circ}\text{C}$, serta resolusi hingga 12-bit ($0,0625^{\circ}\text{C}$) [forums.raspberrypi.com](https://forums.raspberrypi.com/viewtopic.php?p=71111) [guicor.com](https://www.guicor.com). Sensor ini berbentuk kecil dan sering sudah terenkapsulasi tahan air sehingga cocok untuk dicelup ke dalam sampel air. Pada sistem monitoring, suhu air minum biasanya dijaga pada suhu ruang (sekitar 25°C) untuk kenyamanan; standar kualitas mencatat kisaran $22\text{--}28^{\circ}\text{C}$ sebagai suhu air minum ideal. DS18B20 mengirim data suhu secara digital sehingga memperkecil noise dan kesalahan pembacaan. Mikrokontroler ESP32/Arduino dapat dengan mudah membaca data DS18B20 menggunakan library yang tersedia, lalu mengirimkan informasi suhu ini ke cloud bersama parameter lainnya.

2.7 Modul GPS dan Pemetaan Spasial

Proyek sistem IoT portabel ini mencakup fungsi pemetaan spasial, yang berarti setiap pengukuran kualitas air akan diberi informasi lokasi geografis. Untuk itu, digunakan modul GPS/GNSS (Global Positioning System / Global Navigation Satellite System) guna memperoleh koordinat lintang dan bujur dari titik pengukuran.

GPS adalah sistem navigasi satelit global milik AS, sementara GNSS mencakup GPS dan sistem satelit lain (seperti GLONASS Rusia, Galileo Eropa, BeiDou China) untuk meningkatkan akurasi dan jangkauan. Modul GPS umum seperti *Neo-6M*, *Ublox series*, atau modul GNSS modern dapat dihubungkan ke ESP32 via UART. Modul ini akan menerima sinyal satelit dan menghitung posisi dengan akurasi tipikal $\sim 2\text{--}5$ meter di area terbuka. Data lokasi biasanya diberikan dalam format NMEA (National Marine Electronics Association) yang berisi info koordinat, waktu UTC, ketinggian, dll. Mikrokontroler kemudian dapat mengurai data tersebut untuk mendapatkan latitude dan longitude. Integrasi lokasi ini penting untuk membuat peta kualitas air: setiap sampel air (berserta nilai pH, TDS, dsb.) akan ditandai pada koordinat di peta (misal menggunakan Google Maps API di aplikasi Android).

Teknologi lokasi spasial juga memungkinkan analisis sebaran kualitas air di wilayah tertentu dan membantu mengidentifikasi area rawan air tidak layak. Selain GPS, metode *Location Based Service (LBS)* melalui jaringan seluler bisa menjadi pelengkap saat sinyal GPS lemah (misal di dalam ruangan), meski akurasi lebih rendah. Dalam implementasi, modul GPS perlu diinisialisasi dan diberi waktu *warm-up* untuk *fix* satelit. Data koordinat dari modul akan dikirim bersama data sensor ke Firebase, sehingga aplikasi dapat menampilkan posisi pengukuran terkini. Dengan demikian, pengguna dapat melihat dashboard peta dengan penanda lokasi beserta informasi kualitas air masing-masing titik secara real-time. Penerapan modul GPS dalam sistem ini sejalan dengan tren IoT geospasial, di mana sensor IoT diperluas fungsinya untuk pengambilan data lingkungan berbasis lokasi (*environmental mapping*).

2.8 Logika Fuzzy

Logika fuzzy adalah pendekatan kecerdasan buatan yang meniru cara pikir manusia dalam menangani data yang tidak pasti dan *gradual*. Berbeda dengan logika biner (0/1) yang kaku, fuzzy logic memperkenankan derajat keanggotaan (*degree of truth*) antara 0 hingga 1, sehingga suatu nilai dapat sebagian termasuk dalam kategori tertentu.

