

**ANALISIS KUALITAS AIR PENGUMPAN KETEL UAP BERBASIS
MIKROKONTROLLER MENGGUNAKAN METODE *FUZZY***

Usulan Penelitian Tesis S-2

Untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Magister Teknik

Program Studi Magister Teknik Elektro



Diajukan oleh:

Iksan Saifudin

20602400050

PROGRAM MAGISTER TEKNIK ELEKTRO

UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG

SEMARANG

Mei, 2025

Laporan Penelitian

ANALISIS KUALITAS AIR PENGUMPAN KETEL UAP BERBASIS MIKROKONTROLLER MENGGUNAKAN METODE *FUZZY*

Yang diajukan oleh

Iksan Saifudin

20602400050

Telah disetujui oleh:

Pembimbing Utama

(Dr. Ir. Agus Adhi Nugroho, MT)

tanggal

Pembimbing Pendamping

(Dr. Bustanul Arifin, ST, MT)

tanggal

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	2
Abstrak	8
BAB I	9
PENDAHULUAN	9
1.1 Latar Belakang	9
1.2 Rumusan Masalah	12
1.3 Batasan Masalah	12
1.4 Keaslian Penelitian	13
1.5 Tujuan Penelitian	14
1.6 Manfaat Penelitian	15
BAB II	16
TINJAUAN PUSTAKA	16
2.1 Dasar Teori	18
a. Ketel Uap Kapal (Marine Steam Boiler)	18
b. Internet of Things (IoT)	22
c. Modul sensor pH E-BNC	22
d. Modul Sensor Suhu DS18B20	23
e. Modul sensor salinitas / TDS	24
f. Modul sensor kekeruhan (<i>turbidity sensor</i>)	24
g. Mikrokontroler NodeMCU ESP32	25
h. Firebase	25
i. Metode Fuzzy Sugeno	25
BAB III	28
METODE PENELITIAN	28
3.1 Model Penelitian	28
3.2 Langkah-langkah metode <i>fuzzy</i>	30
3.2.1 Penentuan Variabel Input dan Output	30
3.2.2 Fuzzifikasi	30
3.2.3 Pembentukan Aturan Fuzzy (Rule Base)	30
3.2.4 Inferensi Fuzzy (Fuzzy Inference System)	31
3.2.5 Penentuan Output (Defuzzifikasi)	31

3.2.6 Interpretasi Hasil	31
3.2.7 Penghitungan akurasi	31
3.3 Rancangan Schematic Alat Ujicoba	32
3.4 <i>Research Flowchart</i>	38
BAB IV	39
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	39
4.1. Pengujian Alat.....	41
4.2. Fuzzifikasi.....	51
4.2.1. Kekeruhan (NTU).....	51
4.2.2. Salinitas (%).....	52
4.2.3. pH	54
4.2.4. Kualitas Air.....	56
4.3. Basis Aturan (<i>Rule Base</i>).....	56
4.4. Inferensi (Evaluasi Aturan).....	58
4.5. Defuzzifikasi (Metode Sugeno Zero-order).....	58
4.6. Penerapan Sistem Fuzzy Menggunakan Software MATLAB	74
4.7. Penerapan Sistem Fuzzy pada ESP32.....	85
BAB V.....	90
KESIMPULAN & SARAN	90
5.1 Kesimpulan.....	90
5.2 Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA	92

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Tabel Waktu Respon Platform Monitoring.....	37
Tabel 4.1 Penjelasan Komponen Alat Analisis Kualitas Air	40
Tabel 4.2 Tabel awal Kekeruhan, Salinitas, dan PH 7 jenis cairan pada suhu 40 °C (Suhu Normal).....	42
Tabel 4.3 Data Logger Percobaan Kualitas Air Murni (Distilled Water)	43
Tabel 4.4 Data Logger Percobaan Kualitas Air Berwarna (Colored Water)	44
Tabel 4.5 Data Logger Percobaan Kualitas Air Yang Mengandung Partikel Bubuk (Suspended Solids-laden Water)	45
Tabel 4.6 Data Logger Percobaan Kualitas Air Softener (Softened Water)	45
Tabel 4.7 Data Logger Percobaan Kualitas Air Sadah (Hard Water)	46
Tabel 4.8 Data Logger Percobaan Kualitas Air Sumur (Ground Water).....	47
Tabel 4.9 Data Logger Percobaan Kualitas Air Lumpur (Sludge Water).....	47
Tabel 4.10 Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori untuk input kekeruhan.....	51
Tabel 4.11 Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori untuk input salinitas	53
Tabel 4.12 Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori untuk input pH.....	54
Tabel 4.13 Nilai output kualitas air.....	56
Tabel 4.14 Aturan fuzzy yang digunakan untuk klasifikasi kualitas air	57
Tabel 4. 15 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Distilled Water).....	68
Tabel 4. 16 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Colored Water).....	69
Tabel 4.17 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Suspended Solids-laden Water).....	70
Tabel 4.18 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Softened Water)	70
Tabel 4.19 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Hard Water).....	71
Tabel 4.20 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Ground Water)	72
Tabel 4.21 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Air lumpur (Sludge Water)	72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 piping diagram ketel uap kapal (marine steam boiler).....	18
Gambar 2.2 Tangki air pengumpan ketel (cascade tank).....	19
Gambar 2.3 Standar kualitas air boiler menurut APAVE (Association of electrical and steam unit owners)	20
Gambar 2.4 Standar kualitas air ketel menurut ABMA (American Boiler Manufacturer Association).....	21
Gambar 2.5 Sensor pH BNC	23
Gambar 2.6 Sensor suhu DS18B20.....	23
Gambar 2.7 Sensor salinitas/TDS	24
Gambar 2.8 Sensor kekeruhan (turbidity).....	24
Gambar 2.9 Mikrokontroler NodeMCU ESP32	25
Gambar 3.1 Perancangan sistem dan model	28
Gambar 3.2 Perencanaan Hardware	29
Gambar 3.3 Schematic Rancangan Alat Monitoring Kualitas Air.....	32
Gambar 3.4 Koding Kalibrasi Data Sensor Suhu	33
Gambar 3.5 Koding Kalibrasi Sensor pH	33
Gambar 3.6 Koding Kalibrasi Sensor Turbidity (Kekeruhan)	34
Gambar 3.7 Koding Kalibrasi Sensor TDS (Salinitas)	34
Gambar 3.8 Kalibrasi OLED 0.96 Inch Display	35
Gambar 3.9 Tampilan Firebase Realtime Database	36
Gambar 3.10 Flowchart Penelitian.....	38
Gambar 4.1 Prototype Alat Monitoring Kualitas Air	39
Gambar 4.2 Monitoring 3 Sensor menggunakan Firebase Realtime Database dan Menampilkan hasil output fuzzy	43
Gambar 4.3 Grafik fungsi keanggotaan untuk input kekeruhan	51
Gambar 4.4 Grafik fungsi keanggotaan untuk input salinitas.....	53
Gambar 4.5 Grafik fungsi keanggotaan untuk input pH.....	55
Gambar 4.6 Fuzzy Logic Designer untuk analisis kualitas air.....	74
Gambar 4.7 Membership Function Editor untuk variabel input kekeruhan.....	75
Gambar 4.8 Membership Function Editor untuk variabel input salinitas	76
Gambar 4.9 Membership Function Editor untuk variabel input pH	76

Gambar 4.10 Membership Function Editor untuk variabel output kualitas air.....	77
Gambar 4.11 Tampilan Rule Editor sistem fuzzy	77
Gambar 4.12 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Distilled Water	79
Gambar 4.13 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Colored Water	80
Gambar 4.14 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Suspended Solids- laden Water	81
Gambar 4.15 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Softened Water	82
Gambar 4.16 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Hard Water	83
Gambar 4.17 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Air sumur (Ground Water).....	84
Gambar 4.18 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Air lumpur (Sludge Water).....	85



Abstrak

Kualitas air pengumpan ketel uap memiliki peran penting dalam menjamin kinerja dan keandalan sistem ketel di kapal. Air dengan kualitas buruk dapat menyebabkan korosi, pembentukan kerak, dan gangguan lain yang menurunkan efisiensi operasional. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengembangkan sistem monitoring kualitas air pengumpan ketel secara real-time berbasis mikrokontroler NodeMCU ESP32 dan Internet of Things (IoT). Sistem menggunakan sensor pH, sensor suhu DS18B20, sensor Total Dissolved Solids (TDS), dan sensor turbidity untuk mengukur parameter kualitas air. Data dikirim ke Firebase dan ditampilkan juga melalui OLED 0.96 inch. Untuk menentukan tingkat kualitas air (baik, sedang, buruk), digunakan metode logika fuzzy Sugeno orde nol dengan input berupa kekeruhan, salinitas, dan nilai pH. Proses fuzzy meliputi fuzzifikasi, pembentukan rule, inferensi, dan defuzzifikasi dengan metode weighted average. Pengujian dilakukan terhadap tujuh jenis air: air murni, air berwarna, air berlumpur, air sumur, air softener, air sadah, dan air dengan partikel padat. Hasil menunjukkan sistem mampu mengklasifikasikan kualitas air secara akurat dengan nilai akurasi yang baik yaitu 92,97%. Sistem ini diharapkan dapat menjadi solusi monitoring efisien untuk pemeliharaan ketel uap dalam industri pelayaran.

Kata kunci: *kualitas air, ketel uap, IoT, ESP32, sensor, fuzzy Sugeno*

Abstract

The quality of boiler feedwater plays a crucial role in ensuring the performance and reliability of steam boiler systems on ships. Poor water quality can cause corrosion, scale formation, and other issues that reduce operational efficiency. This study aims to design and develop a real-time water quality monitoring system for boiler feedwater using a NodeMCU ESP32 microcontroller and Internet of Things (IoT) technology. The system utilizes pH sensors, DS18B20 temperature sensors, Total Dissolved Solids (TDS) sensors, and turbidity sensors to measure water quality parameters. The data is transmitted to Firebase and displayed via a 0.96-inch OLED screen. To classify the water quality level (good, moderate, poor), a zero-order Sugeno fuzzy logic method is implemented with inputs consisting of turbidity, salinity, and pH values. The fuzzy logic process includes fuzzification, rule formation, inference, and defuzzification using the weighted average method. Tests were conducted on seven types of water: distilled water, colored water, sludge water, groundwater, softened water, hard water, and water with suspended solids. Results show that the system can accurately classify water quality with a high accuracy rate of 92.27%. This system is expected to serve as an efficient monitoring solution for steam boiler maintenance in the maritime industry.

Keywords: *water quality, steam boiler, IoT, ESP32, sensors, Sugeno fuzzy logic*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketel Uap Kapal atau *Marine Steam Boiler* adalah salah satu permesinan bantu di atas kapal yang sangat penting dalam operasional kapal. Ketel Uap berfungsi untuk menghasilkan uap bertekanan (lebih dari 1 atm) yang diperlukan untuk memanaskan muatan, bahan bakar kapal, minyak lumas, air, ruangan dan keperluan permesinan kapal. Tercukupinya uap bertekanan adalah hal yang mutlak untuk kelancaran operasional permesinan yang membutuhkan uap [1]. Akan tetapi, berdasarkan pengalaman dan observasi peneliti bahwa ketel uap kapal sering mengalami permasalahan seperti terjadinya korosi, terbentuknya deposit, kerak pada sistem, timbulnya gelembung pada permukaan air didalam boiler dan bau yang tidak normal. Hal tersebut menyebabkan performa ketel uap kapal menurun. Beberapa penyebab dari penurunan performa ketel uap diakibatkan dari kualitas air ketel yang buruk. Kualitas tersebut dapat diamati dengan parameter pH air pengumpan, suhu air pengumpan, kadar zat terlarut (TDS), kadar kekeruhan (*turbidity*) dan parameter lainnya [2]

Ketel Uap mengalami perkembangan dari tahun ke tahun dari konvensional yang pengoperasiannya dilakukan secara manual hingga dapat dioperasikan secara otomatis. Dalam kemajuan dunia yang semakin pesat, otomatisasi telah menjadi hal yang umum. Otomatisasi sering digunakan guna menghemat tenaga serta untuk mengurangi tingkat kesalahan yang disebabkan manusia. Melihat kondisi sekarang, pemanfaatan otomatisasi teknologi dalam memonitoring suatu sistem telah banyak digunakan meskipun masih ditemukan banyak kendala dalam proses pemanfaatannya.

Pesatnya perkembangan teknologi jaringan sensor nirkabel memberikan pendekatan baru untuk akuisisi data *real-time*, transmisi dan pemrosesan. Sistem ini bisa mendapatkan informasi kualitas air yang berkelanjutan dari jarak jauh [3].

Salah satu pemanfaatan otomatisasi teknologi pada pelayaran adalah cara memonitoring kadar pH air pengumpan, suhu air pengumpan, kadar zat

terlarut (TDS), kadar kekeruhan (turbidity) dan lain sebagainya dalam permesinan bantu yang berada di kapal yaitu ketel uap. Hal ini bertujuan untuk memudahkan *engineer* dalam memonitoring kondisi air yang berada di dalam ketel uap.

Terdapat beberapa metode dalam mengukur kualitas air pengumpan ketel, diantaranya dengan metode konvensional yaitu dengan metode kertas lakmus atau kertas pH, metode pengambilan sampel air dan melarutkan dengan bubuk atau cairan kimia, metode mengukur suhu dengan termometer dan lainnya.

Metode ini kurang praktis dan hasil pengukurannya kurang akurat dan hanya dapat digunakan dalam sekali pengukuran saja serta tidak bisa mengetahui secara *realtime*. Dengan melihat kondisi di atas sebuah ide baru terbentuk, untuk memaksimalkan perawatan air di dalam ketel perlu dibuat alat yang mampu memantau kadar pH air pengumpan, suhu air pengumpan, kadar zat terlarut (TDS), kadar kekeruhan (turbidity) pada ketel uap. Sehingga lebih memudahkan dalam memantau kualitas air di dalam *cascade tank* pada ketel uap.

Pada penelitian sebelumnya oleh Mu'alim dan Sukardi dalam jurnal berjudul "Sistem Monitoring air pengumpan ketel uap laut Berbasis IoT". Dalam penelitian ini membuat sistem monitoring air pengumpan ketel uap laut dengan menggunakan water level sensor, sensor suhu, dan sensor tekanan yang dikontrol melalui mikrokontroler arduino uno dan dikolaborasikan dengan nodemcu esp32 serta menggunakan *driver motor* pompa sebagai aktuatornya yang bekerja ketika *water sensor level* mendeteksi adanya kurangnya air didalam tangki, serta menggunakan heater air yang bekerja ketika suhu air mendeteksi dibawah standar yang telah ditetapkan. Penelitian ini juga dimonitoring oleh OLED 0.96 INCH dan aplikasi *Firestore* untuk memonitoring secara *realtime* [4]

Dengan sistem monitoring air pengumpan ketel yang akan diterapkan serta permasalahan dan dampak yang terjadi selama pengoperasian, maka pembaharuan teknologi perawatan air pada ketel uap yang akan peneliti usung, yaitu peneliti menggunakan sensor pH, sensor suhu, sensor TDS, dan

sensor turbidity/kekeruhan serta dilengkapi dengan alat kontrol mikrokontroller untuk memonitoring kualitas air secara *realtime*. Dan juga terpantau melalui aplikasi *Firestore* dan OLED 0.96 INCH sehingga memudahkan penggunaanya dalam mengoperasikan dan memonitoringnya.

