

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 seringkali sulit diakses secara *real-time* dan bersifat statis. Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun sebuah sistem cerdas portabel berbasis *Internet of Things* (IoT) yang mampu melakukan pemetaan spasial dan menentukan kualitas air minum secara akurat. Metode yang digunakan adalah rancang bangun, di mana sistem dikembangkan melalui tiga komponen utama: perangkat keras portabel, platform *backend* dan *frontend*, serta logika fuzzy. 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 firebase* untuk disimpan dan diolah. Hasil monitoring divisualisasikan pada sebuah aplikasi interaktif yang menampilkan peta spasial dengan penanda kualitas air. ntuk 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 potable drinking water, especially from natural springs, is a fundamental need for communities. However, information about water quality in various locations is often difficult to access in real time and is static in nature. This study aims to design and build a portable Internet of Things (IoT)-based smart system capable of spatial mapping and accurately determining drinking water quality. The method used is design and development, where the system is developed through three main components: portable hardware, backend and frontend platforms, and fuzzy logic. 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 Firebase 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 suitability, a fuzzy logic method is applied to process physical-chemical parameters into linguistic categories such as Suitable, Needs Treatment, and Unsuitable. Testing was conducted to assess sensor accuracy, data transmission reliability, and the validity of fuzzy classification against applicable water quality standards. The results of this study are in the form of an integrated portable system prototype that not only presents water quality data but also provides direct interpretation of drinking water suitability based on location. This system is expected to be a practical and informative solution for the community to access water quality information quickly, cheaply, and easily.

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. [farmanullah jan] 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. [Siti Nadhirah Zainurin]

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. [h.m. forhad] 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. [farmanullah jan] 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. [bandara et al]

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. 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. [Vesna Antoska Knights] [Raman]

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 sistem IoT portabel yang mampu menentukan kelayakan air serta menyajikan data spasial secara *real-time*?
2. Bagaimana mengevaluasi kinerja sistem terintegrasi tersebut?

1.3 Tujuan Penelitian

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

1. Merancang dan membangun prototipe sistem IoT portabel terintegrasi yang menggabungkan perangkat keras (sensor dan GPS), platform pemetaan spasial *real-time*, dan metode klasifikasi logika fuzzy.
2. Menguji dan mengevaluasi kinerja sistem secara keseluruhan sebagai alat bantu penentu kualitas 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 klasifikasi fuzzy logic.

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	<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</p>

		<p>ORP dari data terbatas tersebut. Data hasil pengukuran dikirim ke basis data cloud (Firebase), dan notifikasi kualitas air disampaikan kepada pengguna melalui aplikasi (misalnya WhatsApp/SMS) secara real-time.</p>	<p>sensor fisik (berkat penerapan model ANN), sehingga lebih komprehensif dalam menilai kondisi air.</p> <p>Kekurangan</p> <p>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.</p>
3	<p>Alat Monitoring Kualitas Air Minum Menggunakan Sensor TDS Berbasis Internet of Things (Rauhillah, 2024)</p>	<p>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>	<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>

4	<p>Pengendalian Kualitas Air Minum Menggunakan Fuzzy Mamdani Berbasis Internet of Things (Elriyan et al, 2025)</p>	<p>Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan dan pengendalian kualitas air minum berbasis IoT menggunakan metode Fuzzy Mamdani. Sistem memanfaatkan empat parameter utama, yaitu suhu, pH, TDS, dan kekeruhan, untuk menentukan kelayakan air minum melalui 36 aturan fuzzy dan defuzzifikasi Center of Area (COA). Implementasi dilakukan menggunakan ESP32 dan terintegrasi dengan aplikasi berbasis Firebase. Hasil pengujian menunjukkan sistem memiliki akurasi 90% dan error 10%, sehingga dinilai layak sebagai sistem pendukung keputusan kualitas air minum</p>	<p>Kelebihan</p> <p>Sistem ini mampu memantau dan mengendalikan kualitas air minum secara real-time berbasis IoT dengan metode Fuzzy Mamdani yang fleksibel terhadap ketidakpastian data sensor. Penggunaan empat parameter utama (suhu, pH, TDS, dan kekeruhan) serta aktuator otomatis membuat sistem aplikatif dan informatif, dengan hasil pengujian menunjukkan akurasi 90%, sehingga layak digunakan sebagai sistem pendukung keputusan.</p> <p>Kekurangan</p> <p>Sistem masih memiliki keterbatasan pada jumlah variabel kualitas air, aturan fuzzy yang bersifat statis, serta jumlah data pengujian yang relatif sedikit, sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi air yang beragam. Selain itu, kinerja sistem bergantung pada koneksi internet dan belum mempertimbangkan aspek efisiensi energi untuk penggunaan jangka panjang di lapangan.</p>
5	<p>Real-Time Water Quality Assessment via IoT: Monitoring pH, TDS, Temperature, and Turbidity (Sugiharto et al., 2023)</p>	<p>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</p>	<p>Kelebihan</p> <p>Menerapkan integrasi IoT dan <i>cloud-computing</i> yang tangguh, mampu menampung data besar secara real-time. Akurasi pengukuran sangat tinggi</p> <p>Kekurangan</p>

		<p>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.</p>	<p>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).</p>
6	<p>Rancang Bangun Sistem Pakar Pemantau Kualitas Air Berbasis IoT Menggunakan Fuzzy Classifier</p>	<p>Artikel ini membahas perancangan sistem pakar pemantau kualitas air berbasis IoT menggunakan fuzzy classifier. Parameter yang digunakan adalah pH, TDS, dan kekeruhan, yang diproses oleh Arduino Mega 2560 untuk mengklasifikasikan kualitas air menjadi baik, biasa, dan buruk. Hasil pemantauan dikirim dan ditampilkan secara daring melalui ThingSpeak. Pengujian pada berbagai sampel air menunjukkan sistem bekerja akurat dengan tingkat keberhasilan 100% dan rata-rata waktu transmisi 3,5 detik, sehingga sistem efektif untuk pemantauan kualitas air secara real time</p>	<p>Kelebihan</p> <p>Penelitian ini memiliki keunggulan pada penerapan IoT berbasis sistem pakar fuzzy classifier yang mampu memantau dan mengklasifikasikan kualitas air secara real time serta mudah diakses melalui ThingSpeak. Integrasi sensor, Arduino Mega 2560, dan modul WiFi ESP8266 berjalan dengan baik, menghasilkan akurasi klasifikasi 100% dan waktu transmisi yang relatif cepat, sehingga sistem efektif dan aplikatif bagi pengguna non-ahli.</p> <p>Kekurangan</p> <p>Keterbatasan penelitian ini terletak pada parameter kualitas air yang masih terbatas (hanya pH, TDS, dan kekeruhan), aturan fuzzy yang statis dan tidak adaptif, serta pengujian yang masih berskala kecil. Selain itu, sistem sangat bergantung pada koneksi internet dan belum dilengkapi fitur analisis lanjutan atau prediksi kualitas air di masa mendatang.</p>