Dengan logika fuzzy, kita dapat merepresentasikan konsep seperti “air agak asam” atau “kualitas cukup baik” secara kuantitatif. Sistem inferensi fuzzy secara umum terdiri dari: *fuzzifikasi* (mengonversi input tegas menjadi derajat keanggotaan dalam himpunan fuzzy), *inferensi fuzzy* (aturan IF-THEN fuzzy yang memetakan input ke kesimpulan), dan *defuzzifikasi* (mengonversi hasil inferensi berupa himpunan fuzzy output menjadi nilai tegas). Terdapat beberapa metode inferensi fuzzy, antara lain Mamdani, Sugeno, dan Tsukamoto. Namun di penelitian ini digunakan logika fuzzy tsukamoto.

Metode Tsukamoto (Yosh fuzzy Tsukamoto, 1979) memiliki ciri khas bahwa setiap aturan fuzzy diharuskan memiliki himpunan keanggotaan output yang monoton (semakin x, semakin y secara tunggal). Akibatnya, setiap aturan akan menghasilkan output tegas (crisp) tersendiri melalui *fuzzy implication*. Output tegas dari masing-masing aturan kemudian digabung (rata-rata tertimbang) untuk memperoleh output akhir. Singkatnya, Tsukamoto menghasilkan nilai tegas untuk tiap IF-THEN secara langsung berdasarkan derajat *firing*-nya. Pendekatan ini menjamin hasil yang relatif halus dan teratur, terutama untuk sistem dengan aturan yang dirancang monotonik. Dalam implementasi, metode Tsukamoto sering digunakan untuk sistem dengan keluaran kategorikal yang ingin diindikasikan secara numerik. Pada kasus penentuan kelayakan air minum, misalnya, kita bisa tetapkan aturan: “IF pH & TDS & turbidity dalam kisaran baik THEN *kelayakan*= 0.8 (80%)” dan seterusnya, sehingga setiap aturan mengeluarkan angka kepastian.

Metode Tsukamoto dipilih karena penelitian membutuhkan keluaran kategori kelayakan (misal “Layak” atau “Tidak Layak” atau tingkat layak) secara real-time dan dijalankan pada perangkat tertanam (ESP32). Dengan Tsukamoto, setiap aturan fuzzy akan langsung memberikan skor kelayakan crisp yang kemudian dirata tertimbang menjadi hasil akhir, sehingga logika dapat ditanam di mikrokontroler dengan perhitungan relatif ringan. Pendekatan ini juga memudahkan kalibrasi aturan: misal jika output akhirnya >0.5 bisa diartikan “Layak” dan sebaliknya, atau bisa diinterpretasi sebagai persentase kelayakan. Meski demikian, perancangan aturan fuzzy harus cermat agar memenuhi sifat monoton (syarat Tsukamoto) dan mencakup berbagai skenario kualitas air. Dengan dukungan

penelitian terdahulu dan fleksibilitas fuzzy, diharapkan metode fuzzy yang dipilih mampu meningkatkan akurasi dan keandalan sistem dalam memutuskan kelayakan air minum, dibanding pendekatan sederhana berbasis ambang.

2.9 Firebase (Penyimpanan Data Cloud dan Sinkronisasi Offline-Online)

Firestore adalah platform *Backend-as-a-Service* milik Google yang menyediakan database *real-time* dan berbagai layanan cloud lain untuk aplikasi. Dalam sistem IoT kualitas air, Firestore dapat dimanfaatkan sebagai penyimpanan data sensor di cloud yang terstruktur dan mudah diakses aplikasi mobile. Dua produk Firestore yang umum dipakai yaitu Realtime Database dan Cloud Firestore – keduanya NoSQL database yang mampu menyinkronkan data ke klien secara *real-time*. Kelebihan utama Firestore bagi aplikasi monitoring adalah kemampuan sinkronisasi lintas perangkat secara langsung serta dukungan offline. Data yang dikirim ESP32 ke Firestore akan tersimpan di cloud dan dapat dibaca *real-time* oleh aplikasi Android. Firestore Realtime Database, misalnya, menjamin bahwa setiap perubahan data pada database akan langsung di-*push* ke semua klien yang terhubung seketika itu juga, dan data tetap tersedia meskipun aplikasi offline.