Selain dari perancangan alat dalam memonitoring kualitas air pengumpanan ketel uap yang dibuat peneliti, diperlukan suatu metode untuk menjelaskan keragu-raguan dari hasil monitoring air pengumpanan ketel uap dari beberapa parameter untuk mengetahui dengan jelas apakah kualitas air pengumpanan ketel uap tersebut adalah Baik, Cukup, atau Kurang. Sehingga para *engineer* dapat dengan cepat dan mudah dalam mengambil tindakan serta keputusan terhadap ketel uap tersebut. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan menggunakan *fuzzy logic*.

Fuzzy logic merupakan salah satu cabang dari logika matematika yang mengizinkan suatu variabel untuk memiliki nilai di antara nilai yang benar-benar sama dan benar-benar berbeda. Metode *fuzzy logic* ini dapat digunakan dalam sistem kontrol yang kompleks, termasuk dalam sistem monitoring air pengumpanan ketel. Perancangan sistem dengan menggunakan metode *fuzzy* membutuhkan beberapa proses sehingga terbentuknya suatu keputusan output dari sistem sesuai dengan perhitungan *fuzzy*. Proses tersebut antara lain fuzzifikasi, pembuatan rule, inferensi, dan defuzzifikasi [5].

Sistem monitoring air pengumpanan ketel yang dibuat oleh peneliti akan menggunakan *fuzzy sugeno* orde 0. *Fuzzy sugeno* orde 0 adalah salah satu jenis sistem pengontrol *fuzzy* yang cukup sederhana dan mudah diimplementasikan. Pada *fuzzy sugeno* orde 0, fungsi keanggotaan dan aturan inferensi yang digunakan adalah linier.

Untuk mendapatkan output sistem monitoring air pengumpanan ketel yang dibuat oleh peneliti, akan dilakukan uji coba pada sistem dengan menggunakan data pH, data suhu air, data zat larut dalam air, dan data kekeruhan yang dikumpulkan pada berbagai kondisi. Data yang dikumpulkan tersebut kemudian akan dibandingkan dengan output yang dihasilkan oleh sistem monitoring air pengumpanan ketel.

Dalam pengukuran data ini, akan digunakan beberapa parameter seperti *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Coefficient of Determination* (R-squared). Parameter-parameter tersebut akan digunakan untuk mengukur seberapa besar selisih antara data yang dihasilkan oleh sistem monitoring air pengumpan ketel dengan data yang sebenarnya.

Dengan melakukan pengukuran akurasi, diharapkan sistem monitoring air pengumpan ketel yang dibuat oleh peneliti dapat diuji coba dan dievaluasi kinerjanya dengan akurat. Dengan demikian, sistem monitoring air pengumpan ketel yang dibuat oleh peneliti dapat diaplikasikan secara luas dan memberikan manfaat yang optimal dalam perawatan ketel uap.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan diatas, dikemukakan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem monitoring air pengumpan ketel dengan menggunakan sensor pH, sensor suhu, sensor TDS, dan sensor turbidity/kekeruhan secara *realtime*?
2. Bagaimana menguji sistem monitoring air pengumpan ketel dengan menggunakan sensor pH, sensor suhu, sensor TDS, dan sensor turbidity/kekeruhan secara *realtime*?
3. Bagaimana menerapkan metode logika *fuzzy* sugeno orde 0 dalam monitoring kualitas air pengumpan ketel uap?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat dilakukan lebih fokus dan mendalam maka penelitian yang diangkat perlu dibatasi variabelnya. Pada penelitian ini merancang sistem monitoring air pengumpan ketel uap dengan Modul sensor sensor pH E-BNC, suhu DS18B20, sensor salinitas, sensor turbidity, NodeMCU ESP32, dan Aplikasi Software *Firestore*. Kemudian merancang sistem monitoring air pengumpan ketel uap berbasis *Internet Of Thing (IoT)* menggunakan *Fuzzy Sugeno Orde Nol*. Variabel output pada sistem monitoring air pengumpan ketel uap adalah kontrol yang akan dihasilkan oleh

alat kontrol mikrokontroller untuk memonitoring kualitas air ketel uap secara *realtime*.

1.4 Keaslian Penelitian

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian-penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Mu'alim dan Yiyin dalam bidang monitoring dan pengolahan air umpan boiler.

Dalam penelitian Mu'alim, objek yang diambil adalah air boiler dan pengendaliannya dilakukan dengan menggunakan variabel sensor suhu, dan sensor tekanan. Ketika level ketinggian air dan tekanan air berkurang, maka driver pompa akan secara otomatis menyala dan mengisi air secara otomatis. Selain itu, ketika suhu air berkurang, maka heater air akan secara otomatis menyala sesuai dengan perintah yang ada [4].

Sedangkan pada penelitian Yiyin, variabel yang dikontrol adalah pengujian kadar pH, kadar TDS, alkaliniti, chloride, dan kekerasan dengan menggunakan cara manual untuk memonitoring air umpan boiler. Hasil pengontrolan tersebut diberikan adanya proses penyaringan menggunakan plastik silica untuk menurunkan nilai TDS [6].

Pada penelitian yang dilakukan Andhika, melakukan simulasi pH Air untuk air boiler dan air chiller pada mesin produksi refrigerator dengan menggunakan logika fuzzy semua variabel itu akan diproses fuzzifikasi., setelah proses fuzzifikasi, selanjutnya adalah proses implikasi min (penalaran/rules) dengan IF-THEN sesuai himpunan fuzzy [7].

Penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian-penelitian sebelumnya dalam penggunaan sensor, objek yang diambil serta strategi dalam monitoring kualitas air pengumpan ketel uap laut. Dalam penelitian ini, akan digunakan sensor-sensor yang lebih lengkap dan canggih, yaitu menggunakan sensor pH, sensor suhu, sensor TDS, sensor kekeruhan. Selain itu, strategi monitoring air pengumpan ketel dikembangkan dengan memanfaatkan konsep *Internet Of Things* (IoT) dengan bantuan mikrokontroller dan software yang terinstall pada sebuah smartphone. Dalam metode ini, pengambilan keputusan akan dilakukan berdasarkan logika *fuzzy*,

sehingga dapat menghasilkan keputusan yang lebih akurat dan sesuai dengan kondisi yang ada.

Selain itu, penelitian ini juga memiliki keaslian dalam penerapan teknologi sensor dan metode *Fuzzy Sugeno Orde 0* pada monitoring kualitas air pengumpan ketel uap. Teknologi sensor dan metode *Fuzzy Sugeno Orde 0* memiliki potensi besar dalam meningkatkan efektivitas dan efisiensi dalam pengendalian kualitas air pengumpan ketel uap di atas kapal dengan inferensi metode Max. Dalam penelitian ini, akan dilakukan pengujian terhadap efektivitas teknologi sensor dan metode *Fuzzy Sugeno Orde 0* dalam monitoring kualitas air pengumpan ketel uap.

Penelitian ini memiliki tujuan untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi dalam monitoring kualitas air pengumpan ketel uap dengan menggunakan teknologi sensor dan metode *Fuzzy Sugeno Orde 0*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan teknologi sensor dan pengendalian kualitas air pengumpan ketel uap pada masa yang akan datang. Selain itu, hasil dari penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan manfaat bagi industri pelayaran dalam meningkatkan efektivitas dan efisiensi dalam monitoring kualitas air pengumpan ketel uap sehingga dapat meningkatkan kinerja dan keamanan kapal laut.

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut maka tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Untuk merancang sistem monitoring air pengumpan ketel dengan menggunakan sensor pH, sensor suhu, sensor TDS, dan sensor turbidity/kekeruhan secara *realtime*.
- b. Untuk menguji sistem monitoring air pengumpan ketel dengan menggunakan sensor pH, sensor suhu, sensor TDS, dan sensor turbidity/kekeruhan secara *realtime*.
- c. Untuk menerapkan metode logika *fuzzy sugeno orde 0* dalam monitoring kualitas air pengumpan ketel uap.

1.6 Manfaat Penelitian

a. Teoritis

Hasil penelitian ini diharapkan bisa menjadi bahan referensi bagi peneliti selanjutnya yang mengkaji masalah yang sama di masa mendatang.

b. Manajerial (pemangku kepentingan)

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan kebijakan strategi pemantauan, pengendalian, dan peringatan dini kualitas air pengumpan ketel uap.

c. Organisasional

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan kepada perusahaan pelayaran agar menjadi terobosan terbaru dalam monitoring kualitas air pengumpan ketel uap yang berada di kapal.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Ketel uap (*marine boiler*) merupakan komponen vital pada kapal yang berfungsi menghasilkan uap bertekanan untuk mendukung berbagai sistem permesinan, pemanas bahan bakar, pemanas muatan, dan kebutuhan domestik kapal. Namun, dalam praktiknya, ketel uap sering mengalami penurunan performa akibat berbagai masalah teknis. Permasalahan utama biasanya berasal dari kualitas air pengisi ketel yang buruk, seperti nilai pH yang tidak stabil, tingginya kadar Total Dissolved Solids (TDS), kekeruhan (*turbidity*), serta suhu dan kandungan salinitas yang tidak sesuai standar operasional. Kualitas air yang buruk dapat menimbulkan korosi pada permukaan logam, pembentukan kerak dan deposit, serta terjadinya foaming atau priming, yang menyebabkan gangguan pada efisiensi perpindahan panas dan bahkan dapat merusak struktur boiler. Hal ini berdampak pada meningkatnya risiko kebocoran pipa, tekanan uap yang tidak stabil, dan pemborosan energi bahan bakar. Selain itu, kurangnya sistem monitoring otomatis berbasis data menyebabkan keterlambatan deteksi dan penanganan permasalahan. Oleh karena itu, pengembangan metode analisis kualitas air berbasis fuzzy logic dan penerapan sistem pemantauan terotomatisasi menjadi sangat relevan untuk mengatasi kompleksitas parameter dan menjaga ketel uap tetap dalam kondisi optimal [8].

Beberapa penelitian sebelumnya, terkait analisis kualitas air pada ketel uap antara lain adalah sebagai berikut:

Husnawati dkk tahun 2021 dalam penelitiannya menyatakan bahwa sebuah boiler yang beroperasi dengan kualitas air di luar standar yang ditetapkan akan menyebabkan masalah pada akhirnya. Oleh karena itu, penting untuk memantau kualitas air boiler dengan mengukur beberapa parameter seperti pH, alkalinitas, kekerasan (*hardness*), total dissolved solids (TDS), dan silika. Hal ini bertujuan untuk mencegah zat terlarut yang membahayakan terbawa dalam uap dan berpotensi menyebabkan masalah pada boiler [8].

Menurut Mus Mu'alim dkk tahun 2022 dalam penelitiannya Sistem Monitoring Boiler Air Berbasis IoT menyatakan bahwa setelah melalui beberapa

tahap dari perancangan, implementasi, pengujian, dan analisa hasil uji, diperoleh kesimpulan Alat monitoring berbasis IoT yang dibuat berfungsi secara baik untuk memonitoring level ketinggian air, suhu air, dan tekanan air boiler secara jarak jauh yang di tampilkan oleh *Firestore* di Android dengan tingkat kesalahan sensor suhu sebesar 0,42 % dan tingkat kesalahan sensor tekanan sebesar 0,026%. Dari beberapa penelitian terdahulu penelitian ini untuk memonitoring level ketinggian air boiler, suhu air boiler, dan tekanan air yang bisa dimonitoring jarak jauh menggunakan *Firestore*, dan mikrokontroler NucleoMCU ESP32 [4].

Selain merancang sistem monitoring untuk memantau kualitas air pengumpanan ketel uap, penting juga untuk mengevaluasi akurasi analisis kualitas air yang dilakukan. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah *fuzzy* Sugeno orde nol.

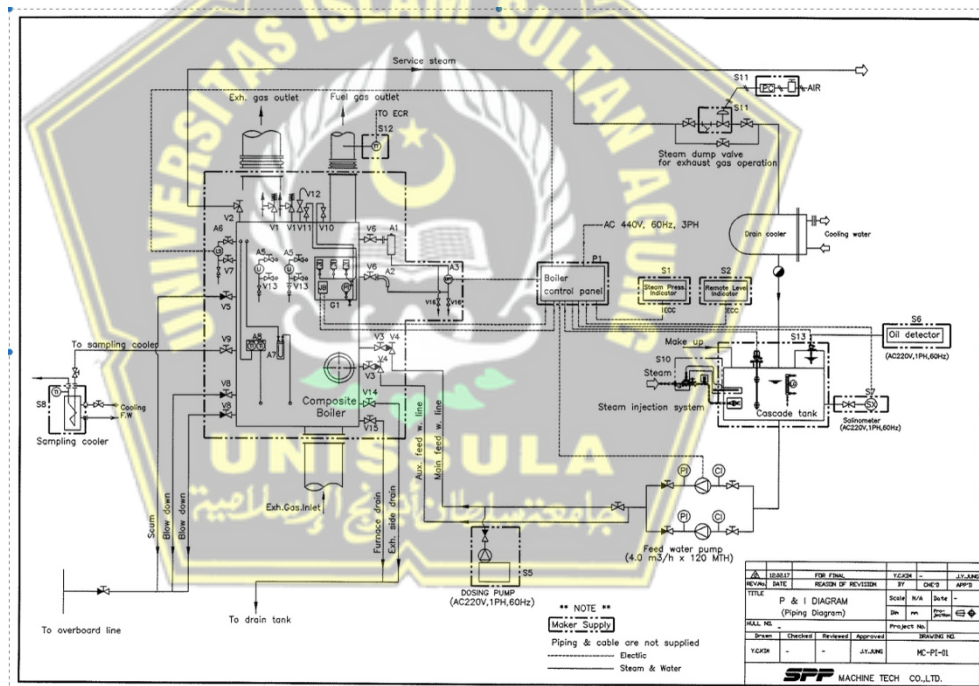
Metode ini merupakan salah satu teknik pemodelan matematis yang dapat digunakan untuk analisis data dengan variabel yang tidak pasti atau samar. Dalam penelitian ini, metode *fuzzy* Sugeno orde nol dapat digunakan untuk menghitung akurasi hasil analisis kualitas air pengumpanan ketel uap. Selain itu, penelitian terdahulu oleh Mus Mu'alim dkk tahun 2022 telah berhasil merancang sistem monitoring berbasis IoT untuk memantau level ketinggian air, suhu air, dan tekanan air boiler secara jarak jauh. Tingkat kesalahan sensor suhu dan tekanan yang dihasilkan sangat kecil, sehingga dapat diandalkan untuk melakukan monitoring kualitas air pengumpanan ketel uap bantu. Hal ini dapat membantu dalam menentukan langkah-langkah strategi yang tepat untuk memperbaiki dan meningkatkan kualitas air pengumpanan ketel uap.

Purnomo dkk tahun 2018 menyatakan perancangan sistem dengan menggunakan metode *fuzzy* membutuhkan beberapa proses sehingga terbentuknya suatu keputusan output dari sistem sesuai dengan perhitungan *fuzzy*. Proses tersebut antara lain proses fuzzifikasi, proses pembuatan rule, proses inferensi, dan proses defuzzifikasi [5].

2.1 Dasar Teori

a. Ketel Uap Kapal (Marine Steam Boiler)

Ketel Uap Kapal adalah perangkat permesinan bantu di atas kapal yang dirancang untuk menghasilkan uap bertekanan, yang digunakan dalam berbagai kebutuhan, seperti pemanas muatan, pemanas bahan bakar, pemanas ruang, serta sistem permesinan lainnya. Efisiensi dan keandalan sistem ketel uap sangat tergantung pada kualitas air pengisi yang digunakan. Air yang masuk ke dalam boiler harus memenuhi parameter standar tertentu seperti nilai pH yang netral hingga sedikit basa (sekitar 8.5–9.5), kadar garam terlarut (*Total Dissolved Solids, TDS*) yang rendah, kekeruhan yang minimal, dan suhu yang sesuai agar tidak menyebabkan gangguan pada proses pembentukan dan perpindahan uap.