7	Smart water quality monitoring system with cost-effective using IoT (Pasika & Gandla, 2020)	<p>Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan kualitas air berbasis IoT yang bersifat murah dan efisien untuk memantau air minum secara real time. Sistem menggunakan Arduino Mega dan NodeMCU (ESP8266) yang terhubung dengan beberapa sensor, yaitu pH, turbidity, level air (ultrasonik), suhu, dan kelembapan (DHT11). Data hasil pengukuran dikirim ke cloud ThingSpeak dan dapat diakses melalui web maupun aplikasi mobile. Hasil pengujian pada air suplai kota dan air tanah menunjukkan sistem mampu memantau perubahan parameter kualitas air secara kontinu dan stabil, sehingga layak digunakan untuk pemantauan kualitas air dengan biaya rendah</p>	<p>Kelebihan</p> <p>Penelitian ini unggul karena menawarkan solusi pemantauan kualitas air yang murah, sederhana, dan mudah diimplementasikan. Sistem mendukung pemantauan real time, memiliki akses jarak jauh melalui ThingSpeak dan aplikasi mobile, serta menggunakan komponen yang umum dan mudah diperoleh. Selain itu, parameter yang diukur cukup beragam, mencakup kondisi air dan lingkungan sekitar, sehingga sistem bersifat praktis untuk penggunaan lapangan.</p> <p>Kekurangan</p> <p>Keterbatasan penelitian ini adalah belum adanya metode klasifikasi atau pengambilan keputusan otomatis untuk menentukan kualitas air (misalnya layak atau tidak layak), karena sistem hanya menampilkan data sensor mentah. Parameter kimia penting seperti TDS, BOD, COD, atau dissolved oxygen belum diukur, sehingga informasi kualitas air masih terbatas. Selain itu, akurasi sensor murah dan ketergantungan pada koneksi internet dapat mempengaruhi keandalan sistem dalam kondisi lapangan tertentu.</p>
8	The Integration of IoT (Internet of Things) Sensors and Location-Based	<p>Jurnal ini merupakan <i>systematic literature review</i> (SLR) yang mengkaji integrasi Internet of Things (IoT) dan <i>Location-Based Services</i> (LBS) untuk pemantauan kualitas air</p>	<p>Kelebihan</p> <p>Kelebihan utama jurnal ini adalah pendekatannya yang komprehensif dan sistematis, sehingga memberikan gambaran menyeluruh tentang</p>

	Services for Water Quality Monitoring: A Systematic Literature Review	secara real time. Dengan metode PRISMA, penulis menyeleksi dan menganalisis 16 studi utama dari database Scopus dan Web of Science yang terbit antara 2020–2024. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi IoT dan LBS mampu meningkatkan akurasi spasial dan temporal, memungkinkan pemantauan kualitas air yang berkelanjutan di berbagai lingkungan (sungai, danau, pesisir, hingga sistem air perkotaan). Namun, penelitian juga menemukan adanya kesenjangan riset, terutama pada evaluasi akurasi GNSS/LBS dan standar integrasi sistem secara menyeluruh.	<p>tren, teknologi, dan tantangan integrasi IoT–LBS dalam pemantauan kualitas air. Jurnal ini menyoroti peningkatan real-time monitoring, pemetaan spasial yang presisi, pengambilan keputusan berbasis data, serta potensi citizen science. Selain itu, pembahasan mencakup berbagai teknologi GNSS, sensor, dan platform pemantauan, sehingga sangat kuat sebagai rujukan teoretis dan state-of-the-art di bidang water quality monitoring berbasis IoT.</p> <p>Kekurangan</p> <p>Keterbatasan jurnal ini adalah sifatnya yang tidak melakukan implementasi atau eksperimen langsung, sehingga hasilnya bergantung pada kualitas dan ruang lingkup studi yang direview. Selain itu, sebagian besar penelitian yang dianalisis belum mengevaluasi secara mendalam akurasi dan reliabilitas LBS/GNSS, terutama terkait latensi, error posisi, dan pengaruh lingkungan. Jurnal ini juga hanya menggunakan dua basis data utama (Scopus dan WoS), sehingga ada kemungkinan studi relevan lainnya tidak tercakup</p>
--	-----------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Pemantauan kualitas air minum berbasis IoT umumnya menggunakan sensor pH, TDS, suhu, dan kekeruhan (turbidity) untuk menilai kelayakan air. Beberapa penelitian, seperti Bogdan et al. (2023), Elriyan et al. (2025), 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. Elriyan et al. (2025) mengembangkan sistem pemantauan dan pengendalian kualitas air minum berbasis IoT menggunakan metode Fuzzy Mamdani dengan hasil pengujian menunjukkan sistem memiliki akurasi 90% dan error 10%. 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 Kualitas Air Minum

Dalam bagian ini akan dibahas esensi dari objek yang diteliti, yaitu air dan kelayakannya.

2.2.1 Definisi Kualitas Air

Kualitas air merujuk pada sifat dan kandungan makhluk hidup, zat, atau energi di dalam air. Pemantauan kualitas air sangat penting untuk memastikan air aman untuk dikonsumsi dan tidak menimbulkan risiko kesehatan. Air minum yang layak harus jernih (tidak keruh), tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak berasa, serta bebas dari kontaminan berbahaya (Bagas et al).

2.2.2 Standar Baku Mutu Air Minum

Untuk menentukan kelayakan, data sensor akan dibandingkan dengan standar yang berlaku. Standar ini menetapkan batas maksimum untuk parameter fisik, kimia, dan biologis. Landasan teori untuk standar ini dapat diambil dari:

2.2.2.1 WHO (World Health Organization)

WHO (World Health Organization) menetapkan guidelines atau pedoman global untuk kualitas air minum yang aman. Pedoman WHO bersifat rekomendasi ilmiah, bukan hukum, namun sering dijadikan acuan oleh negara-negara dalam menetapkan standar nasional. WHO fokus pada parameter kesehatan (misal kandungan kontaminan kimia, mikrobiologi) serta aspek estetika (rasa, bau, kekeruhan, dsb) agar air layak dikonsumsi (who).

2.2.2.2 Peraturan Pemerintah (PP)

Peraturan Pemerintah (PP) di Indonesia menetapkan baku mutu air secara legal dan mengikat. Contohnya, PP No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air mengklasifikasikan mutu air sungai/danau dalam kelas I s.d. IV sesuai peruntukannya. Kelas I adalah kualitas tertinggi (bisa menjadi sumber air minum) dengan ambang parameter tertentu. PP ini bukan khusus air minum hasil olahan, melainkan kualitas air lingkungan. Sebagai contoh, untuk air kelas I (bahan baku air minum) PP 82/2001 menetapkan: pH 6–9, suhu deviasi maks 3°C dari kondisi alami, TDS (residu terlarut) maks 1000 mg/L, dan padatan tersuspensi maks 50 mg/L. Baku mutu pemerintah ini memastikan sumber air tidak tercemar berlebihan sebelum diolah menjadi air minum.

2.2.2.3 Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes)

Peraturan Menteri Kesehatan (Permenkes) menetapkan standar kualitas air minum yang wajib dipenuhi oleh penyedia air minum di Indonesia. Permenkes mengadopsi rekomendasi WHO dengan menyesuaikan kondisi nasional. Permenkes No. 492/MENKES/PER/IV/2010 (tentang Persyaratan Kualitas Air Minum) adalah acuan utama yang mengatur parameter fisik, kimia, dan mikrobiologis air minum di Indonesia. Permenkes ini (yang mulai berlaku 2010) menggantikan Kepmenkes 907/2002 dan mewajibkan operator air minum (PDAM, depot isi ulang, dsb.) memenuhi ambang batas yang ditetapkan. Pada tahun 2023, Permenkes No. 2 Tahun 2023 diterbitkan sebagai penyempurnaan, menggantikan Permenkes 492/2010, dengan beberapa penyesuaian standar mengikuti perkembangan terbaru.

2.2.3 Parameter Kualitas Air

Penelitian ini berfokus pada parameter fisik-kimia utama yang dapat diukur oleh sensor IoT:

2.2.3.1 pH (Potential of Hydrogen)

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). WHO dan Permenkes mensyaratkan pH air minum berada di rentang 6,5-8,5 yang tercantum sebagai parameter kimiawi yang tidak langsung terkait kesehatan, namun penting untuk mencegah korosi pipa dan memastikan rasa yang wajar. Sementara PP No. 82 Tahun 2001 pH air diperbolehkan dalam rentang 6,5 – 9 karena air sumber alami kadang alkalis secara alami.