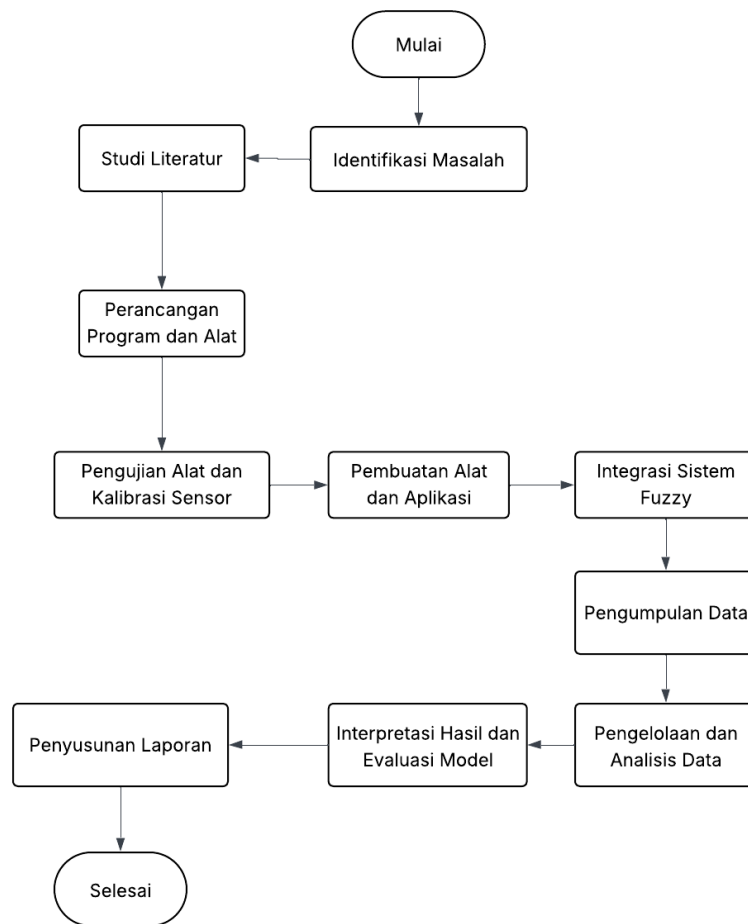
Mekanisme *caching* lokal memungkinkan aplikasi Android pengguna tetap dapat melihat data terakhir atau menyimpan input sementara saat koneksi terputus, lalu secara otomatis mensinkronkan kembali saat jaringan pulih.

Dalam proyek ini, Firestore berperan penting untuk memastikan data hasil pengukuran (pH, TDS, dsb.) tersimpan aman di cloud dan dapat diakses dimanapun dan kapanpun. Selain itu, Firestore mendukung fitur notifikasi (Firestore Cloud Messaging) yang bisa dikembangkan untuk alarm jika kualitas air tidak layak, serta integrasi mudah dengan Google Maps atau layanan analitik bila diperlukan. Secara keseluruhan, penggunaan Firestore memungkinkan arsitektur sistem yang handal: data IoT dari perangkat portabel disimpan terpusat, disinkronkan secara real-time ke aplikasi, dan tetap tersedia offline, memenuhi skenario lapangan dimana jaringan bisa tidak stabil.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Dalam melaksanakan penelitian tersebut, penulis menyusun tahapantahapan yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian. Tahapan penelitian yang disusun dalam penelitian tersebut dapat dilihat dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3.1.



Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D), yaitu pendekatan yang bertujuan mengembangkan produk atau teknologi baru sekaligus menguji efektivitas serta efisiensinya [37]. Dalam konteks penelitian ini, metode R&D diterapkan untuk merancang, membangun, menguji, dan mengevaluasi sistem monitoring kualitas air berbasis IoT dengan parameter pH, TDS, suhu, dan turbidity. Selain itu, sistem dilengkapi logika fuzzy untuk meningkatkan akurasi klasifikasi kualitas air, serta pemetaan spasial guna mengetahui lokasi sumber air yang dipantau.

3.2 Perancangan Alat