Gambar 2.1 piping diagram ketel uap kapal (marine steam boiler)

Seperti pada diagram perpipaan diatas bahwa air pengumpan ketel bersirkulasi dalam sistem penghasil uap diatas kapal. Sirkulasi air dalam sistem dimulai dari tangki pengumpan air ketel atau cascade tank, selanjutnya dialirkan menuju ketel melalui pompa feed water. Setelah air masuk kedalam ketel maka proses penguapan terjadi melalui penyaluran panas kalor dari didalam ruang bakar ketel yang akan menghasilkan uap

bertekanan. Uap panas bertekanan hasil pembakaran digunakan untuk kebutuhan pemanasan bahan bakar, minyak lumas, pemanas air, pemanas ruangan, dan kebutuhan akomodasi lainnya. Uap bertekanan setelah digunakan tidak begitu saja dibuang kelaut atau keudara, namun akan disirkulasikan kembali menuju tangki air pengumpan ketel atau cascade tank yang dikondensasikan di dalam drain cooler [1].

Permasalahan umum yang terjadi pada ketel uap kapal sering kali disebabkan oleh kualitas air yang tidak sesuai standar, yang mengakibatkan berbagai efek negatif, seperti korosi internal, pembentukan kerak dan deposit, serta foaming atau priming. Korosi disebabkan oleh nilai pH yang terlalu rendah (air bersifat asam), sedangkan pembentukan kerak terjadi karena TDS yang tinggi, yang dapat menghambat perpindahan panas dan meningkatkan konsumsi bahan bakar. Foaming dan priming menyebabkan pembentukan gelembung uap berlebih dan air terbawa ke saluran uap, yang mengurangi efisiensi serta dapat merusak peralatan downstream [23].

Sumber atau penyebab terjadinya penurunan kualitas air ketel yaitu bermula didalam cascade tank. Fungsi cascade tank tidak hanya sebagai tangki penampung air sebelum dialirkan kedalam ketel, namun juga sebagai penentu baik atau buruknya air yang akan digunakan didalam sistem ketel uap diatas kapal. Berikut adalah visual dari cascade tank:



Gambar 2.2 Tangki air pengumpan ketel (cascade tank)

Cascade tank merupakan objek utama dalam penempatan alat pengukur kualitas air pengumpan ketel yang akan dirancang. Pada penelitian ini parameter pH, TDS, dan turbidity pada suhu tertentu ditempatkan didalam cascade tank tersebut. Menurut standar *APAVE (Association of Electrical and Steam Unit Owners)*, parameter pH air ketel uap harus dijaga ketat dalam rentang 7.5 hingga 10, untuk boiler tekanan rendah hingga menengah. Rentang ini dirancang untuk menyeimbangkan dua aspek kritis: mencegah korosi asam di bawah pH 7.5 dan menghindari masalah alkalinitas berlebih di atas pH 10. Pada pH terlalu rendah (<7.5), air bersifat korosif terhadap material logam seperti baja karbon, menyebabkan degradasi dinding boiler dan pelepasan gas hidrogen yang berbahaya. Sebaliknya, pH di atas 10 memicu risiko caustic embrittlement (retak kristalin akibat konsentrasi NaOH tinggi) dan pembentukan deposit kapur yang mengurangi efisiensi termal [2]. Standar kualitas air boiler menurut APAVE ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Working Pressure (Bar)								
	0 - 20.7	20.8 - 31.0	31.1 - 41.4	41.5 - 51.7	51.8 - 62.1	62.2 - 69.0	69.0 - 103.4	103.5 - 137.9
Feed water								
Dissolved oxygen (measured before oxygen scavenger addition)	0.04	0.04	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007
Total iron	0.1	0.05	0.03	0.025	0.02	0.02	0.01	0.01
Total copper	0.05	0.025	0.02	0.02	0.015	0.015	0.01	0.01
Total hardness (CaCO ₃)	mg/l	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.05	not detectable
Non volatile TOC	1	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2
Oily matter	1	1	0.5	0.5	0.5	0.2	0.2	0.2
pH at 25	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	7.5 - 10.0	8.5 - 9.5	9.0 - 9.6	9.0 - 9.6
Boiler Water								
Silica	150	90	40	30	20	8	2	1
Total alkalinity CaCO ₃	mg/l	350	300	250	200	150	100	not specified
Free hydroxide alkalinity CaCO ₃		not specified				not detectable		
Specific conductance at 25 without neutralization	mS/cm	3500	3000	2500	2000	1500	1000	150

Gambar 2.3 Standar kualitas air boiler menurut APAVE (Association of electrical and steam unit owners)

APAVE merekomendasikan penggunaan kombinasi phosphate treatment (Na_3PO_4) untuk menstabilkan pH dan mengikat mineral penyebab scaling, serta controlled blowdown untuk membuang kelebihan padatan terlarut. Pemantauan harus dilakukan secara kontinu dengan pH meter yang dikalibrasi rutin, karena fluktuasi kecil sekalipun dapat berdampak signifikan pada kinerja boiler. Standar ini selaras dengan panduan EN 12953-10 Eropa, meskipun lebih ketat dibanding ASME yang mengizinkan pH hingga 11 untuk sistem tertentu. Kasus lapangan menunjukkan boiler dengan pH 6.8 mengalami korosi parah hanya dalam 3 bulan, sementara pH 11.2 menyebabkan retak mikro pada sambungan pipa. Dengan demikian, menjaga pH dalam rentang APAVE tidak hanya memperpanjang umur peralatan tetapi juga mengoptimalkan transfer panas dan keamanan operasional.

ABMA for Water Tube Boilers

	Drum pressure, psig	Total dissolved solids ^b in boiler water, ppm (max.)	Total Alkalinity ^c in boiler water, ppm	Suspended solids in boiler water, ppm (max.)	Total dissolved solids ^{c,e} in steam, ppm (max. expected value)
Drum-type boilers	0-300	700-3500	140-700	15	0.2-1.0
	301-450	600-3000	120-600	10	0.2-1.0
	451-600	500-2500	100-500	8	0.2-1.0
	601-750	200-2000	40-400	3	0.1-0.5
	751-900	150-1500	30-300	2	0.1-0.5
	901-1000	125-1250	25-250	1	0.1-0.5
	1001-1800	100	variable ^d	1	0.1
	1801-2350	50	variable ^d	N/A	0.1
	2351-2800	25	variable ^d	N/A	0.05
	2801-2900	15	variable ^d	N/A	0.05
Once-through boilers	1400 & above	0.05	N/A	N/A	0.05

Gambar 2.4 Standar kualitas air ketel menurut ABMA (American Boiler Manufacturer Association)

Berdasarkan standar kualitas air ketel menurut ABMA (American Boiler Manufacturer Association) bahwa kadar TDS pada air ketel yaitu pada rentang 700-3500 secara maksimum. Namun kadar TDS pada satuan ukur tersebut dapat dipengaruhi oleh rentang standar drum pressure ketel tersebut. Dimana ketel uap dengan drum pressure yang lebih rendah memiliki risiko lebih besar penurunan kualitas airnya dengan rentang TDS 700-3500 dibandingkan dengan ketel uap dengan drum pressur yang lebih

tinggi. Terkait hal tersebut maka kadar TDS terbaik adalah kandungan TDS paling rendah dalam air [3].

Selanjutnya parameter yang tak kalah penting dalam kualitas air ketel yaitu Turbidity atau kekeruhan. Kekeruhan air pada air boiler dapat terjadi jika air ketel tercampur dengan partikel-partikel berupa pasir, lumpur, tanah liat, fitoplankton, zooplankton, kotoran hewan, dan sebagainya. Sehingga mengetahui hasil pengukuran tingkat kekeruhan air dapat digunakan sebagai deteksi awal adanya penurunan kualitas air pada ketel uap. Cascade tank memiliki standar turbidity yaitu dibawah 3 NTU yang mana jika melebihi standar tersebut dapat diartikan menyebabkan kurangnya efektivitas koagulasi dan flokulasi sehingga kekeruhan air tinggi[4]

b. Internet of Things (IoT)

Internet of Things merupakan bentuk koneksi suatu perangkat yang saling terhubung dan mampu menghasilkan suatu informasi yang dapat diakses dan digunakan oleh manusia atau sistem lainnya [9]. Teknologi ini sudah banyak dilakukan pada penelitian sebelumnya khususnya dalam rangka monitoring menggunakan sensor-sensor. Konsep Internet of Things (IoT) digunakan dalam penelitian ini karena dianggap dapat mempermudah dalam monitoring kualitas air pengumpan ketel yang tak terbatas ruang dan dapat dilakukan dalam jarak jauh [10].

c. Modul sensor pH E-BNC

potential of Hydrogen atau pH merupakan derajat keasaman yang menyatakan nilai keasaman atau kebasaan pada suatu larutan. Alat ukur derajat keasaman (pH meter) adalah sebuah alat elektronik yang digunakan untuk mengukur pH (derajat keasaman atau kebasaan) dari suatu cairan [11]. Alat ukur kadar keasaman (pH meter) biasa terdiri dari probe pengukuran yang terhubung pada sebuah alat elektronik yang mengukur dan menampilkan nilai pH.



Gambar 2.5 Sensor pH BNC

d. Modul Sensor Suhu DS18B20

Sensor suhu DS18B20 adalah sensor suhu yang memiliki keluaran digital. DS18B20 memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi, yaitu $0,5^{\circ}\text{C}$ pada rentang suhu -10°C sampai $+85^{\circ}\text{C}$ [12].



Gambar 2.6 Sensor suhu DS18B20

Sensor suhu pada umumnya membutuhkan ADC dan beberapa pin port pada mikrokontroler, namun DS18B20 tidak membutuhkan ADC agar dapat berkomunikasi dengan mikrokontroler dan hanya membutuhkan 1 wire saja [12].

e. Modul sensor salinitas / TDS

Sensor salinitas merupakan alat yang digunakan untuk mendeteksi atau mengukur suatu besaran fisis. Sensor salinitas yaitu 2 elektroda yang dicelupkan pada suatu larutan (yang mengandung kadar garam) dan kemudian dialiri arus listrik. Daya hantar listrik larutan ini yang kemudian akan menjadi masukan pada rangkaian ADC [13].

TDS atau *Total Dissolved Solid* yaitu jumlah zat terlarut (baik itu zat organik maupun anorganik) yang terdapat pada sebuah larutan. TDS menggambarkan jumlah zat terlarut dalam *part per million* (ppm) atau sama dengan milligram per liter (mg/L) [3].



Gambar 2.7 Sensor salinitas/TDS

f. Modul sensor kekeruhan (*turbidity sensor*)

Sensor kekeruhan bekerja dengan fisis sinar infrared dipancarkan oleh LED kemudian sinar infrared tersebut akan melalui air dan ditangkap oleh fototransistor. Intensitas yang diterima oleh fototransistor berbanding lurus dengan tingkat kekeruhan dari air [14].



Gambar 2.8 Sensor kekeruhan
(turbidity)

g. Mikrokontroller NodeMCU ESP32

NodeMCU ESP32 adalah sebuah *platform* IoT (Internet of Things) yang bersifat opensource. Terdiri dari perangkat keras berupa System On Chip ESP32 dari ESP32 buatan Espressif System, juga firmware yang digunakan, yang menggunakan Bahasa pemrograman scripting lua. NodeMCU dapat dianalogikan sebagai board arduino-nya ESP32, namun NodeMCU telah digabungkan dengan ESP32 ke dalam sebuah board yang kompak dengan berbagai fitur layaknya mikrokontroler + kapabilitas akses terhadap Wifi juga chip komunikasi USB to serial, sehingga untuk memprogramnya hanya diperlukan ekstensi kabel data USB persis yang digunakan sebagai kabel data, kabel *charging mobile Android* [15].



Gambar 2.9 Mikrokontroller
NodeMCU ESP32

h. Firebase

Firebase adalah sebuah layanan server yang digunakan untuk mendukung project Internet of Things (IoT) [14]. Layanan server ini memiliki lingkungan mobile user baik Android maupun iOS. *Firebase* Aplikasi sebagai pendukung IoT dapat diunduh melalui Google Play untuk pengguna Android dan melalui App Store bagi pengguna iOS. *Firebase* adalah dashborad digital dengan fasilitas antarmuka grafis dalam pembuatan projectnya [16].

i. Metode Fuzzy Sugeno

Fuzzy Sugeno atau dikenal juga sebagai model Takagi-Sugeno-Kang adalah salah satu metode *fuzzy* yang digunakan untuk memodelkan

sistem dinamis dengan menggunakan beberapa aturan *fuzzy*. Metode ini dinamakan demikian karena dikembangkan oleh tiga orang peneliti, yaitu Takagi, Sugeno, dan Kang pada tahun 1985 [17]. Metode *fuzzy* Sugeno adalah salah satu teknik pemodelan matematis yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara beberapa variabel input dan output yang saling berkaitan dan memiliki tingkat ketidakpastian atau keambiguan dalam hubungannya.

Dasar dari metode *fuzzy* Sugeno adalah teori *fuzzy* yang memperkenalkan konsep variabel linguistik yang memungkinkan nilai numerik untuk diwakili oleh istilah-istilah linguistik atau kata-kata yang dapat dimengerti oleh manusia. Istilah-istilah ini dapat dinyatakan dalam bentuk himpunan *fuzzy* yang memungkinkan tingkat keanggotaannya dalam himpunan *fuzzy*. Konsep himpunan *fuzzy* memungkinkan untuk memetakan nilai numerik menjadi tingkat keanggotaan dalam himpunan *fuzzy*. Tingkat keanggotaan ini dapat dinyatakan dalam nilai probabilitas atau derajat kepastian.

Fuzzy Sugeno menggunakan beberapa aturan *fuzzy* dalam menghubungkan beberapa variabel input dengan beberapa variabel output. Aturan-aturan *fuzzy* ini diwakili oleh himpunan *fuzzy* yang terdiri dari nilai-nilai input dan output. Aturan *fuzzy* ini terdiri dari beberapa bagian, yaitu kondisi (premises), implikasi (consequence), dan bobot (weight). Kondisi atau premis menggambarkan kondisi yang harus dipenuhi untuk mengaktifkan aturan *fuzzy* tersebut. Implikasi atau consequence menggambarkan hubungan antara variabel input dan output. Bobot atau weight menggambarkan bobot atau nilai penting dari aturan *fuzzy* tersebut [18].

Fuzzy Sugeno dapat diwakili dalam bentuk sistem aturan *fuzzy* dengan bentuk umum sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \text{IF } x_1 \text{ is } A_1 \text{ and } x_2 \text{ is } A_2 \text{ and } \dots \text{and } x_n \text{ is } A_n \text{ THEN } y \\ & = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned}$$

dengan:

$x_1, x_2, \dots, x_n$ adalah variabel input yang memiliki nilai dalam himpunan fuzzy $A_1, A_2, \dots, A_n$

y adalah variabel output

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ adalah fungsi implikasi yang menghubungkan variabel input dan output

Bentuk umum sistem aturan fuzzy ini sering disebut sebagai "mamdani-type" atau "if-then" rule. Namun, pada fuzzy Sugeno, fungsi implikasi dinyatakan dalam bentuk linear, sehingga dapat diwakili dalam bentuk persamaan linear. Persamaan linear ini dapat dinyatakan dalam bentuk umum sebagai berikut:

$$y = p_0 + p_1 x_1 + p_2 x_2 + \dots + p_n x_n$$

dengan:

y adalah variabel output

$x_1, x_2, \dots, x_n$ adalah variabel input

$p_0, p_1, p_2, \dots, p_n$ adalah bobot atau nilai penting dari aturan fuzzy yang bersesuaian dengan setiap variabel input.