2.2.3.2 TDS (Total Dissolved Solids)

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. WHO menetapkan standar umum yaitu air yang pantas untuk dikonsumsi sebaiknya <600mg/L dan menghindari air dengan padatan sekitar 1000mg/L atau lebih. Permenkes 2010 menetapkan 500 mg/L yang berada di rentang baik tersebut. Tren terbaru Indonesia bahkan <300 mg/L (lebih ketat daripada rata-rata rekomendasi WHO), menunjukkan komitmen meningkatkan kualitas estetika. PP mengizinkan hingga 1000 mg/L untuk air baku, namun target akhir tetap mengikuti standar Kemenkes.

2.2.3.3 Kekeruhan (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, PP No. 82 Tahun 2001, dan perkemenkes menetapkan turbidity <5 NTU, dan sebaiknya <1 NTU untuk estetika dan keamanan mikrobiologis.

2.2.3.4 Suhu (Temperature)

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 memengaruhi aktivitas mikroba dan laju reaksi kimia dalam air.

WHO mengakui bahwa air dingin lebih palatable (enak diminum) dibanding air hangat, dan suhu tinggi dapat meningkatkan pertumbuhan mikroba serta masalah rasa/bau. WHO menyarankan penyedia air berupaya menjaga suhu air serendah mungkin secara wajar, misal di sekitar suhu lingkungan, untuk mencegah keluhan konsumen dan menghambat mikroba. Sementara itu di Indonesia Permenkes mewajibkan suhu air minum \approx suhu udara $\pm 3^\circ$, dan PP 82 membatasi perubahan suhu air lingkungan $\pm 3^\circ\text{C}$

2.3 Sistem Portabel

Bagian ini membahas komponen perangkat keras (hardware) yang dipilih untuk mewujudkan sistem yang ringkas, mudah dibawa, dan dapat beroperasi secara mandiri.

2.3.1 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 periferal 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,

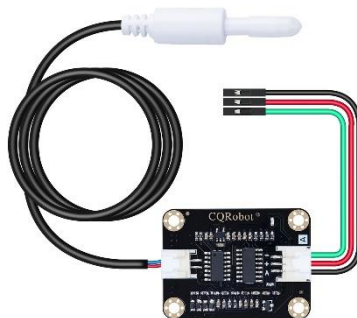
menjadikannya ideal untuk aplikasi IoT bertenaga baterai (Espressif Systems, 2023).

2.3.2 Sensor pH



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.

2.3.3 Sensor TDS



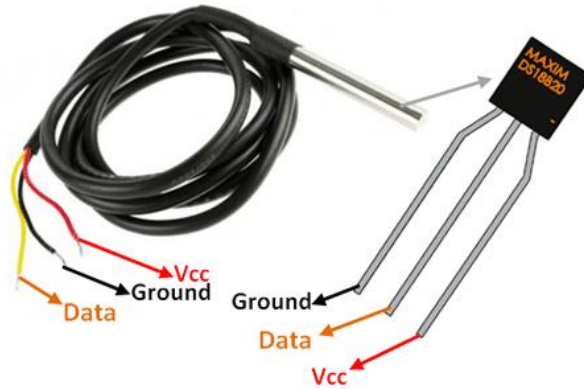
Sensor TDS umumnya bekerja dengan prinsip pengukuran konduktivitas listrik: dua elektroda dicelupkan ke air dan arus listrik dialirkan. Konduktivitas listrik berbanding lurus dengan konsentrasi ion terlarut. Mikrokontroler akan mengkonversi nilai konduktivitas menjadi estimasi TDS. Sensor TDS perlu dikalibrasi 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.

2.3.4 Sensor Turbidity



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.

2.3.5 Sensor Suhu



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 ($0,0625^{\circ}\text{C}$). 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.

2.4 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep di mana objek fisik yang dilengkapi dengan sensor, perangkat komputasi, dan kemampuan komunikasi dapat terhubung satu sama lain melalui jaringan internet. Dalam

konteks IoT, berbagai perangkat saling bertukar data tanpa interaksi manusia secara langsung, sehingga memungkinkan otomasi dan kontrol jarak jauh terhadap objek di dunia nyata. Penerapan IoT telah meluas di berbagai bidang, termasuk smart home, kesehatan, transportasi, hingga pemantauan lingkungan. Pada prinsipnya, IoT bertujuan memperluas manfaat konektivitas internet yang terus-menerus dengan menghubungkan mesin, peralatan, dan sensor sehingga dapat berkolaborasi dan bertindak berdasarkan informasi yang mereka kumpulkan secara mandiri (Yoyon Efendi).

Sebuah sistem IoT umumnya memiliki arsitektur berlapis yang mencakup tiga komponen utama, yaitu: Perangkat sensor/aktor (perception layer), Jaringan komunikasi (network layer), dan Server atau cloud untuk pengolahan data (application layer) (Yoyon Efendi). Pada lapisan pertama, sensor-sensor ditempatkan untuk mengumpulkan data dari lingkungan (misalnya sensor kualitas air membaca pH, TDS, suhu, kekeruhan). Data mentah dari sensor kemudian dikirim melalui lapisan jaringan komunikasi, yang dapat berupa koneksi nirkabel (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee) maupun jarak jauh seperti jaringan seluler (GSM/3G/4G) atau LPWAN (LoRa, Sigfox). Pilihan komunikasi disesuaikan dengan kebutuhan jangkauan dan konsumsi daya: Wi-Fi cocok untuk jarak dekat dengan bandwidth tinggi, sedangkan LoRaWAN atau jaringan seluler digunakan untuk pemantauan jarak jauh karena jangkauannya luas dan dapat rendah daya. Data yang dikirim melalui jaringan selanjutnya diterima di server atau platform cloud, di mana data tersebut disimpan, diolah, dan dianalisis secara terpusat. Pengguna akhir dapat mengakses informasi ini melalui aplikasi web atau mobile secara real-time. Dengan arsitektur semacam ini, IoT memungkinkan akses jarak jauh terhadap data dari mana saja dan kapan saja, selama terhubung internet.

Dalam konteks monitoring kualitas air berbasis IoT, konsep di atas terwujud sebagai berikut: sensor-sensor air dipasang pada perangkat monitoring (node IoT) di lapangan, lalu node ini (dengan mikrokontroler

seperti Arduino/ESP32) akan mengirimkan data sensor secara periodik melalui internet ke sebuah dashboard atau database cloud. Contohnya, sebuah perangkat IoT kualitas air dapat menggunakan ESP32 yang memiliki modul Wi-Fi terintegrasi untuk mengirim data pH, TDS, suhu, dan kekeruhan ke server secara nirkabel. Data tersebut kemudian divisualisasikan dalam bentuk grafik atau indikator status pada platform IoT (misal ThinkSpeak, MQTT dashboard, atau aplikasi custom) sehingga penanggung jawab dapat memantau kondisi air secara aktual. Arsitektur ini memberikan otomatisasi dan kontinuitas dalam pemantauan: berbeda dengan metode konvensional yang menuntut pengambilan sampel manual dan uji laboratorium, sistem IoT dapat melakukan pengukuran otomatis 24 jam dan mengirim alarm ketika terdeteksi anomaly.