Metode Fuzzy Sugeno memiliki kelebihan dalam pengolahan data dengan banyak variabel input dan output. Metode Fuzzy Sugeno merupakan metode yang cukup populer dalam pengambilan keputusan berbasis logika fuzzy. Metode ini memiliki kelebihan dalam pengolahan data dengan banyak variabel input dan output, mudah diinterpretasikan, dan memberikan hasil yang cukup akurat.

BAB III

METODE PENELITIAN

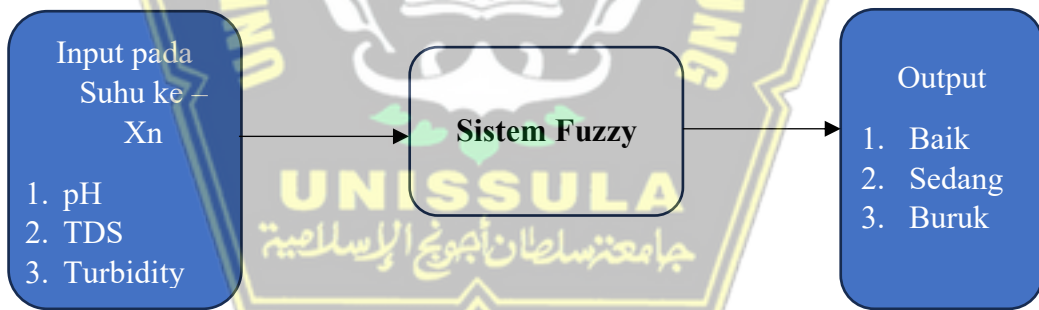
Pada umumnya metode penelitian adalah cara ilmiah untuk mendapatkan data dengan tujuan hasil penelitian dapat tercapai dan dapat digunakan [19]. Pada bab metode penelitian ini berisikan tentang model penelitian, gambar rangkaian alat dan bahan penelitian, penentuan variabel input *Fuzzy logic*, penerapan metode Sugeno, dan penentuan hasil output.

3.1 Model Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam analisis kualitas air pengumpanan ketel uap pada kapal menggunakan metode *fuzzy*, yaitu :

a. Perancangan sistem dan model

Perancangan sistem dan model dalam analisis kualitas air pengumpanan ketel uap menggunakan metode *fuzzy* dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3.1 Perancangan sistem dan model

b. Studi pendahuluan

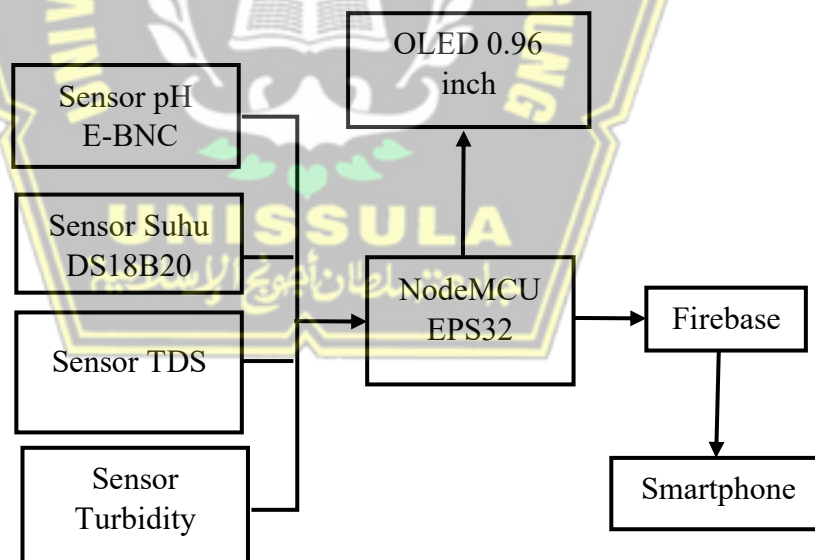
Studi pendahuluan dilakukan untuk menganalisis perancangan alat monitoring air pengumpanan ketel uap dan mengevaluasi alat yang sudah dirancang menggunakan *Fuzzy Sugeno*. Tahap ini juga merupakan langkah awal penelitian yang dalam menentukan permasalahan, dilanjutkan dengan perumusan masalah.

c. Data kepustakaan

Guna memperoleh landasan teori yang berkaitan dengan materi yang menjadi pembahasan dalam penelitian penelitian. Maka penelitian selayaknya melakukan kajian-kajian terhadap penelitian sebelumnya [20].

d. Perencanaan Hardware

Untuk perencanaan hardware alat monitoring menggunakan sensor pH E-BNC, sensor suhu DS18B20, sensor salinitas(TDS), dan sensor *turbidity* serta NodeMCU ESP32. Sensor ds18b20 untuk mengetahui nilai suhu di dalam air pengumpan ketel uap, sensor TDS untuk mengetahui nilai salinitas atau kadar garam yang berada di dalam air pengumpan ketel uap bantu, sensor *turbidity* digunakan untuk memonitoring tingkat kekeruhan air pengumpan ketel uap bantu yang berada di dalam ketel uap. NodeMCU ESP32 akan menerima data dari semua sensor yang ada dan diproses yang hasilnya akan ditampilkan pada OLED 0.96 INCH dan dikirim ke *Firebase* untuk ditampilkan di smartphone.



Gambar 3.2 Perencanaan Hardware

e. Perancangan Software

Perancangan software adalah untuk membuat program yang bisa mengolah data dari sensor yang telah ada yang menghasilkan nilai suhu,

pH, kekeruhan dan salinitas yang akan dikirimkan ke *Firestore* untuk dipantau [21].

f. Pengumpulan Data

Pada langkah pengumpulan data, dilakukan proses pengumpulan data dengan menggunakan metode penarikan data primer dari sensor-sensor pada alat monitoring air pengumpan ketel dalam menganalisis kualitas air pengumpan ketel uap, sehingga dapat diperoleh data dan informasi yang dibutuhkan untuk penelitian.

3.2 Langkah-langkah metode *fuzzy*

Berikut adalah langkah-langkah analisis kualitas air menggunakan metode fuzzy dengan input berupa kekeruhan, salinitas, dan pH, serta output berupa kualitas air:

3.2.1 Penentuan Variabel Input dan Output

Langkah pertama adalah menentukan variabel input dan output dalam sistem fuzzy. Dalam konteks ini, variabel input terdiri dari: Kekeruhan (NTU), Salinitas (%), dan pH. Sedangkan variabel output adalah kualitas air dengan kategori Baik, Sedang, dan Buruk.

3.2.2 Fuzzifikasi

Proses ini mengubah data input numerik menjadi derajat keanggotaan berdasarkan fungsi keanggotaan (membership function). Untuk masing-masing input, didefinisikan beberapa kategori linguistik:

Kekeruhan: Rendah, Sedang, Tinggi

Salinitas: Rendah, Sedang, Tinggi

pH: Rendah, Sedang, Tinggi

Setiap kategori memiliki bentuk fungsi keanggotaan yaitu trapesium yang dirancang berdasarkan rentang data empiris.

3.2.3 Pembentukan Aturan Fuzzy (Rule Base)

Aturan if-then disusun untuk menghubungkan kombinasi input dengan output. Contoh:

IF kekeruhan rendah AND salinitas rendah AND pH sedang THEN kualitas air baik

Setiap kombinasi menghasilkan satu aturan yang menunjukkan tingkat kepercayaan terhadap klasifikasi tertentu.

3.2.4 Inferensi Fuzzy (Fuzzy Inference System)

Sistem inferensi fuzzy Sugeno digunakan untuk mengolah aturan fuzzy yang aktif berdasarkan derajat keanggotaan input. Pada metode Sugeno, output dari setiap aturan berupa nilai konstan dalam range 0-1 (dalam penelitian ini digunakan nilai output 0.2 untuk buruk, 0.5 untuk sedang, 0.8 untuk baik).

3.2.5 Penentuan Output (Defuzzifikasi)

Untuk metode Sugeno, digunakan metode Weighted Average, yaitu:

$$Output = \frac{\sum(\alpha_i \cdot z_i)}{\sum \alpha_i} \quad (3.1)$$

Di mana:

α_i adalah nilai *firing strength* aturan ke- i

z_i adalah output konstan dari aturan ke- i

3.2.6 Interpretasi Hasil

Nilai output akhir yang diperoleh dibandingkan dengan skala kualitas air. Nilai yang mendekati 0.8 menunjukkan air berkualitas baik, nilai sekitar 0.5 menunjukkan kualitas sedang, dan nilai yang mendekati 0.2 menunjukkan kualitas buruk.

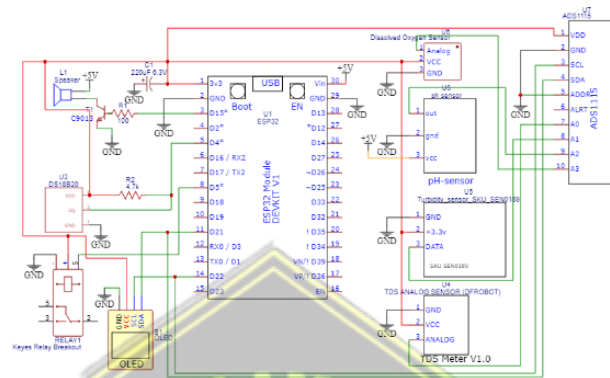
3.2.7 Penghitungan akurasi

Performa sistem fuzzy dapat dievaluasi menggunakan akurasi klasifikasi berdasarkan hasil output dibandingkan dengan label kualitas air aktual. Rumus akurasi adalah:

$$Akurasi = \frac{\text{Jumlah prediksi benar}}{\text{Jumlah data}} \times 100\% \quad (3.2)$$

3.3 Rancangan Schematic Alat Ujicoba

Rancangan schematic diperlukan agar dapat lebih mudah proses identifikasi ketika terjadi kesalahan dan terjadi noise kabel/sumber tegangan dari prototype yang akan dirancang yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.3 Schematic Rancangan Alat Monitoring Kualitas Air

Sebelum masuk ke tahap uji coba alat maka dilakukan pengkodean / pemrograman untuk diinput kedalam Microcontroller ESP32 dengan memasukkan library yang dibutuhkan seperti `<ESP32Firebase.h>`. Setelah memasukkan library yang dibutuhkan seperti `<ESP32Firebase.h>` untuk melakukan koding integrasi sensor suhu, sensor pH, sensor turbidity, dan sensor TDS (salinitas) ke dalam microcontroller ESP32, langkah selanjutnya adalah menulis kode untuk membaca data dari masing-masing sensor dan mengirimkannya ke *Firebase*.

Langkah awal yaitu menginisialisasi sensor-sensor tersebut dan memastikan bahwa seluruh sensor terhubung dengan benar ke pin-pin yang ditentukan pada ESP32. Setelah itu, menulis kode untuk membaca data dari masing-masing sensor secara berkala. Untuk sensor suhu, dapat menggunakan sensor seperti DS18B20. Menggunakan library OneWire dan DallasTemperature untuk membaca data dari sensor ini. Berikut adalah contoh kode untuk membaca data suhu dari sensor DS18B20:

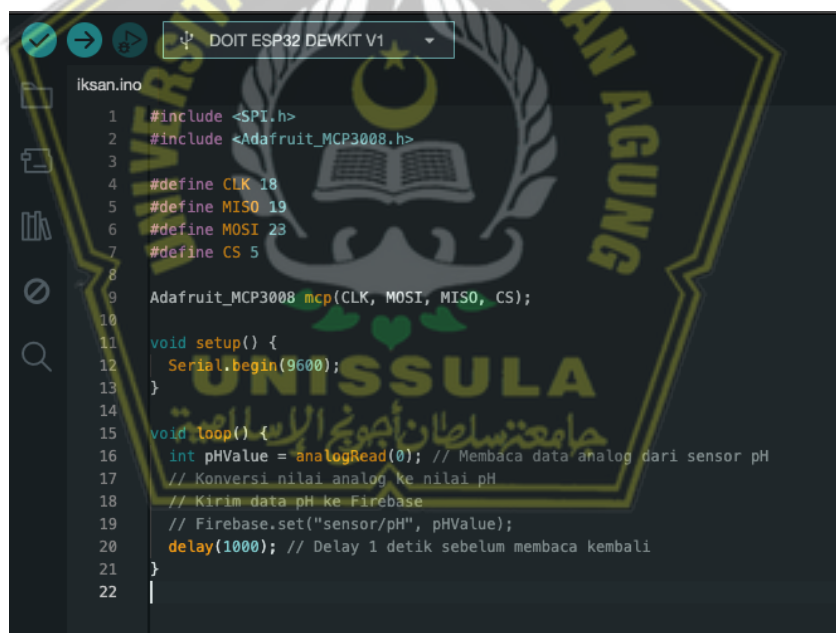
```

1  #include <OneWire.h>
2  #include <DallasTemperature.h>
3
4  #define ONE_WIRE_BUS 2 // Define pin untuk sensor suhu
5
6  OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
7  DallasTemperature sensors(&oneWire);
8
9  void setup() {
10     sensors.begin();
11 }
12
13 void loop() {
14     sensors.requestTemperatures(); // Meminta pembacaan suhu
15     float temperature = sensors.getTempCByIndex(0); // Mendapatkan suhu dalam derajat Celsius
16     // Kirim data suhu ke Firebase
17     // Firebase.set("sensor/suhu", temperature);
18     delay(1000); // Delay 1 detik sebelum membaca kembali
19 }
20

```

Gambar 3.4 Koding Kalibrasi Data Sensor Suhu

Selanjutnya, untuk sensor pH, memerlukan sensor pH dan papan antarmuka seperti MCP3008 untuk membaca data analog dari sensor pH. Berikut adalah contoh kode untuk membaca data pH menggunakan MCP3008:



```

1  #include <SPI.h>
2  #include <Adafruit_MCP3008.h>
3
4  #define CLK 18
5  #define MISO 19
6  #define MOSI 23
7  #define CS 5
8
9  Adafruit_MCP3008 mcp(CLK, MOSI, MISO, CS);
10
11 void setup() {
12     Serial.begin(9600);
13 }
14
15 void loop() {
16     int pHValue = analogRead(0); // Membaca data analog dari sensor pH
17     // Konversi nilai analog ke nilai pH
18     // Kirim data pH ke Firebase
19     // Firebase.set("sensor/pH", pHValue);
20     delay(1000); // Delay 1 detik sebelum membaca kembali
21 }
22

```

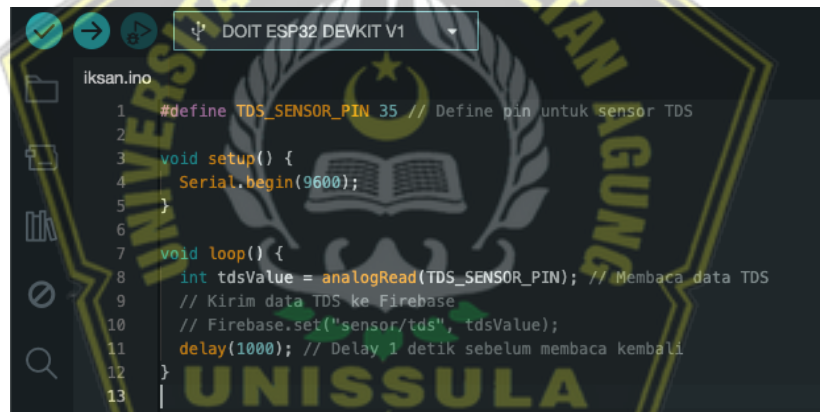
Gambar 3.5 Koding Kalibrasi Sensor pH

Selanjutnya, untuk sensor turbidity, peneliti menggunakan sensor turbidity seperti TSD-10. Sensor ini biasanya memberikan keluaran analog yang dapat dibaca menggunakan pin analog ESP32. Berikut adalah contoh kode untuk membaca data turbidity:



Gambar 3.6 Koding Kalibrasi Sensor Turbidity (Kekeruhan)

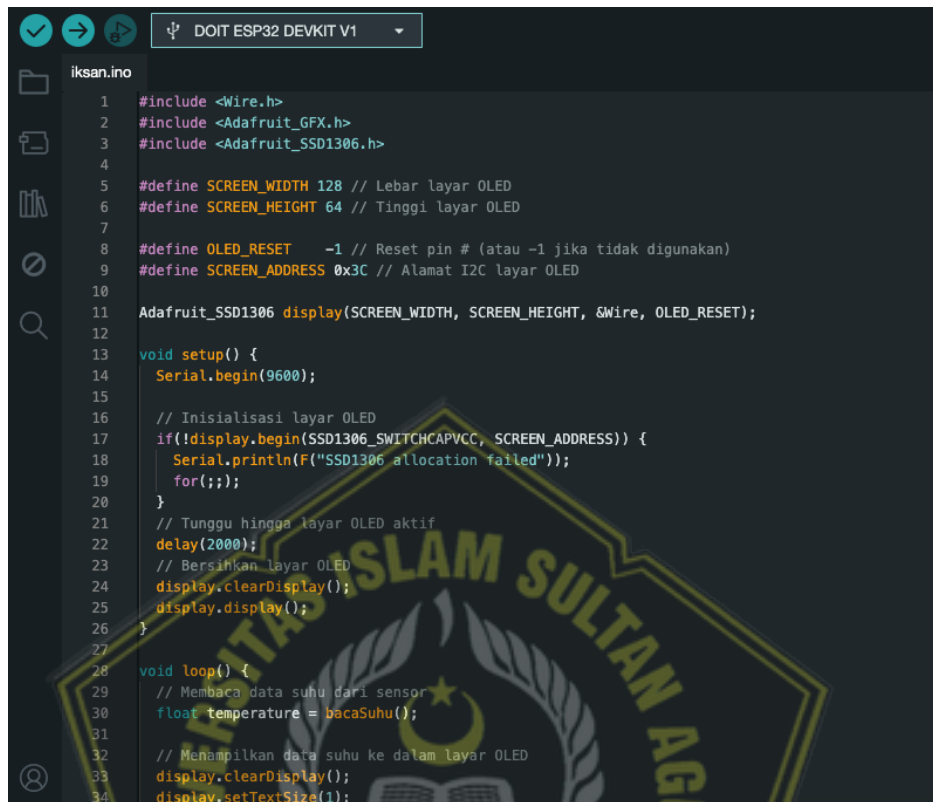
Terakhir, untuk sensor TDS (salinitas), peneliti menggunakan sensor TDS seperti *Gravity: Analog TDS Sensor/Meter for Arduino*. Sensor ini juga memberikan keluaran analog yang dapat dibaca menggunakan pin analog ESP32. Berikut adalah contoh kode untuk membaca data TDS:



Gambar 3.7 Koding Kalibrasi Sensor TDS (Salinitas)

Selain menambahkan logika tambahan di dalam loop() untuk memproses data, dapat menampilkan informasi sensor secara langsung menggunakan sebuah OLED 0.96 INCH OLED display 0.96 Inch. Display ini dapat memberikan tampilan yang nyaman untuk memantau data sensor secara *real-time* secara lokal. Untuk mengintegrasikan OLED 0.96 INCH OLED display ke dalam proyek, peneliti menambahkan library yang sesuai ke dalam kode tersebut. Salah satu library yang umum digunakan untuk OLED 0.96 INCH OLED display adalah library "Adafruit SSD1306". Setelah menambahkan library tersebut, peneliti membuat kode untuk menampilkan data sensor ke dalam display. Berikut adalah

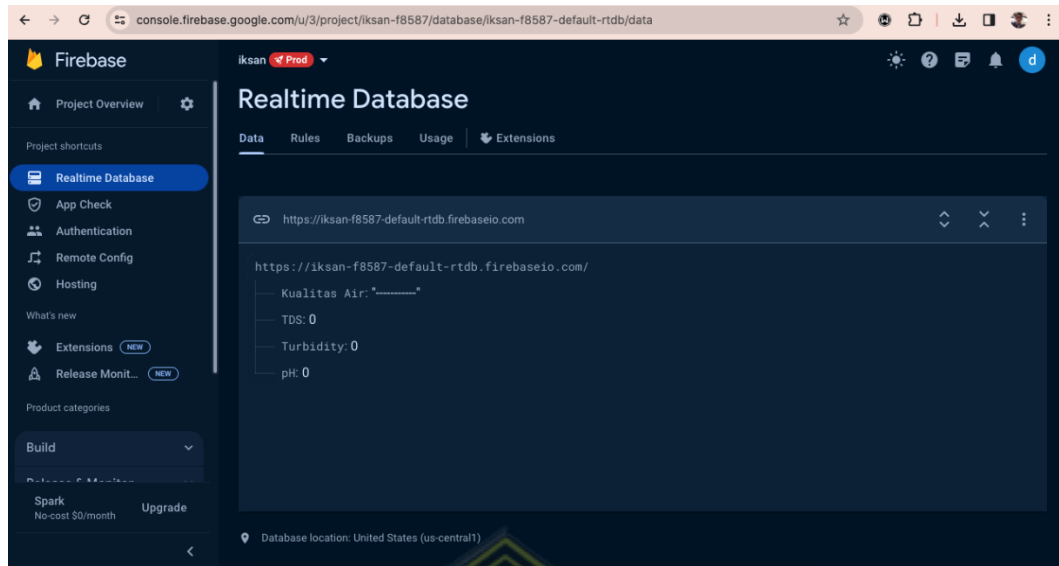
contoh kode untuk menampilkan data suhu ke dalam OLED 0.96 INCH OLED display:



```
1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_GFX.h>
3 #include <Adafruit_SSD1306.h>
4
5 #define SCREEN_WIDTH 128 // Lebar layar OLED
6 #define SCREEN_HEIGHT 64 // Tinggi layar OLED
7
8 #define OLED_RESET -1 // Reset pin # (atau -1 jika tidak digunakan)
9 #define SCREEN_ADDRESS 0x3C // Alamat I2C layar OLED
10
11 Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);
12
13 void setup() {
14   Serial.begin(9600);
15
16   // Inisialisasi layar OLED
17   if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, SCREEN_ADDRESS)) {
18     Serial.println(F("SSD1306 allocation failed"));
19     for(;;);
20   }
21   // Tunggu hingga layar OLED aktif
22   delay(2000);
23   // Bersihkan layar OLED
24   display.clearDisplay();
25   display.display();
26 }
27
28 void loop() {
29   // Membaca data suhu dari sensor
30   float temperature = bacaSuhu();
31
32   // Menampilkan data suhu ke dalam layar OLED
33   display.clearDisplay();
34   display.setTextSize(1);
```

Gambar 3.8 Kalibrasi OLED 0.96 Inch Display

Dalam contoh kode di atas, peneliti menggunakan fungsi `bacaSuhu()` sebagai *placeholder* untuk membaca data suhu dari sensor. Fungsi ini perlu diimplementasikan sesuai dengan kode untuk membaca data suhu dari sensor yang telah dibahas sebelumnya. Selanjutnya, peneliti menyesuaikan kode tersebut untuk menampilkan data dari sensor pH, turbidity, dan TDS ke dalam layar OLED dengan menambahkan bagian yang sesuai di dalam `loop()`. Dengan menambahkan OLED 0.96 INCH OLED display ke dalam proyek, peneliti membuat sistem monitoring yang lebih interaktif dan dapat memberikan informasi secara langsung tanpa perlu mengakses aplikasi atau web *Firestore* untuk selanjutnya masuk ke tahap Uji Coba komponen sensor, Display dan *platform* IoT yaitu *Firestore*.



Gambar 3.9 Tampilan Firebase Realtime Database

Hasil uji coba alat dilakukan dengan monitoring sensor menggunakan *Firebase IoT* agar lebih akurat dalam waktu sensing. Penggunaan *Firebase IoT* monitoring dapat mempermudah dan memberikan langkah monitoring secara real time antara Suhu dan 3 variabel input lainnya. Monitoring sensor menggunakan *Firebase IoT* data *Realtime* akan tersaji dengan bentuk data logger yang akan dikirim pada *Firebase IoT* server yang mana dapat digunakan dan diolah menjadi bentuk data input fuzzy dan menggunakan logaritma tersusun agar penggunaan fuzzy pada sistem dapat diklasifikasi hasil output nya menjadi bentuk data Kualitas Air. Hasil uji coba alat monitoring kualitas air menunjukkan keberhasilan dalam merancang prototype yang stabil dan bebas dari gangguan kabel jumper. Dengan merangkai komponen-komponen secara hati-hati, kestabilan hasil sensing dapat dicapai, sementara gangguan noise kabel jumper dapat diminimalkan, sehingga meningkatkan akurasi pengukuran. Selanjutnya, dalam proses uji coba alat ini dipasang dengan sensor yang memonitor beberapa variabel kualitas air, termasuk suhu dan tiga variabel input lainnya. Monitoring dilakukan dengan menggunakan platform *Firebase IoT*, yang memungkinkan pengguna untuk memantau hasil sensing secara *real-time*.

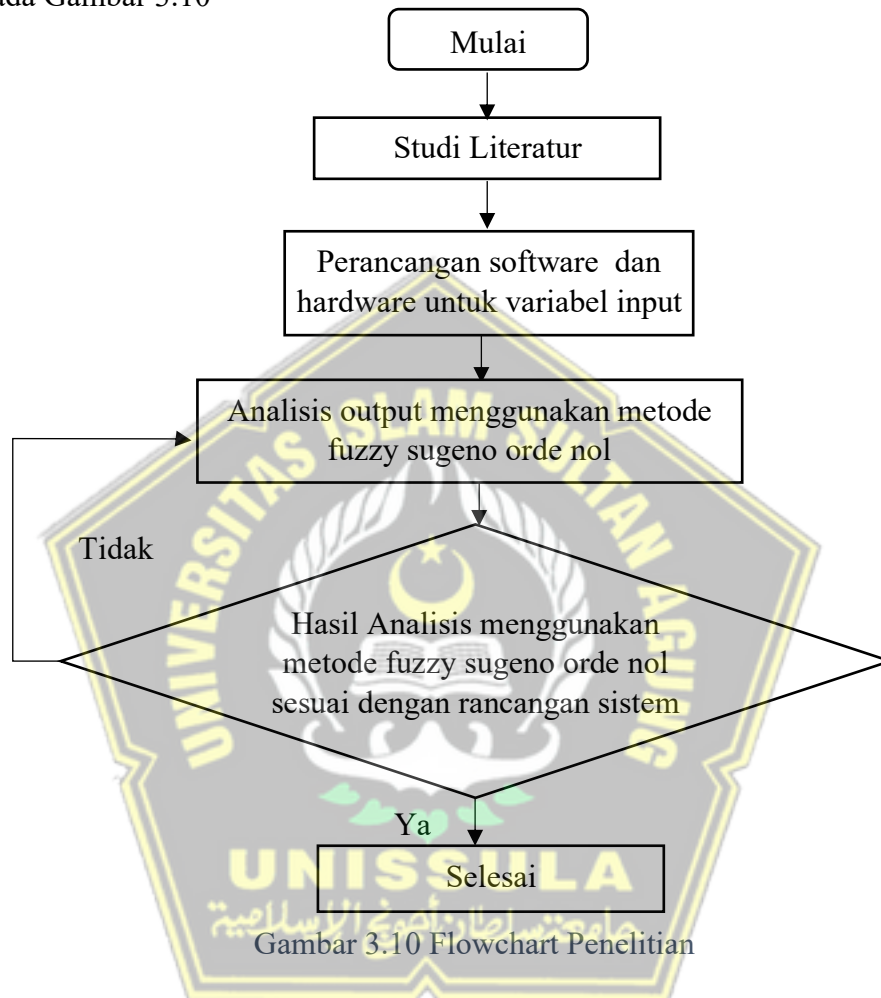
Tabel 3.1 Tabel Waktu Respon Platform Monitoring

No	Variabel	Waktu Respon <i>Firestore</i> IoT (detik)	Waktu Respon OLED (detik)	Selisih Waktu (detik)
1	Sensor pH	4.7 ±	4.2 ±	0.5 ±
2	Sensor TDS	6.1 ±	5.5 ±	0.6 ±
3	Sensor Kekeruhan	5.2 ±	4.8 ±	0.4 ±

Penggunaan alat monitoring kualitas air ini melibatkan percobaan dengan membandingkan waktu respon antara *platform Firestore* IoT dan OLED. Waktu respon menjadi faktor krusial dalam mengevaluasi performa alat, terutama dalam mendapatkan data secara *real-time*. Pada Tabel 3.6, terdapat hasil waktu respon untuk tiga variabel input utama, yaitu pH, TDS (*Total Dissolved Solids* atau salinitas), dan kekeruhan,. Hasil uji coba menunjukkan bahwa *Firestore* IoT memberikan waktu respon yang relatif cepat, dengan nilai mencapai 5.2 detik untuk sensor kekeruhan, 6.1 detik untuk sensor TDS, dan 4.7 detik untuk sensor pH. Di sisi lain, penggunaan OLED sebagai *platform* monitoring menunjukkan waktu respon yang kompetitif, yakni 4.8 detik, 5.5 detik, dan 4.2 detik untuk masing-masing variabel input. Selisih waktu respon antara *Firestore* IoT dan OLED dapat dilihat pada kolom terakhir. Meskipun terdapat perbedaan, namun hasil selisih waktu ini masih dapat diterima dan tidak signifikan. Dalam banyak konteks, penggunaan OLED sebagai *platform* monitoring memberikan keuntungan tersendiri, terutama dalam hal ketersediaan data *real-time* dan kemudahan penggunaan tanpa memerlukan akses ke internet server seperti pada *Firestore* IoT.