Selain itu, integrasi IoT membuka peluang untuk analisis data yang lebih mendalam. Data historis kualitas air yang tersimpan di cloud dapat dianalisis untuk melihat tren, pola musiman, maupun prediksi kejadian pencemaran. Komunikasi dua arah pada IoT juga memungkinkan kendali jarak jauh, misalnya menyalakan pompa, katup, atau alat disinfeksi secara otomatis ketika kualitas air memburuk. Dengan kata lain, konsep IoT menyediakan kerangka kerja terpadu yang menghubungkan sensor kualitas air, infrastruktur jaringan, dan aplikasi pemantauan, sehingga pengelolaan kualitas air menjadi lebih efektif, efisien, dan responsif terhadap perubahan kondisi lingkungan.

2.5 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 akurasinya 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*).

2.6 Logika Fuzzy

Logika fuzzy merupakan pendekatan kecerdasan buatan yang mengadopsi pola penalaran manusia dalam mengelola ketidakpastian dan

data yang bersifat samar (gradual). Berbeda dengan logika biner konvensional yang bersifat tegas (0 atau 1), logika fuzzy mengakomodasi derajat keanggotaan (degree of truth) dalam rentang 0 hingga 1. Hal ini memungkinkan representasi kuantitatif terhadap konsep linguistik yang ambigu, seperti "suhu cukup panas" atau "kualitas air agak keruh".

Secara umum, arsitektur sistem inferensi *fuzzy* terdiri atas tiga tahapan krusial:

1. **Fuzzifikasi:** Tahap transformasi nilai masukan tegas (*crisp input*) menjadi nilai derajat keanggotaan *fuzzy*. Nilai ini merepresentasikan tingkat kedekatan input terhadap himpunan linguistik tertentu dalam interval $[0, 1]$ (visualisasi dapat dilihat pada Gambar X).
2. **Evaluasi Aturan (Inference):** Hubungan antara variabel input dan output dipetakan melalui basis aturan *IF-THEN*. Pada tahap ini, mekanisme inferensi mengintegrasikan kondisi input untuk menentukan derajat aktivasi setiap aturan. Terdapat tiga metode inferensi yang umum digunakan dalam literatur, yaitu:
 - **Metode Mamdani:** merupakan metode yang banyak digunakan karena bentuk aturan dan keluarannya bersifat intuitif. Pada Mamdani, konsekuen aturan berupa himpunan fuzzy, kemudian dilakukan proses agregasi antar aturan dan diakhiri dengan defuzzifikasi (misalnya metode centroid) untuk menghasilkan nilai output crisp.
 - **Metode Sugeno:** memiliki konsekuen aturan berupa konstanta (orde 0) atau persamaan linear (orde 1), sehingga output akhirnya diperoleh melalui perhitungan rata-rata tertimbang. Metode ini sering dipilih ketika dibutuhkan perhitungan yang lebih efisien dan cocok untuk optimasi atau pemodelan matematis.
 - **Metode Tsukamoto:** mensyaratkan konsekuen aturan direpresentasikan oleh himpunan fuzzy monoton, sehingga setiap aturan menghasilkan output tegas (crisp) melalui mekanisme

inferensi; selanjutnya seluruh output aturan digabung menggunakan rata-rata tertimbang untuk memperoleh output akhir.

3. **Defuzzifikasi:** Tahap konversi akhir di mana himpunan *fuzzy* hasil inferensi diubah kembali menjadi nilai tegas (*crisp value*) agar dapat dieksekusi oleh sistem kendali atau aktuator.

Dalam penelitian ini, metode inferensi yang diterapkan adalah Fuzzy Mamdani. Pemilihan ini merujuk pada studi komparasi oleh Ula (2017) yang menunjukkan bahwa metode Mamdani memiliki tingkat akurasi yang lebih baik dibandingkan metode lainnya dalam kasus klasifikasi non-linear. Meskipun metode Mamdani membutuhkan beban komputasi yang lebih tinggi dibandingkan Sugeno atau Tsukamoto karena proses defuzzifikasi menggunakan metode *Centroid* (titik berat), metode ini dipilih karena keunggulannya dalam menangkap intuisi bahasa manusia (linguistik) dan menghasilkan transisi output yang lebih halus untuk penentuan kategori kelayakan air minum secara *real-time*.

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

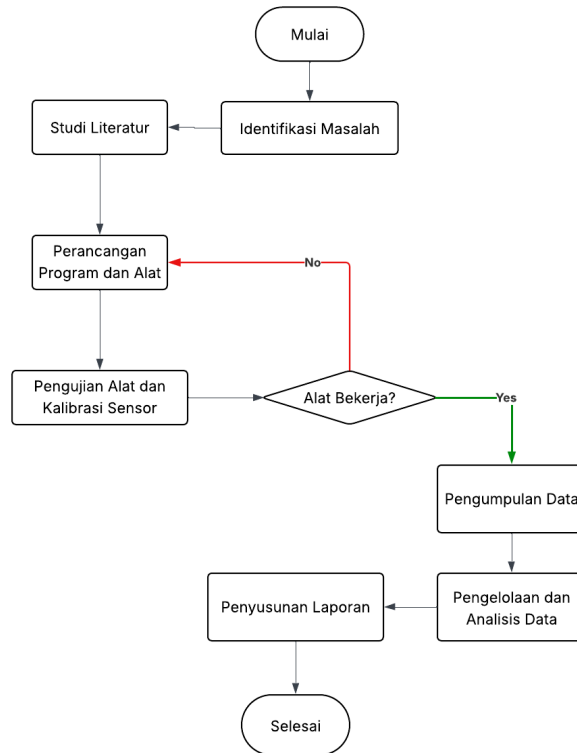
Firebase adalah platform *Backend-as-a-Service* milik Google yang menyediakan database *real-time* dan berbagai layanan cloud lain untuk aplikasi. Dalam sistem IoT kualitas air, Firebase dapat dimanfaatkan sebagai penyimpanan data sensor di cloud yang terstruktur dan mudah diakses aplikasi mobile. Dua produk Firebase yang umum dipakai yaitu Realtime Database dan Cloud Firestore – keduanya NoSQL database yang mampu menyinkronkan data ke klien secara *real-time*. Kelebihan utama Firebase bagi aplikasi monitoring adalah kemampuan sinkronisasi lintas perangkat secara langsung serta dukungan offline. Data yang dikirim ESP32 ke Firebase akan tersimpan di cloud dan dapat dibaca *real-time* oleh aplikasi Android. Firebase 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, Firebase berperan penting untuk memastikan data hasil pengukuran (pH, TDS, dsb.) tersimpan aman di cloud dan dapat diakses dimanapun dan kapanpun. Selain itu, Firebase mendukung fitur notifikasi (Firebase 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 Firebase 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.