3.4 Research Flowchart

Prinsip kerja analisis kualitas air pengumpanan ketel uap pada kapal menggunakan metode *fuzzy* ini secara umum dapat dijelaskan dalam bagan alur pada Gambar 3.10

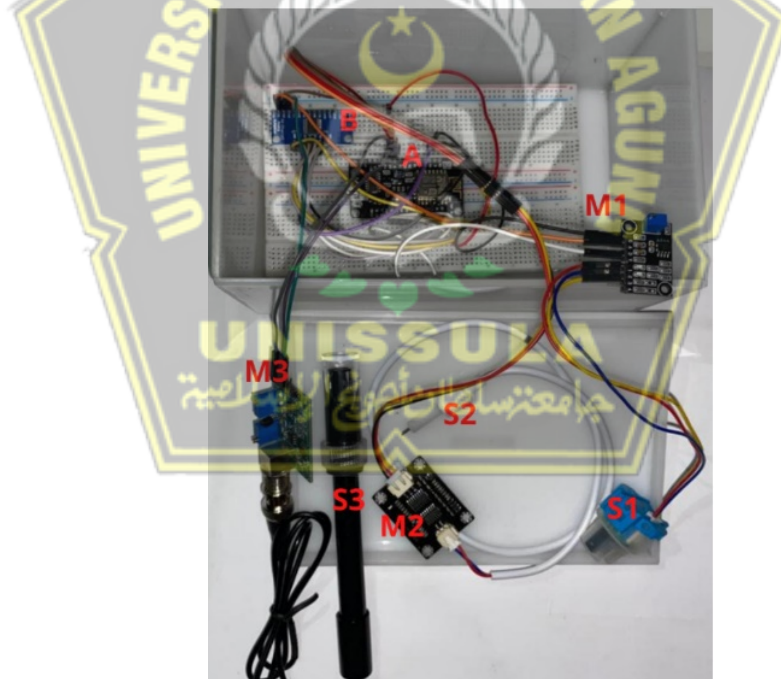


Gambar 3.10 Flowchart Penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini mengungkapkan hasil dan pembahasan dari metode penelitian yang telah diuraikan pada bab sebelumnya. Perancangan alat secara prototype dilakukan dengan merangkai dalam Project Board agar memudahkan dalam perangkaian dan pengujian karena dapat terlihat dengan jelas setiap inputnya. Gambar 4.1 menampilkan tampilan fisik dari prototype. Integrasi komponen-komponen secara hati-hati memastikan kestabilan hasil sensing, sementara pengurangan gangguan noise dari kabel jumper dapat meningkatkan akurasi pengukuran. Hasil dari uji coba ini menunjukkan bahwa alat monitoring kualitas air ini dapat berfungsi dengan baik, dan pemilihan platform monitoring, baik Firebase IoT maupun OLED, dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna.



Gambar 4.1 Prototype Alat Monitoring Kualitas Air

Pada Gambar 4.1 menunjukkan sebuah sistem monitoring kualitas air berbasis mikrokontroler, yang terdiri dari beberapa sensor dan modul. Berikut penjelasan dari masing-masing komponen yang diberi label pada gambar:

Tabel 4.1 Penjelasan Komponen Alat Analisis Kualitas Air

Label	Nama Komponen	Fungsi/Deskripsi
A	NodeMCU ESP32	Mikrokontroler utama yang mengontrol sistem dan mengirim data sensor ke server/cloud melalui WiFi.
B	Modul Relay	Mengontrol perangkat eksternal
S1	Sensor turbidity	Memancarkan sinar infrared yang melalui air dan ditangkap oleh fototransistor yang akan berbanding lurus dengan tingkat kekeruhan air.
S2	Sensor TDS (Total Disolved Solid)	Mengukur jumlah zat terlarut yang terdapat pada sebuah larutan.
S3	Sensor pH Air	Mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air untuk pemantauan kualitas air.
M1	Modul Konverter Analog ke Digital (ADC)	Mengubah sinyal analog dari sensor menjadi sinyal digital yang bisa dibaca oleh mikrokontroler.
M2	Modul Antarmuka TDS	Modul pembaca dan penguat sinyal dari sensor TDS.
M3	Modul Antarmuka pH	Modul penghubung sensor pH dengan mikrokontroler; dilengkapi penguat dan kalibrasi.

Setiap komponen yang terhubung dalam sistem menggunakan breadboard sebagai media distribusi daya dan sinyal. Jalur koneksi dirancang agar mendukung komunikasi antara sensor, modul antarmuka, dan mikrokontroler secara efisien. Berikut penjelasan lebih lanjut:

1. Breadboard sebagai Penghubung:
 - a. Breadboard digunakan untuk menyatukan koneksi VCC (tegangan), GND (ground), dan jalur data dari berbagai sensor ke NodeMCU.
 - b. Penggunaan breadboard memudahkan perakitan dan pengujian sebelum dilakukan perancangan sirkuit permanen.

2. Penggunaan Kabel Jumper:

- a. Kabel jumper berfungsi sebagai penghubung antar pin sensor dan modul ke pin GPIO NodeMCU.
- b. Jalur ini juga mendukung pengaturan fleksibel dalam perubahan konfigurasi pin jika diperlukan.

3. Konversi Sinyal Analog:

- a. Karena NodeMCU hanya memiliki satu pin analog (A0), maka modul ADC (M1) digunakan untuk memperluas kemampuan pembacaan data analog dari berbagai sensor secara simultan.
- b. Modul ADC ini penting untuk membaca nilai dari sensor pH dan TDS secara akurat.

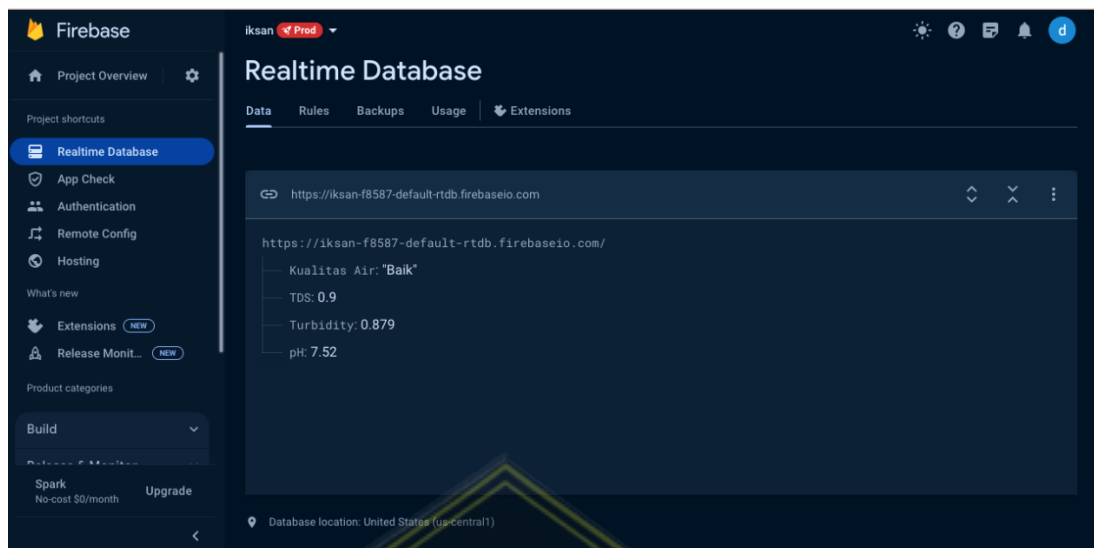
4.1. Pengujian Alat

Dalam tahap uji coba sensor pada alat monitoring kualitas air dengan memanfaatkan beberapa jenis cairan berbeda yaitu air murni (*Distilled Water*), Hard Water (*Hard Water*), air sumur (*Ground Water*), Softened Water (*Softened Water*), air yang mengandung partikel bubuk pekat (*Suspended Solids-laden Water*), air yang diberikan pewarna (*Colored Water*), dan Air lumpur (Sludge Water) (*Sludge Water*). Pada gambar tersebut, dapat terlihat dengan jelas bahwa sistem telah dirancang untuk mengukur tingkat Kekeruhan, Salinitas (TDS) dan PH pada masing-masing jenis cairan, dan data yang dihasilkan akan menjadi landasan untuk proses pengolahan data *real-time* menggunakan *platform Firebase IoT*. Berikut adalah tabel data awal cairan yang dideteksi sensor ketika Suhu 40°C dengan memanfaatkan tujuh jenis cairan berbeda: air murni (*Distilled Water*), Hard Water (*Hard Water*), air sumur (*Ground Water*), Softened Water (*Softened Water*), air yang mengandung partikel bubuk pekat (*Suspended Solids-laden Water*), air yang diberikan pewarna (*Colored Water*), dan Air lumpur (Sludge Water) (*Sludge Water*).

Tabel 4.2 Tabel awal Kekeruhan, Salinitas, dan PH 7 jenis cairan pada suhu 40 °C (Suhu Normal)

Jenis Cairan	Kekeruhan	Salinitas	pH
Air murni (<i>Distilled Water</i>)	0	0	7
Air Berwarna (<i>Colored Water</i>)	5	0,5	6
Air yang mengandung partikel bubuk (<i>Suspended Solids-laden Water</i>)	100	5	5
Air Softener (<i>Softened Water</i>)	3,90	0,70	8,30
Air dengan mineral tinggi (<i>Hard Water</i>)	17,80	3,40	7,60
Air Sumur (<i>Ground water</i>)	8,50	1,20	7,00
Air lumpur (<i>Sludge Water</i>)	110	5.3	7.2

Dengan data tersebut, dapat diperoleh kesimpulan bahwa sistem telah dirancang untuk mengukur tingkat Kekeruhan, Salinitas dan pH pada masing-masing jenis cairan, dan data yang dihasilkan akan menjadi landasan untuk proses pengolahan data *real-time* menggunakan platform *Firestore* IoT. Proses pengolahan data *real-time* ini memberikan sejumlah keuntungan dalam pemantauan parameter kualitas air. Salah satu hal yang perlu dicatat adalah bahwa hasil monitoring dari sensor tersebut secara otomatis dikirimkan ke server *Firestore* IoT.



Gambar 4.2 Monitoring 3 Sensor menggunakan Firebase Realtime Database dan Menampilkan hasil output fuzzy

Hal ini membuka peluang bagi pengguna untuk mengakses data tersebut dari jarak jauh, mengurangi keterbatasan geografis dalam memonitor kualitas air. Dengan kemudahan akses tersebut, pemantauan dapat dilakukan dengan lebih efisien dan responsif.

Data logger menjadi parameter yang sangat berguna bagi pengguna, memudahkan pengguna dalam memahami tren atau fluktuasi yang terjadi pada parameter kualitas air yang diukur. Selain itu, data *logger* ini dapat memberikan petunjuk visual yang berguna dalam menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas air, seperti perubahan suhu atau fluktuasi tingkat kekeruhan, Salinitas dan PH.

Tabel 4.3 Data Logger Percobaan Kualitas Air Murni (Distilled Water)

No.	Kekeruhan (NTU)	Salinitas (%)	pH	Suhu (°C)
1	0,2	0,1	7,1	40,3
2	0,1	0,2	6,9	50,6
3	0,3	0,1	7,2	61,2
4	0,4	0,2	7,0	70,5
5	0,2	0,3	7,3	79,8
6	0,3	0,2	7,1	40,2
7	0,1	0,3	7,2	51,1

8	0,4	0,1	6,9	62,3
9	0,3	0,2	7,0	70,8
10	0,2	0,1	7,3	81,5
11	0,3	0,3	7,2	42,8
12	0,1	0,2	6,9	53,4
13	0,2	0,1	7,1	61,9
14	0,4	0,2	7,0	71,2
15	0,2	0,3	7,3	80,4
16	0,3	0,2	7,1	41,7
17	0,1	0,3	7,2	52,6
18	0,4	0,1	6,9	63,8
19	0,3	0,2	7,0	70,9
20	0,2	0,1	7,3	80,2
21	0,2	0,3	7,2	43,5
22	0,1	0,2	6,9	51,8
23	0,3	0,1	7,1	62,1
24	0,4	0,2	7,0	71,3
25	0,2	0,3	7,3	80,6
26	0,3	0,2	7,1	40,7
27	0,1	0,3	7,2	50,9

Tabel 4.4 Data Logger Percobaan Kualitas Air Berwarna (Colored Water)

No.	Kekeruhan (NTU)	Salinitas (%)	pH	Suhu (°C)
1	5,3	0,4	6,1	42,4
2	4,8	0,5	6,2	51,9
3	5,7	0,6	5,9	63,7
4	5,1	0,4	6,0	72,1
5	6,0	0,5	6,3	82,0
6	5,2	0,6	6,1	42,8
7	4,9	0,4	6,2	52,5
8	5,6	0,5	5,9	64,1
9	5,0	0,3	6,0	73,5
10	6,1	0,4	6,3	82,8
11	5,4	0,5	6,1	43,4
12	4,7	0,6	6,2	53,9
13	5,8	0,4	5,9	65,7
14	5,1	0,5	6,0	74,1
15	6,2	0,3	6,3	82,5
16	5,3	0,4	6,1	44,1
17	4,6	0,5	6,2	53,4
18	5,9	0,6	5,9	64,9
19	5,2	0,4	6,0	73,5
20	6,0	0,5	6,3	82,4
21	5,5	0,3	6,1	44,9
22	4,8	0,4	6,2	54,5

23	5,7	0,5	5,9	66,3
24	5,0	0,6	6,0	75,7
25	6,3	0,4	6,3	83,2
26	5,4	0,5	6,1	45,6
27	4,7	0,6	6,2	55,1
28	5,8	0,4	5,9	66,9

Tabel 4.5 Data Logger Percobaan Kualitas Air Yang Mengandung Partikel Bubuk (Suspended Solids-laden Water)

No.	Kekeruhan (NTU)	Salinitas (%)	pH	Suhu (°C)
1	101,2	5,2	4,9	40,8
2	100,5	5,4	5,0	51,4
3	102,1	5,1	4,8	62,6
4	103,0	5,3	4,7	71,9
5	101,5	5,2	5,1	80,2
6	100,9	5,3	4,9	41,6
7	101,7	5,4	5,0	52,5
8	102,5	5,1	4,8	63,1
9	103,4	5,3	4,7	72,4
10	102,0	5,2	5,1	81,7
11	101,2	5,3	4,9	42,8
12	100,5	5,4	5,0	53,4
13	102,1	5,1	4,8	64,6
14	103,0	5,3	4,7	73,9
15	101,5	5,2	5,1	82,2
16	100,9	5,3	4,9	43,6
17	101,7	5,4	5,0	54,5
18	102,5	5,1	4,8	65,1
19	103,4	5,3	4,7	74,4
20	102,0	5,2	5,1	83,7
21	101,2	5,3	4,9	44,8
22	100,5	5,4	5,0	55,4
23	102,1	5,1	4,8	66,6
24	103,1	5,3	4,7	75,9
25	101,5	5,2	5,1	84,2
26	100,9	5,3	4,9	45,6

Tabel 4.6 Data Logger Percobaan Kualitas Air Softener (Softened Water)

No.	Kekeruhan (NTU)	Salinitas (%)	pH	Suhu (°C)
1	3,9	0,7	8,3	40,0
2	4,1	0,7	8,3	41,5
3	4,2	0,8	8,3	43,2
4	4,3	0,8	8,3	44,8

5	4,4	0,8	8,3	46,3
6	4,6	0,8	8,4	47,9
7	4,7	0,9	8,4	49,5
8	4,8	0,9	8,4	51,1
9	4,9	0,9	8,4	52,6
10	5,1	0,9	8,4	54,2
11	5,2	1,0	8,4	55,8
12	5,3	1,0	8,4	57,3
13	5,4	1,1	8,4	58,9
14	5,6	1,1	8,4	60,5
15	5,7	1,1	8,4	62,0
16	5,8	1,1	8,5	63,6
17	5,9	1,2	8,5	65,2
18	6,1	1,2	8,5	66,7
19	6,2	1,2	8,5	68,3
20	6,3	1,3	8,5	69,9
21	6,4	1,3	8,5	71,4
22	6,6	1,3	8,5	73,0
23	6,7	1,4	8,5	74,6
24	6,8	1,4	8,5	76,1
25	6,9	1,4	8,5	77,7
26	7,1	1,4	8,6	79,3

Tabel 4.7 Data Logger Percobaan Kualitas Air Sadah (Hard Water)