3.2 Identifikasi Masalah

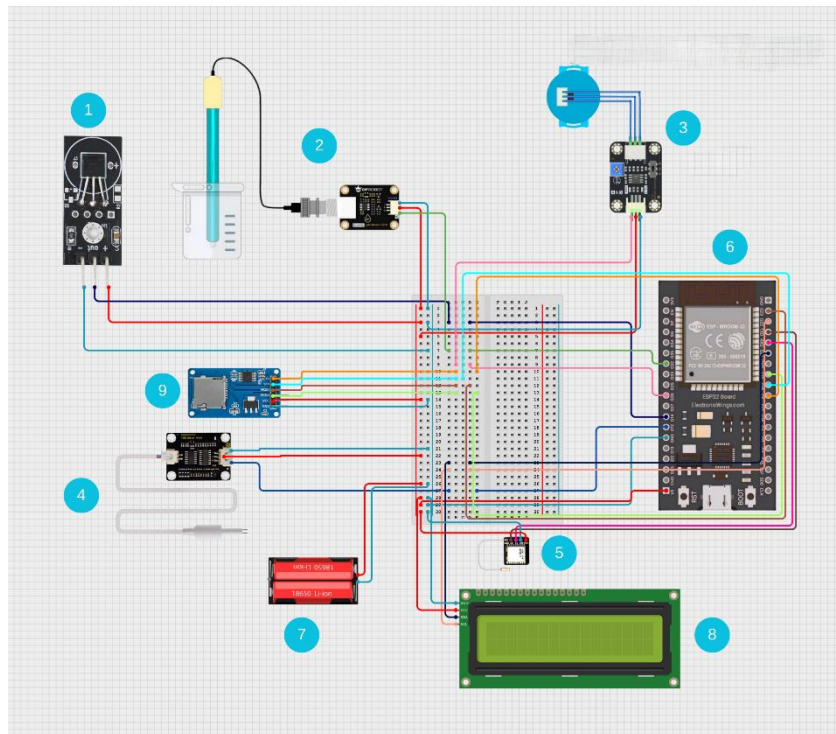
Pada tahap ini, identifikasi masalah terlebih dahulu ditentukan pada penelitian penulis. Masalah yang dapat diidentifikasi dalam penelitian ini, diantaranya adalah keterbatasan akses terhadap informasi kualitas air minum secara langsung. Maka dari itu penulis ingin membuat alat portable yang memberikan informasi kualitas air minum secara langsung dan beserta lokasinya.

3.3 Studi Literatur

Langkah selanjutnya dalam penelitian adalah studi literatur. Studi literatur dilakukan untuk mempelajari dan memahami semua hal mengenai kualitas air, logika fuzzy, dan alat-alat yang akan digunakan untuk penelitian.

3.4 Perancangan Program dan Alat

3.4.1 Perancangan Alat



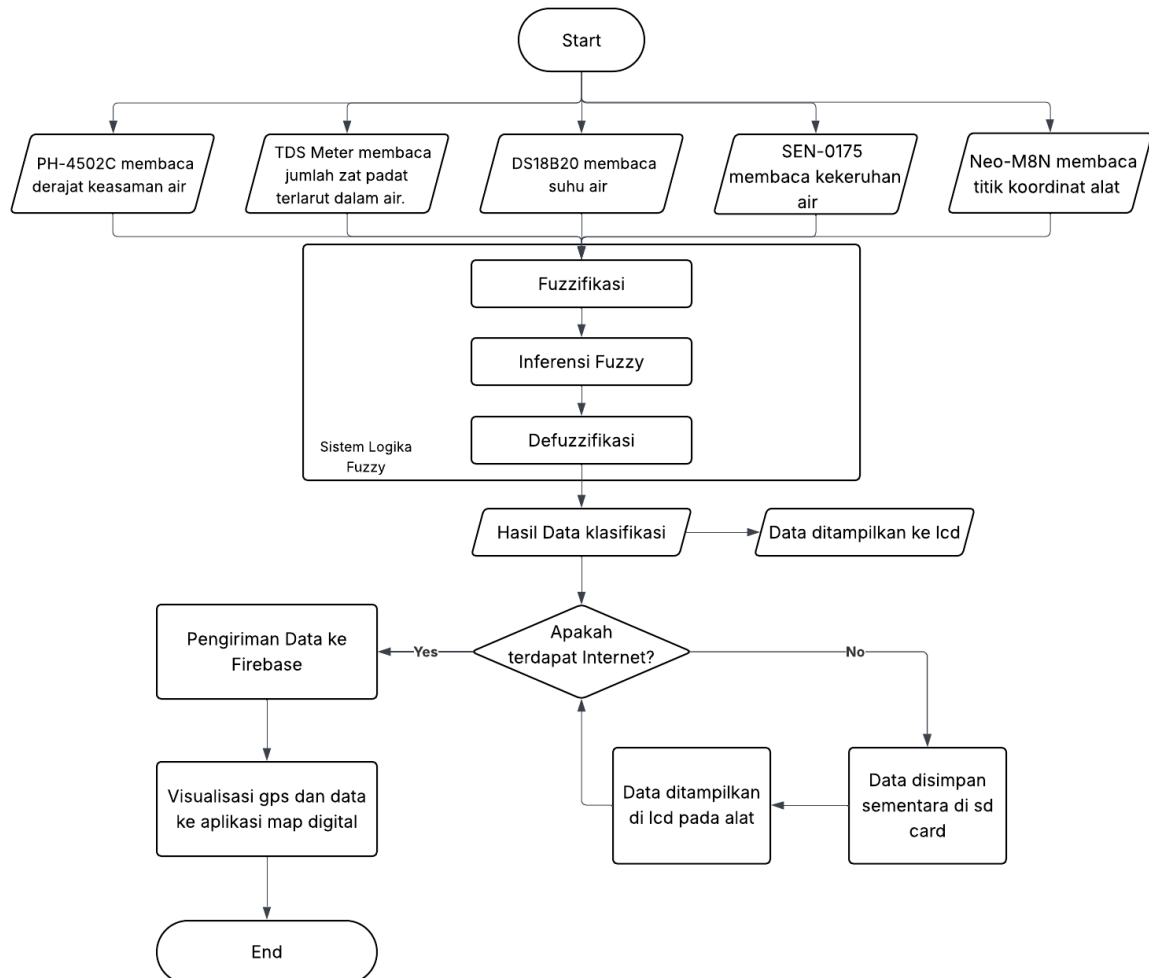
Penjelasan Alat :

1. Sensor Suhu (ds18b20)
2. Sensor pH (SEN0131)
3. Sensor Turbidity (SEN0189)
4. Sensor TDS (SEN0171)
5. Sensor GPS (U Blox M8N)
6. ESP32
7. Baterai Li-Po
8. LCD Green

9. Sd card Module (NET-0016)

Pada tahap perancangan alat, dibuat arsitektur sistem IoT untuk monitoring kualitas air. Sistem terdiri dari sensor-sensor kualitas air (pH, Total Dissolved Solids/TDS, suhu, dan kekeruhan/turbidity), baterai untuk sumber daya, dan lcd sebagai informasi terkait kualitas air yang terhubung ke mikrokontroler ESP32. Pemilihan parameter pH, TDS, kekeruhan, dan suhu didasarkan pada standar kualitas air minum. Mikrokontroler ESP32 dipilih karena telah terintegrasi dengan modul WiFi, sehingga dapat mengolah data sensor sekaligus mengirimkannya melalui jaringan internet. Dalam sistem yang dibangun, ESP32 berperan sebagai pusat pengendali dan pengirim data *real-time*. Konfigurasi perangkat keras meliputi koneksi sensor pH, sensor TDS, sensor kekeruhan, dan sensor suhu air ke pin ESP32 yang sesuai, serta modul GPS untuk memperoleh data koordinat lokasi. Perancangan skematik pada gambar 3.2 memastikan tiap sensor terhubung dengan antarmuka yang benar.

3.4.2 Perancangan Program



Selanjutnya, perangkat lunak dikembangkan menggunakan Arduino IDE (atau PlatformIO) untuk memprogram ESP32. Kode program mencakup inisialisasi sensor, pembacaan data secara berkala, sistem logika fuzzy, dan logika pengiriman data. Sistem dirancang hibrid dengan dua mode komunikasi data: online dan offline. Pada mode online, ESP32 memanfaatkan koneksi WiFi untuk mengirim data hasil pengukuran ke layanan *cloud* Firebase secara *real-time*. Penggunaan IoT memungkinkan pemantauan jarak jauh secara cepat dan akurat. Sebaliknya, pada mode offline (ketika

tidak tersedia koneksi internet), data akan disimpan ke dalam memori lokal berupa kartu SD (melalui modul SD card). Dengan strategi ini, sistem tetap dapat merekam data secara kontinu di lokasi terpencil; data tersimpan lokal akan diunggah ke *cloud* ketika koneksi internet kembali tersedia, sehingga tidak ada kehilangan data.