No.	Kekeruhan (NTU)	Salinitas (%)	pH	Suhu (°C)
1	17,8	3,4	7,6	40,0
2	18,1	3,5	7,6	41,5
3	18,4	3,5	7,6	43,2
4	18,7	3,6	7,6	44,8
5	19,0	3,6	7,7	46,3
6	19,3	3,7	7,7	47,9
7	19,6	3,7	7,7	49,5
8	19,9	3,8	7,7	51,1
9	20,2	3,8	7,7	52,6
10	20,5	3,9	7,7	54,2
11	20,9	3,9	7,7	55,8
12	21,2	4,0	7,7	57,3
13	21,5	4,1	7,7	58,9
14	21,8	4,2	7,7	60,5
15	22,1	4,3	7,7	62,0
16	22,5	4,4	7,8	63,6
17	22,9	4,5	7,8	65,2
18	23,3	4,6	7,8	66,7
19	23,7	4,7	7,8	68,3
20	24,1	4,8	7,8	69,9

21	24,5	4,9	7,8	71,4
22	24,9	5,0	7,8	73,0
23	25,3	5,1	7,8	74,6
24	25,8	5,2	7,8	76,1
25	26,3	5,3	7,8	77,7
26	26,9	5,5	7,8	79,3

Tabel 4.8 Data Logger Percobaan Kualitas Air Sumur (Ground Water)

No.	Kekeruhan (NTU)	Salinitas (%)	pH	Suhu (°C)
1	8,5	1,2	7,0	40,0
2	8,8	1,3	7,0	41,5
3	9,1	1,3	7,0	43,2
4	9,4	1,4	7,0	44,8
5	9,7	1,4	7,0	46,3
6	10,0	1,5	7,0	47,9
7	10,3	1,5	7,0	49,5
8	10,6	1,6	7,0	51,1
9	10,9	1,6	7,0	52,6
10	11,2	1,7	7,0	54,2
11	11,5	1,7	7,0	55,8
12	11,8	1,8	7,0	57,3
13	12,1	1,8	7,0	58,9
14	12,4	1,9	7,0	60,5
15	12,7	1,9	7,0	62,0
16	13,0	2,0	7,0	63,6
17	13,3	2,0	7,0	65,2
18	13,6	2,1	7,0	66,7
19	13,9	2,2	7,0	68,3
20	14,2	2,3	7,0	69,9
21	14,5	2,4	7,0	71,4
22	14,8	2,5	7,0	73,0
23	15,1	2,6	7,0	74,6
24	15,4	2,7	7,0	76,1
25	15,7	2,8	7,0	77,7
26	16,0	2,9	7,0	79,3

Tabel 4.9 Data Logger Percobaan Kualitas Air Lumpur (Sludge Water)

No.	Kekeruhan (NTU)	Salinitas (%)	pH	Suhu (°C)
1	110,2	5,3	7.2	47.5
2	102.5	5.6	6.9	48
3	107.1	5.6	7.1	47
4	105	5.8	6.8	46.5
5	106.5	5.5	7.3	48.3

6	102.9	5.5	7	49
7	102.7	5.6	7.1	48,7
8	106,5	5,4	7,2	49,5
9	107,4	5,7	6,7	50,1
10	106	5,7	7,4	50,3
11	103,2	5,5	6,9	50
12	103,5	5,8	7,3	51
13	104,1	5,2	6,8	51,2
14	108	5,8	7,1	51,4
15	106,5	5,6	7,2	51,6
16	103,9	5,6	6,9	52
17	105,7	5,6	7	51,5
18	105,5	5,2	6,7	50,9
19	106,4	5,7	7,4	50,7
20	104	5,6	7,1	50,5
21	106,2	5,7	7,3	50,3
22	105,5	5,7	6,9	50
23	103,1	5,4	7,2	49,7
24	106,1	5,7	7,1	49,3
25	104,5	5,3	7	49
26	105,9	5,5	6,8	48,5

Data logger yang digunakan dalam penelitian ini memiliki fokus pada tiga variabel utama, yaitu kekeruhan (NTU), salinitas (%), dan pH, yang menjadi indikator kualitas air. Tabel 4.3, Tabel 4.4, Tabel 4.5, Tabel 4.6, Tabel 4.7, Tabel 4.8, dan Tabel 4.9 mencatat hasil percobaan untuk masing-masing jenis cairan simulasi, yaitu *Distilled Water*, *Colored Water*, *Suspended Solids-laden Water*, *Softened Water*, *Ground Water*, *Hard Water*, dan *Sludge Water*.

Data Distilled Water (Tabel 4.3) menunjukkan hasil pengukuran kekeruhan (NTU), salinitas, dan pH dari 27 sampel Distilled Water. Nilai kekeruhan sangat rendah (0.1–0.4 NTU), sesuai dengan kategori "Rendah" pada fungsi keanggotaan sebelumnya, mengindikasikan kejernihan tinggi khas Distilled Water. Salinitas juga sangat rendah (0.1–0.3), menandakan hampir tidak ada kandungan garam. Sementara itu, pH berkisar antara 6.9–7.3, menunjukkan netralitas yang khas air minum ideal (mendekati pH 7). Secara keseluruhan, data ini mencerminkan karakteristik Distilled Water yang jernih, rendah mineral, dan memiliki keseimbangan pH netral, sesuai dengan standar air minum berkualitas.

Data Colored Water (Tabel 4.4) tersebut menunjukkan hasil pengukuran kekeruhan (NTU), salinitas, dan pH dari 28 sampel Colored Water. Nilai kekeruhan

berkisar antara 4.6–6.3 NTU, yang berdasarkan fungsi keanggotaan sebelumnya termasuk dalam kategori "Rendah" (mendekati batas bawah "Sedang"), mengindikasikan Colored Water yang relatif jernih dengan sedikit partikel tersuspensi. Salinitas sampel sangat rendah (0.3–0.6), menandakan hampir tidak adanya kandungan garam. Sementara itu, pH berada dalam rentang 5.9–6.3, menunjukkan sifat asam lemah yang khas untuk Colored Water akibat senyawa organik seperti tanin. Secara keseluruhan, data ini menggambarkan konsistensi Colored Water dalam hal kejernihan, rendahnya mineral garam, dan keasaman yang stabil.

Data Suspended Solids-laden Water (Tabel 4.5) menunjukkan hasil pengukuran kekeruhan (NTU), salinitas, dan pH dari 26 sampel Suspended Solids-laden Water. Nilai kekeruhan sangat tinggi (100.5–103.4 NTU), termasuk dalam kategori "Tinggi" sesuai fungsi keanggotaan sebelumnya, mencerminkan kandungan padatan tersuspensi yang tinggi. Salinitas berada pada kisaran 5.1–5.4, menunjukkan kadar garam yang cukup signifikan. Sementara itu, pH berkisar antara 4.7–5.1, menandakan sifat asam yang kuat akibat senyawa organik seperti asam klorogenat dalam larutan air. Secara keseluruhan, data ini menggambarkan karakteristik Suspended Solids-laden Water yang keruh, memiliki salinitas sedang, dan bersifat asam.

Data Softened Water (Tabel 4.6) menunjukkan hasil pengukuran kekeruhan (3.9–7.1 NTU), salinitas (0.7–1.4), dan pH (8.3–8.6) dari 26 sampel Softened Water. Nilai kekeruhan termasuk dalam kategori "Sedang", mengindikasikan adanya partikel tersuspensi hasil proses pelunakan air. Salinitas yang relatif rendah menunjukkan kandungan garam terbatas, sesuai dengan karakteristik Softened Water yang telah melalui proses pertukaran ion. Sementara itu, pH basa (8.3–8.6) mencerminkan sifat alkali khas Softened Water akibat residu mineral seperti kalsium dan magnesium yang telah diolah. Secara keseluruhan, data ini menggambarkan karakteristik Softened Water yang memiliki kekeruhan moderat, salinitas rendah, dan sifat basa ringan sebagai hasil dari proses pelunakan air.

Data Hard Water (Tabel 4.7) menunjukkan karakteristik dengan kekeruhan 17.8–26.9 NTU (termasuk kategori Sedang-Mendekati Tinggi), salinitas 3.4–5.5 yang relatif tinggi, dan pH 7.6–7.8 yang cenderung netral-alkali. Nilai kekeruhan

yang meningkat secara gradual menunjukkan kandungan partikel tersuspensi yang signifikan, khas Hard Water yang mengandung mineral tinggi. Salinitas yang meningkat seiring kekeruhan mengindikasikan kandungan ion kalsium dan magnesium yang dominan - penyebab utama kesadahan air. Sementara pH yang stabil di atas netral (7.6-7.8) konsisten dengan sifat Hard Water yang mengandung mineral alkali tanah, dimana nilai pH ini masih dalam batas aman konsumsi meskipun berpotensi menimbulkan kerak pada peralatan.

Data Air sumur (Ground Water) (Tabel 4.8) menunjukkan karakteristik dengan kekeruhan 8.5-16 NTU (termasuk kategori Sedang), salinitas 1.2-2.9 yang moderat, dan pH stabil 7 (netral sempurna). Pola peningkatan kekeruhan dan salinitas yang konsisten dari sampel ke sampel mengindikasikan variasi kandungan mineral dan partikel tanah yang larut, khas Air sumur (Ground Water) yang dipengaruhi lapisan akuifer. Nilai pH netral yang sempurna dan konsisten pada semua sampel (pH 7) menunjukkan keseimbangan ionik yang baik tanpa pengaruh asam atau basa kuat, sementara salinitas yang meningkat secara bertahap mencerminkan akumulasi mineral terlarut seiring kedalaman atau lokasi pengambilan sampel. Karakteristik ini sesuai dengan Air sumur (Ground Water) biasa yang umumnya aman untuk konsumsi namun mungkin memerlukan penyaringan untuk mengurangi kekeruhan dan kandungan mineral terlarut.

Data Air lumpur (Sludge Water) (Tabel 4.9) menunjukkan karakteristik dengan kekeruhan sangat tinggi (102.5-110.2 NTU) yang masuk kategori Tinggi, salinitas 5.2-5.8 yang tergolong sedang-tinggi, dan pH 6.7-7.4 yang cenderung netral. Nilai kekeruhan ekstrem mencerminkan kandungan padatan tersuspensi yang sangat tinggi khas suspensi lumpur, sementara salinitas yang konsisten di atas 5 menunjukkan adanya kandungan mineral terlarut signifikan dari material tanah. Variasi pH yang relatif lebar (6.7-7.4) tetapi tetap dalam kisaran netral menunjukkan pengaruh berbagai komponen geokimia dalam lumpur yang saling menetralkan, dimana nilai dibawah 7 kemungkinan berasal dari asam organik sedangkan nilai diatas 7 menunjukkan adanya mineral alkali. Karakteristik ini konsisten dengan Air lumpur (Sludge Water) alami yang mengandung campuran kompleks partikel koloidal tanah liat, mineral terlarut, dan bahan organik terdegradasi.

4.2.Fuzzifikasi

Berikut adalah range fuzzy dengan fungsi keanggotaan trapesium untuk masing-masing input (Kekeruhan, Salinitas, pH) yang digunakan berdasarkan distribusi dan rentang nilai dari seluruh jenis air: Distilled Water, teh, kopi bubuk, softener, sumur, sadah, dan lumpur.

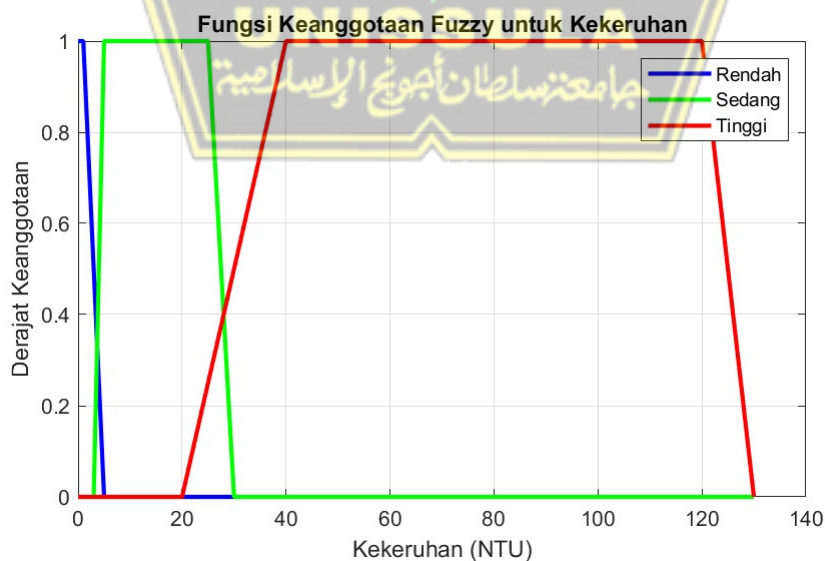
4.2.1. Kekeruhan (NTU)

Kekeruhan air diukur dalam NTU (Nephelometric Turbidity Units) dengan rentang 0.1–110.2 NTU. Fungsi keanggotaan trapesium dibagi menjadi tiga kategori: *Rendah* [0, 0, 1, 5], *Sedang* [3, 5, 25, 30], dan *Tinggi* [20, 40, 120, 130]. Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori untuk input kekeruhan

Kategori	Fungsi Trapesium
Rendah	[0, 0, 1, 5]
Sedang	[3, 5, 25, 30]
Tinggi	[20, 40, 120, 130]

Sedangkan grafik fungsi keanggotaan untuk input kekeruhan ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Grafik fungsi keanggotaan untuk input kekeruhan

Berikut ini adalah persamaan matematis pada setiap kategori untuk input kekeruhan:

- Kategori Rendah

Fungsi Trapesium: [a=0, b=0, c=1, d=5]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \leq 1 \\ \frac{5-x}{4} & \text{jika } 1 < x < 5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 5 \end{cases} \quad (4.1)$$

di mana x adalah nilai kekeruhan dalam NTU

- Kategori Sedang

Fungsi Trapesium: [a=3, b=5, c=25, d=30]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} \frac{x-3}{2} & \text{jika } 3 < x < 5 \\ 1 & \text{jika } 5 \leq x \leq 25 \\ \frac{30-x}{5} & \text{jika } 25 < x < 30 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (4.2)$$

di mana x adalah nilai kekeruhan dalam NTU

- Kategori Tinggi

Fungsi Trapesium: [a=20, b=40, c=120, d=130]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} \frac{x-20}{20} & \text{jika } 20 < x < 40 \\ 1 & \text{jika } 40 \leq x \leq 120 \\ \frac{130-x}{10} & \text{jika } 120 < x < 130 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (4.3)$$

di mana x adalah nilai kekeruhan dalam NTU

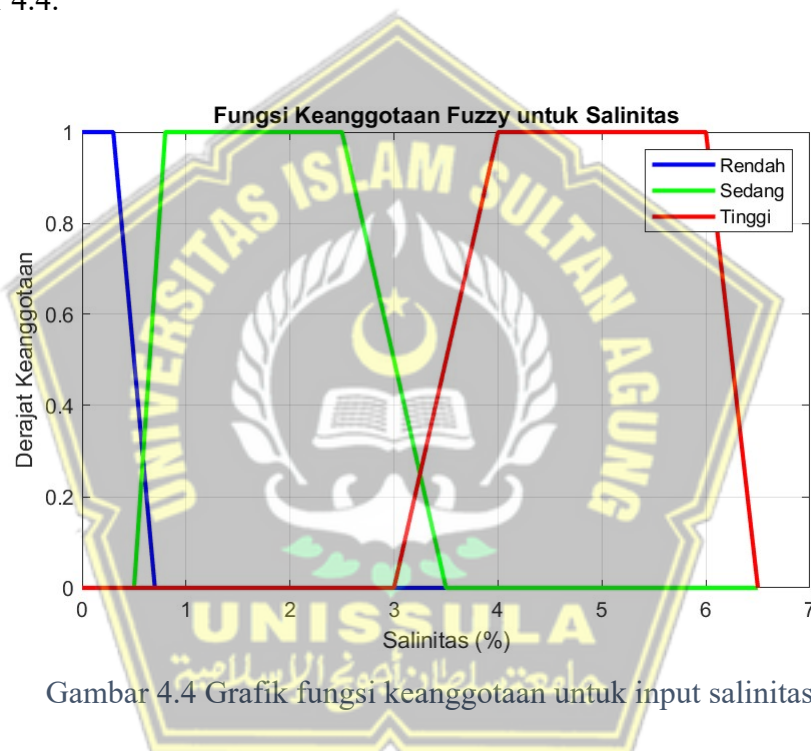
4.2.2. Salinitas (%)