Data yang sudah diolah kemudian dianalisis dengan menggunakan fuzzy logic mamdani untuk memastikan apakah air di daerah tersebut bagus untuk diminum atau tidak. Proses dalam fuzzy logic adalah sebagai berikut :

3.4.2.1 Fuzzifikasi

Mengubah nilai tegas (crisp input) dari sensor (pH, TDS, Suhu, Kekeruhan) menjadi derajat keanggotaan (μ) dalam himpunan fuzzy.

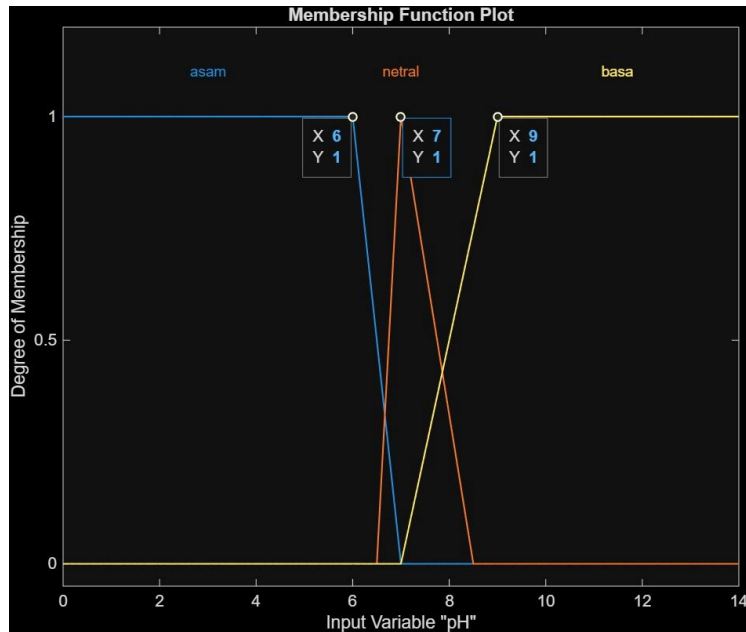
- Fuzzifikasi pH

Fungsi keanggotaan variabel pH dijabarkan sebagai berikut :

$$\mu_{asam}|x| = \begin{cases} 0, & x < 0 \text{ atau } x > 7 \\ \frac{7-x}{7-6}, & 6 \leq x \leq 7 \\ 1, & 0 \leq x \leq 6 \end{cases}$$

$$\mu_{netral}|x| = \begin{cases} 0, & x < 6.5 \text{ atau } x > 8.5 \\ \frac{x-6.5}{7-6.5}, & 6.5 \leq x \leq 7 \\ \frac{7-x}{7-8.5}, & 7 \leq x \leq 8.5 \\ 1, & x = 7 \end{cases}$$

$$\mu_{basah}|x| = \begin{cases} 0, & x < 7 \text{ atau } x > 14 \\ \frac{x-7}{9-14}, & 7 \leq x \leq 9 \\ 1, & 9 \leq x \leq 14 \end{cases}$$



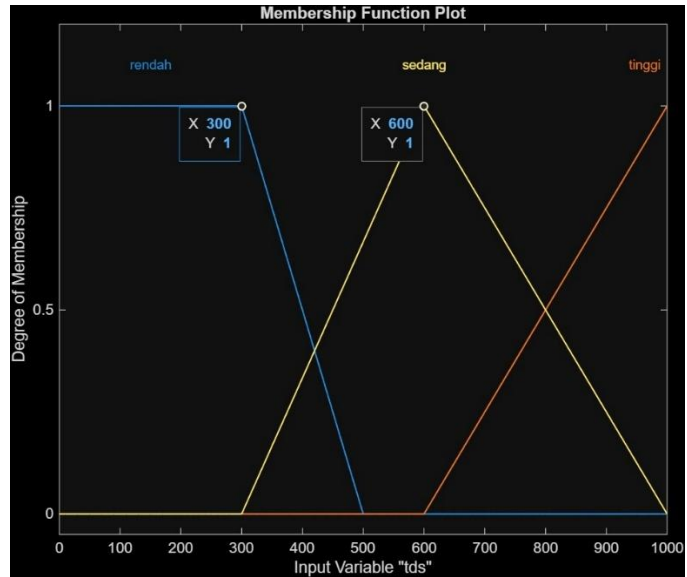
- Fuzzifikasi TDS

Fungsi keanggotaan variabel TDS dijabarkan sebagai berikut:

$$\mu_{rendah}|x| = \begin{cases} 0, & x < 0 \text{ atau } x > 500 \\ \frac{500 - x}{500 - 300}, & 300 \leq x \leq 500 \\ 1, & 0 \leq x \leq 300 \end{cases}$$

$$\mu_{sedang}|x| = \begin{cases} 0, & x < 300 \text{ atau } x > 1000 \\ \frac{x - 300}{600 - 300}, & 300 \leq x \leq 600 \\ \frac{1000 - x}{1000 - 600}, & 600 \leq x \leq 1000 \\ 1, & x = 600 \end{cases}$$

$$\mu_{tinggi}|x| = \begin{cases} 0, & x < 600 \\ \frac{1000 - x}{1000 - 600}, & 600 \leq x \leq 1000 \\ 1, & x > 1000 \end{cases}$$

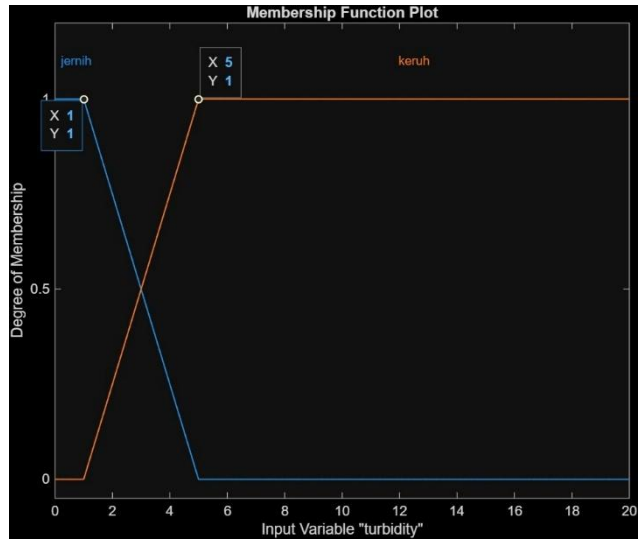


- Fuzzifikasi Turbidity

Fungsi keanggotaan variabel turbidity dijabarkan sebagai berikut :

$$\mu_{jernih}|x| = \begin{cases} 0, & x < 0 \text{ atau } x > 5 \\ \frac{5-x}{5-1}, & 1 \leq x \leq 5 \\ 1, & 0 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

$$\mu_{keruh}|x| = \begin{cases} 0, & x < 1 \\ \frac{x-1}{5-1}, & 1 \leq x \leq 5 \\ 1, & x \geq 5 \end{cases}$$



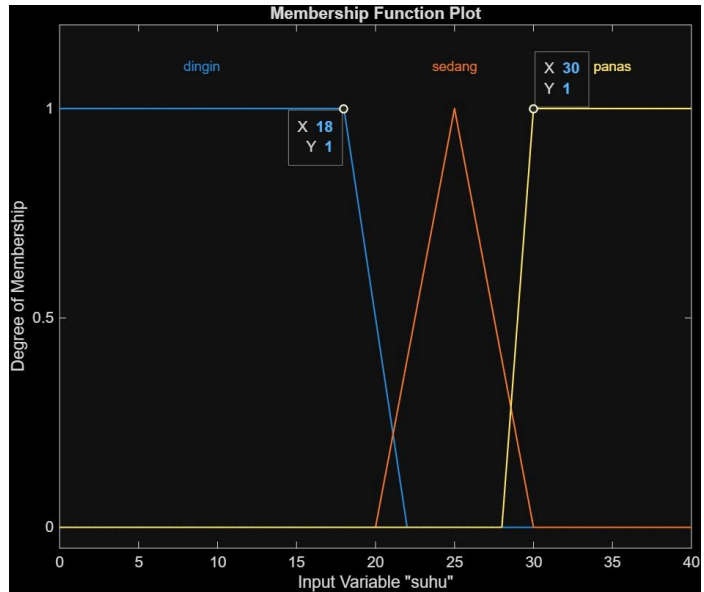
- Fuzzifikasi Suhu

Fungsi keanggotaan variabel suhu dijabarkan sebagai berikut :

$$\mu_{dingin}|x| = \begin{cases} 0, & x > 22 \\ \frac{22 - x}{22 - 18}, & 18 \leq x \leq 22 \\ 1, & x < 18 \end{cases}$$

$$\mu_{sedang}|x| = \begin{cases} 0, & x < 20 \text{ atau } x > 30 \\ \frac{x - 20}{25 - 20}, & 20 \leq x \leq 25 \\ \frac{30 - x}{30 - 25}, & 25 \leq x \leq 30 \\ 1, & x = 25 \end{cases}$$

$$\mu_{panas}|x| = \begin{cases} 0, & x < 27 \\ \frac{x - 27}{30 - 27}, & 27 \leq x \leq 30 \\ 1, & x > 30 \end{cases}$$



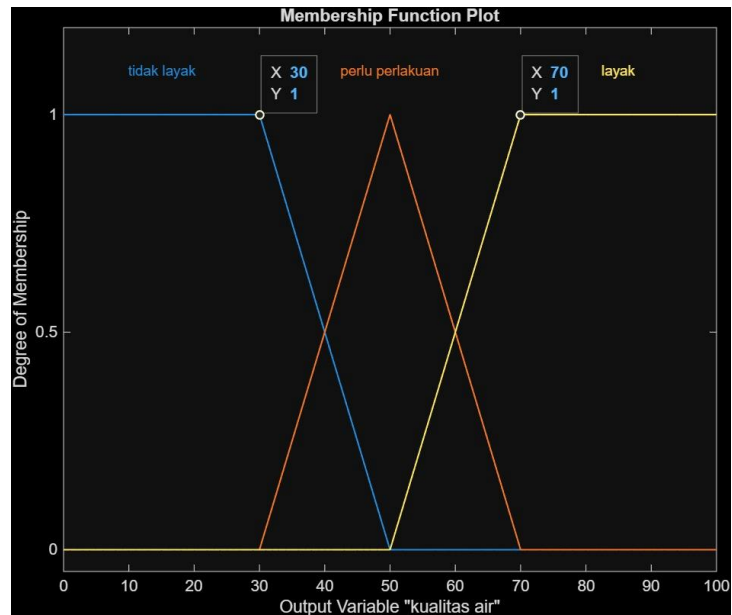
- Fuzzifikasi Kualitas Air

Fungsi keanggotaan variabel kualitas air dijabarkan sebagai berikut :

$$\mu_{tidak layak}|x| = \begin{cases} 0, & x < 0 \text{ atau } x > 50 \\ \frac{50 - x}{50 - 30}, & 30 \leq x \leq 50 \\ 1, & 0 \leq x \leq 30 \end{cases}$$

$$\mu_{butuh perlakuan}|x| = \begin{cases} 0, & x < 30 \text{ atau } x > 70 \\ \frac{x - 30}{50 - 30}, & 30 \leq x \leq 50 \\ \frac{70 - x}{70 - 50}, & 50 \leq x \leq 70 \\ 1, & x = 50 \end{cases}$$

$$\mu_{layak}|x| = \begin{cases} 0, & x < 50 \text{ atau } x > 70 \\ \frac{x-50}{70-50}, & 50 \leq x \leq 70 \\ 1, & 70 \leq x \leq 100 \end{cases}$$



3.4.2.2 Inferensi Fuzzy

Dalam penelitian ini, sistem penilaian kualitas air dirancang untuk menghasilkan tiga kategori keluaran, yaitu TIDAK LAYAK, PERLU PERLAKUAN, dan LAYAK. Kategori PERLU PERLAKUAN digunakan untuk menggambarkan kondisi air yang belum memenuhi standar konsumsi langsung, namun masih dapat ditingkatkan kualitasnya melalui proses pengolahan tertentu sesuai jenis dan tingkat penyimpangannya. Penetapan kategori-kategori tersebut dilakukan berdasarkan prinsip logika fuzzy, di mana perancang model (model designer) diberikan fleksibilitas untuk mendefinisikan label keluaran selama penetapannya tetap mengikuti kaidah logis, konsisten, serta dapat dijustifikasi secara ilmiah.

Pada metode Inferensi Fuzzy Mamdani, hubungan antara variabel masukan dan keluaran dibentuk melalui seperangkat aturan IF–THEN. Aturan-aturan ini menyatukan kondisi fuzzy pada input dengan himpunan fuzzy pada output sehingga setiap kombinasi kondisi dapat menghasilkan keputusan yang relevan.

Melalui proses analisis fuzzy pada input, sistem mampu melakukan mekanisme inferensi sesuai aturan basis fuzzy (*fuzzy rule based systems*) yang telah dirancang, sehingga keputusan akhir dapat diperoleh dari integrasi keseluruhan aturan fuzzy yang aktif. Berikut adalah basis aturan fuzzy pada sistem penentuan kualitas air.

pH	TDS	Turbidity	Suhu	Kualitas Air
pH \neq netral	rendah	jernih	sedang	Tidak layak
netral	tinggi	jernih	sedang	Tidak layak
netral	sedang	jernih	sedang	Perlu perlakuan
netral	rendah	keruh	sedang	Tidak layak
netral	rendah	jernih	Dingin/panas	Perlu perlakuan
netral	rendah	jernih	sedang	layak

3.4.2.3 Defuzzifikasi

Proses defuzzifikasi pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode Centre of Area (COA), yang bertujuan untuk memperoleh nilai tegas dari variabel keluaran fuzzy. Metode COA dipilih karena mampu menghasilkan keputusan yang merepresentasikan distribusi derajat keanggotaan dari setiap kategori output fuzzy secara proporsional.

Secara matematis, defuzzifikasi dengan metode COA dinyatakan sebagai:

$$COA = \frac{\int y \cdot \mu(y) dy}{\int \mu(y) dy} = \frac{M1 + M2 + M3 + Mn}{A1 + A2 + A3 + An}$$

Pada persamaan tersebut, y merupakan nilai keluaran fuzzy, $\mu(y)$ adalah fungsi keanggotaan pada nilai y , dan simbol integral \int menggambarkan proses perhitungan luasan di bawah kurva fungsi keanggotaan.

Melalui pendekatan ini, sistem menentukan titik pusat area dari himpunan fuzzy keluaran. Titik pusat tersebut kemudian digunakan sebagai nilai tegas atau nilai konkret yang mewakili keputusan akhir, sesuai dengan distribusi “massa” dari himpunan fuzzy yang terbentuk.

3.5 Pengujian Alat

No	Komponen / Fitur	Metode Pengujian	Indikator Keberhasilan	Status
1	Catu Daya (Power)	Menghidupkan saklar daya pada perangkat.	LED indikator menyala	
2	Sensor pH	Test dengan larutan buffer	Pembacaan sesuai	
3	Sensor TDS	Mencelupkan sensor ke air	Nilai TDS sesuai konsentrasi air.	
4	Sensor Suhu (DS18B20)	Membandingkan suhu air dengan sensor	Selisih suhu sedikit	
5	Sensor Kekeruhan	Menguji pada air jernih dan air keruh.	Nilai NTU sesuai	
6	Modul GPS	Menyalakan alat di area terbuka.	Titik koordinat valid	
7	LCD Display	Mengamati tampilan layar	Menampilkan data dengan jelas	
8	Konektivitas Wi-Fi	Memantau status koneksi	Mendapatkan IP address	
9	Penyimpanan Lokal (SD Card)	Memutus koneksi internet	Data tersimpan di kartu SD saat offline.	
10	Cloud (Firebase)	Mengamati dashboard saat online	Data sensor masuk ke database	

Pengujian di lakukan untuk memeriksa rancangan software dan hardware sudah sesuai dengan yang diinginkan atau tidak. Pengujian pada penelitian ini ditinjau berdasarkan rancangan perangkat keras yang sudah sesuai dan tidak mengalami malfungsi secara fisik dengan melihat kondisi mikrokontroler dan sensor, respon sensor yang tertanam ditinjau dengan melihat apakah terjadi error code atau tidak dan juga melihat akses pengiriman data dari mikrokontroler ke penyimpanan local maupun ke cloud.

3.6 Pengumpulan Data

No	Lokasi Sampel	Waktu Pengambilan	Koordinat	Pengulangan	Suhu (°C)	TDS (ppm)	pH	Kekeruhan (NTU)	Hasil Klasifikasi (Fuzzy)
1	Sumber Air A	08:00 WIB	-6.200, 106.816	1	...	...	...	...	...
				2	...	...	...	...	...
				3	...	...	...	...	...
				Avg	...	...	...	...	...
2	Sumber Air B	09:15 WIB	-6.205, 106.820	1	...	...	...	...	...
				2	...	...	...	...	...
				3	...	...	...	...	...
				Avg	...	...	...	...	...
3	Sumber Air C	10:30 WIB	-6.210, 106.825	1	...	...	...	...	...
				2	...	...	...	...	...
				3	...	...	...	...	...
				Avg	...	...	...	...	...

Metode pengumpulan data dilakukan dengan cara eksperimen lapangan, yaitu mengukur parameter kualitas air menggunakan perangkat yang telah dibuat pada berbagai sampel air. Data yang dikumpulkan meliputi nilai pH, TDS (ppm), kekeruhan (NTU), suhu (°C), serta informasi lokasi (koordinat GPS) dan waktu pengukuran.

Perangkat dibawa ke lokasi sumber air yang akan diuji. Pada setiap lokasi pengambilan sampel, sensor-sensor alat dicelupkan atau dikontakkan ke air sampel secara langsung. Modul GPS pada perangkat dibiarkan hingga menangkap sinyal dan menentukan koordinat lokasi pengukuran. Setelah sensor berada dalam air, perangkat akan melakukan pembacaan seluruh parameter secara simultan. Untuk setiap sampel air, data diambil beberapa kali. Setiap parameter diukur sebanyak 3 kali pengulangan untuk meningkatkan reliabilitas data. Pengulangan dilakukan dengan jeda waktu tertentu (misal 30 detik) di antara pembacaan, guna memastikan hasil yang konsisten. Jika terdapat bacaan yang anomali, dapat dilakukan pengukuran tambahan hingga data dirasa stabil.

3.7 Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan dan Analisis Data dilakukan melalui beberapa tahapan terstruktur, mulai dari akuisisi data mentah oleh sensor hingga klasifikasi otomatis menggunakan kecerdasan buatan (Logika Fuzzy) yang tertanam pada mikrokontroler.

3.7.1 Pengolahan Data

Data kualitas air diperoleh dari sensor pH, TDS, suhu, dan kekeruhan yang terpasang pada perangkat IoT portabel berbasis ESP32. Setiap sensor mengirimkan data secara real-time melalui Wi-Fi ke server cloud. Pendekatan ini mengikuti metode penelitian sebelumnya pada sistem monitoring kualitas air berbasis IoT yang mengumpulkan data pH, TDS, suhu, dan kekeruhan secara kontinu untuk dianalisis lebih lanjut.

Data yang diterima pada server akan melalui tahap :

Averaging untuk meredam pembacaan ekstrem,

Validasi rentang untuk memastikan nilai berada pada batas logis menurut standar kualitas air (SNI/WHO).

Tahap kalibrasi sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan dengan nilai standar, sebagaimana dilakukan pada penelitian tentang alat deteksi kualitas air minum berbasis Arduino yang mengevaluasi akurasi pH, TDS, dan suhu sebelum digunakan dalam analisis utama.

Modul GPS menghasilkan data koordinat (lintang & bujur) yang disinkronkan dengan tiap data sensor. Data ini kemudian dibentuk menjadi spatial point dataset yang siap divisualisasikan sebagai peta kualitas air. Integrasi IoT + GPS sebagai sistem pemantauan spasial telah digunakan pula pada penelitian pemetaan kondisi lingkungan berbasis lokasi.

3.7.2 Analisis Data

Data hasil pengukuran dianalisis validitasnya dengan membandingkannya terhadap standar baku mutu : WHO, Permenkes, dan PP.

Setiap sensor dianalisis kinerjanya untuk membuktikan bahwa sensor tersebut valid dengan cara membandingkan dengan alat ukur standar. Error pada alat dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$\%error = \left| \frac{Nilai_{standar} - Nilai_{sensor}}{Nilai_{standar}} \right| \times 100\%$$

Dan akurasi dapat dihitung dengan rumus berikut.

$$\%akurasi = 100\% - \%error$$

Selain analisis hasil tiap sensor, analisis algoritma juga dilakukan untuk mengevaluasi model logika fuzzy Mamdani yang dibangun dalam penentuan kualitas air minum dengan menghasilkan tiga output kategorikal (LAYAK, PERLU PERLAKUAN, atau TIDAK LAYAK) berdasarkan 4 input yaitu tds, pH, turbidity, dan suhu. Confussion Matrix digunakan untuk memberikan gambaran menyeluruh terhadap kinerja model dengan menunjukkan perbandingan antara hasil prediksi sistem dan kondisi aktualnya.

Kerangka confusion matrix dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel.

Confussion Matrix		Nilai Aktual		
		Tidak Layak	Butuh Perlakuan	Layak
Nilai Prediksi	Tidak Layak	A (Benar)	B (Error)	C (Error Fatal)
	Butuh Perlakuan	D (Error)	E (Benar)	F (Error)
	Layak	G (Error Fatal)	H (Error)	I (Benar)

Setelah menyusun dan menganalisis confusion matrix, tahapan selanjutnya dalam mengevaluasi kinerja model logika fuzzy Mamdani yang dibangun dalam penelitian tersebut adalah menghitung metrik akurasi yang bertujuan untuk memberikan gambaran secara kuantitatif seberapa baik sistem dapat menentukan

kualitas air. Persamaan untuk menghitung metrik akurasi adalah sebagai berikut.

$$Accuracy = \frac{\text{total yang benar}}{\text{total data}} \times 100\%$$

3.8 Jadwal Penelitian

Berikut ini adalah jadwal penelitian kegiatan pelaksanaan dalam bentuk tabel *timeline* dibawah ini :

[illegible]