Salinitas mengukur kadar garam terlarut dalam air dengan rentang 0.1–5.8%. Fungsi keanggotaannya terdiri dari: *Rendah* [0, 0, 0.3, 0.7], *Sedang* [0.5, 0.8, 2.5, 3.5], dan *Tinggi* [3.0, 4.0, 6.0, 6.5]. Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori untuk input salinitas

Kategori	Fungsi Trapesium
Rendah	[0, 0, 0.3, 0.7]
Sedang	[0.5, 0.8, 2.5, 3.5]
Tinggi	[3.0, 4.0, 6.0, 6.5]

Sedangkan grafik fungsi keanggotaan untuk input salinitas ditunjukkan pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Grafik fungsi keanggotaan untuk input salinitas

Berikut ini adalah persamaan matematis pada setiap kategori untuk input salinitas:

- Kategori Rendah

Fungsi Trapesium: [a=0, b=0, c=0.3, d=0.7]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \leq 0.3 \\ \frac{0.7-x}{0.4} & \text{jika } 0.3 < x < 0.7 \\ 0 & \text{jika } x \geq 0.7 \end{cases} \quad (4.4)$$

di mana x adalah nilai salinitas dalam %

- Kategori Sedang

Fungsi Trapesium: [a=0.5, b=0.8, c=2.5, d=3.5]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 0.5 \\ \frac{x-0.5}{0.3} & \text{jika } 0.5 < x < 0.8 \\ 1 & \text{jika } 0.8 \leq x \leq 2.5 \\ \frac{3.5-x}{1.0} & \text{jika } 2.5 < x < 3.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 3.5 \end{cases} \quad (4.5)$$

di mana x adalah nilai salinitas dalam %

- Kategori Tinggi

Fungsi Trapesium: [a=3.0, b=4.0, c=6.0, d=6.5]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 3.0 \\ \frac{x-3.0}{1.0} & \text{jika } 3.0 < x < 4.0 \\ 1 & \text{jika } 4.0 \leq x \leq 6.0 \\ \frac{6.5-x}{0.5} & \text{jika } 6.0 < x < 6.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 6.5 \end{cases} \quad (4.6)$$

di mana x adalah nilai salinitas dalam %

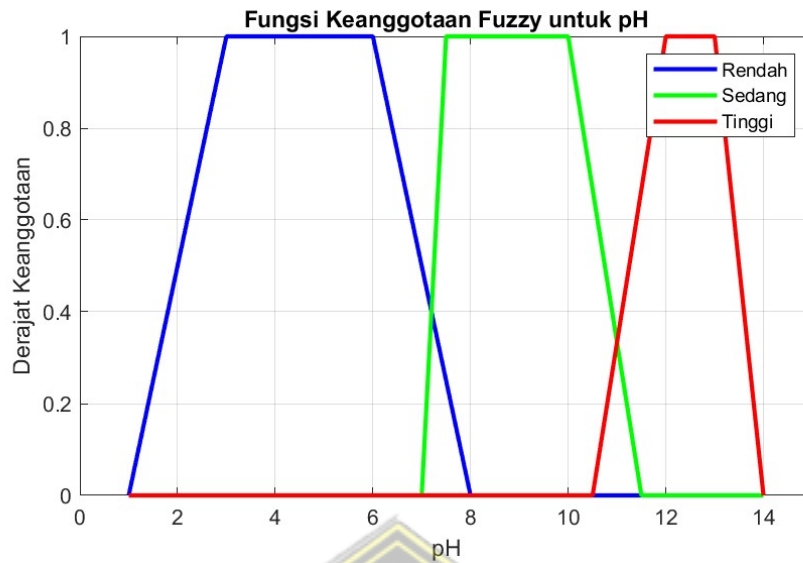
4.2.3. pH

pH mengukur tingkat keasaman atau kebasaan air dengan rentang 1–14. Fungsi keanggotaannya dibagi menjadi: *Rendah* [1 3 6 8], *Sedang* [7 7.5 10 11.5], dan *Tinggi* [10.5 12 13 14]. Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Nilai parameter fungsi trapesium pada masing-masing kategori untuk input pH

Kategori	Fungsi Trapesium
Rendah	[1 3 6 8]
Sedang	[7 7.5 10 11.5]
Tinggi	[10.5 12 13 14]

Sedangkan grafik fungsi keanggotaan untuk input pH ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik fungsi keanggotaan untuk input pH

- Kategori Rendah

Fungsi Trapesium: [a=1, b=3, c=6, d=8]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{\text{Rendah}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 1 \\ \frac{x-1}{2} & \text{jika } 1 < x < 3 \\ 1 & \text{jika } 3 \leq x \leq 6 \\ \frac{8-x}{2} & \text{jika } 6 < x < 8 \\ 0 & \text{jika } x \geq 8 \end{cases} \quad (4.7)$$

di mana x adalah nilai pH

- Kategori Sedang

Fungsi Trapesium: [a=7, b=7.5, c=10, d=11.5]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{\text{Sedang}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 7 \\ \frac{x-7}{0.5} & \text{jika } 7 < x < 7.5 \\ 1 & \text{jika } 7.5 \leq x \leq 10 \\ \frac{11.5-x}{1.5} & \text{jika } 10 < x < 11.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 11.5 \end{cases} \quad (4.8)$$

di mana x adalah nilai pH

- Kategori Tinggi

Fungsi Trapesium: [a=10.5, b=12, c=13, d=14]

Persamaan Matematis:

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 10.5 \\ \frac{x-10.5}{1.5} & \text{jika } 10.5 < x < 12 \\ 1 & \text{jika } 12 \leq x \leq 13 \\ \frac{14-x}{1} & \text{jika } 13 < x < 14 \\ 0 & \text{jika } x \geq 14 \end{cases} \quad (4.9)$$

di mana x adalah nilai pH

4.2.4. Kualitas Air

Pada sistem fuzzy Sugeno, output direpresentasikan sebagai nilai crisp (tegas) atau fungsi linear dari variabel input. Dalam kasus ini, output kualitas air menggunakan konstanta numerik untuk setiap kategori ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Nilai output kualitas air

Kategori	Nilai Output (z)
Buruk	0.2
Sedang	0.5
Baik	0.8

Nilai-nilai ini merepresentasikan tingkat kualitas air dalam skala 0–1, di mana semakin tinggi nilai, semakin baik kualitasnya.

4.3. Basis Aturan (Rule Base)

Setelah diperoleh nilai fuzzifikasi dari ketiga variabel input, langkah selanjutnya dalam analisis fuzzy adalah membentuk aturan fuzzy dan menerapkan sistem inferensi fuzzy untuk mengklasifikasikan kualitas air. Aturan-aturan ini mengaitkan hasil fuzzifikasi masing-masing variabel dengan kategori kualitas air yang diharapkan, yaitu "baik," "sedang," atau "buruk." Tabel 4.14 menyajikan aturan fuzzy yang digunakan dalam proses klasifikasi ini.

Tabel 4.14 Aturan fuzzy yang digunakan untuk klasifikasi kualitas air

No	Kekeruhan	Salinitas	pH	Kualitas Air
1	Rendah	Rendah	Rendah	Sedang
2	Rendah	Rendah	Sedang	Baik
3	Rendah	Rendah	Tinggi	Sedang
4	Rendah	Sedang	Rendah	Sedang
5	Rendah	Sedang	Sedang	Baik
6	Rendah	Sedang	Tinggi	Sedang
7	Rendah	Tinggi	Rendah	Buruk
8	Rendah	Tinggi	Sedang	Sedang
9	Rendah	Tinggi	Tinggi	Buruk
10	Sedang	Rendah	Rendah	Buruk
11	Sedang	Rendah	Sedang	Sedang
12	Sedang	Rendah	Tinggi	Buruk
13	Sedang	Sedang	Rendah	Sedang
14	Sedang	Sedang	Sedang	Baik
15	Sedang	Sedang	Tinggi	Sedang
16	Sedang	Tinggi	Rendah	Buruk
17	Sedang	Tinggi	Sedang	Sedang
18	Sedang	Tinggi	Tinggi	Buruk
19	Tinggi	Rendah	Rendah	Buruk
20	Tinggi	Rendah	Sedang	Buruk
21	Tinggi	Rendah	Tinggi	Buruk
22	Tinggi	Sedang	Rendah	Buruk
23	Tinggi	Sedang	Sedang	Sedang
24	Tinggi	Sedang	Tinggi	Buruk
25	Tinggi	Tinggi	Rendah	Buruk
26	Tinggi	Tinggi	Sedang	Buruk
27	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Buruk

4.4. Inferensi (Evaluasi Aturan)

Dalam proses inferensi (evaluasi aturan) pada sistem Fuzzy Sugeno ini dilakukan penggabungan derajat keanggotaan dari masing-masing premis (input fuzzy) untuk menghasilkan bobot (tingkat keaktifan) setiap aturan fuzzy. Bobot dari setiap aturan dihitung berdasarkan operator fuzzy AND dan menggunakan fungsi minimum. Nilai bobot ditentukan oleh derajat keanggotaan (nilai *firing strength*) dari masing-masing aturan. Persamaan yang digunakan untuk perhitungan bobot adalah sebagai berikut:

$$\alpha_i = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \mu_{A_3}(x_3))$$

di mana

α_i merupakan nilai *firing strength*

A_1, A_2, A_3 merupakan himpunan fuzzy dari input kekeruhan, salinitas, dan pH

x_1, x_2, x_3 merupakan derajat keanggotaan dari masing-masing input

4.5. Defuzzifikasi (Metode Sugeno Zero-order)

Dalam penelitian ini, metode *Weighted Average (WA)* digunakan dalam sistem inferensi fuzzy tipe Sugeno untuk menentukan kualitas air berdasarkan tiga parameter utama: kekeruhan (NTU), salinitas (%), dan pH. Metode ini bekerja dengan menghitung output sebagai rata-rata tertimbang dari keluaran dari setiap aturan fuzzy. Persamaan yang digunakan untuk perhitungan nilai output yaitu:

$$Output = \frac{\sum(\alpha_i \cdot z_i)}{\sum \alpha_i}$$

Di mana:

α_i adalah nilai *firing strength* aturan ke-i

z_i adalah output konstan dari aturan ke-i

Contoh Perhitungan 1:

Nilai input:

Kekeruhan = 0.2

Salinitas = 0.1

pH = 7.1

Langkah 1: Fuzzifikasi

- **Kekeruhan ($x = 0.2$)**

Berdasarkan persamaan 4.1

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \leq 0.3 \\ \frac{0.7 - x}{0.4} & \text{jika } 0.3 < x < 0.7 \\ 0 & \text{jika } x \geq 0.7 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(0.2) = 1$

Berdasarkan persamaan 4.2

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} \frac{x - 3}{2} & \text{jika } 3 < x < 5 \\ 1 & \text{jika } 5 \leq x \leq 25 \\ \frac{30 - x}{5} & \text{jika } 25 < x < 30 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(0.2) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.3

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} \frac{x - 20}{20} & \text{jika } 20 < x < 40 \\ 1 & \text{jika } 40 \leq x \leq 120 \\ \frac{130 - x}{10} & \text{jika } 120 < x < 130 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(0.2) = 0$

- **Salinitas ($x = 0.1$)**

Berdasarkan persamaan 4.4

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \leq 0.3 \\ \frac{0.7 - x}{0.4} & \text{jika } 0.3 < x < 0.7 \\ 0 & \text{jika } x \geq 0.7 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(0.1) = 1$

Berdasarkan persamaan 4.5

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 0.5 \\ \frac{x - 0.5}{0.3} & \text{jika } 0.5 < x < 0.8 \\ 1 & \text{jika } 0.8 \leq x \leq 2.5 \\ \frac{3.5 - x}{1.0} & \text{jika } 2.5 < x < 3.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 3.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(0.1) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.6

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 3.0 \\ \frac{x - 3.0}{1.0} & \text{jika } 3.0 < x < 4.0 \\ 1 & \text{jika } 4.0 \leq x \leq 6.0 \\ \frac{6.5 - x}{0.5} & \text{jika } 6.0 < x < 6.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 6.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(0.1) = 0$

- **pH ($x = 7.1$)**

Berdasarkan persamaan 4.7

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 1 \\ \frac{x - 1}{2} & \text{jika } 1 < x < 3 \\ 1 & \text{jika } 3 \leq x \leq 6 \\ \frac{8 - x}{2} & \text{jika } 6 < x < 8 \\ 0 & \text{jika } x \geq 8 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(7.1) = 0.45$

Berdasarkan persamaan 4.8

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 7 \\ \frac{x - 7}{0.5} & \text{jika } 7 < x < 7.5 \\ 1 & \text{jika } 7.5 \leq x \leq 10 \\ \frac{11.5 - x}{1.5} & \text{jika } 10 < x < 11.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 11.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(7.1) = 0.2$

Berdasarkan persamaan 4.9

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 10.5 \\ \frac{x - 10.5}{1.5} & \text{jika } 10.5 < x < 12 \\ 1 & \text{jika } 12 \leq x \leq 13 \\ \frac{14 - x}{1} & \text{jika } 13 < x < 14 \\ 0 & \text{jika } x \geq 14 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(7.1) = 0$

Langkah 2: Evaluasi Aturan

Dengan nilai input

Kekeruhan = 0.2 (Rendah)

Salinitas = 0.1 (Rendah)

pH = 7.1 (Rendah/Sedang)

maka aturan fuzzy yang aktif adalah aturan 1 dan 2 (Tabel 4.14) yaitu:

Aturan 1. Jika Kekeruhan Rendah, Salinitas Rendah, dan pH Rendah, maka kualitas air adalah Sedang

Aturan 2. Jika Kekeruhan Rendah, Salinitas Rendah, dan pH Sedang, maka kualitas air adalah Baik

maka $\alpha_1 = \min(1, 1, 0.45) = 0.45$

dan $z_1 = 0.5$ (Tabel 4.13)

maka $\alpha_2 = \min(1, 1, 0.2) = 0.2$

dan $z_2 = 0.8$ (Tabel 4.13)

Aturan lain tidak aktif karena nilai minimum dari setiap kombinasi = 0.

Langkah 3: Hitung output dengan metode Weighted Average

maka nilai output kualitas air adalah

$$Output = \frac{\sum(\alpha_i \cdot z_i)}{\sum \alpha_i}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\Sigma(0.45 \cdot 0.5 + 0.2 \cdot 0.8)}{\Sigma(0.45 + 0.2)} \\
&= 0.5923 \text{ (kategori baik)}
\end{aligned}$$

Contoh Perhitungan 2:

Nilai input:

Kekeruhan = 3.9

Salinitas = 0.7

pH = 8.3

Langkah 1: Fuzzifikasi

- **Kekeruhan ($x = 3.9$)**

Berdasarkan persamaan 4.1

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \leq 0.3 \\ \frac{0.7 - x}{0.4} & \text{jika } 0.3 < x < 0.7 \\ 0 & \text{jika } x \geq 0.7 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(3.9) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.2

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} \frac{x - 3}{2} & \text{jika } 3 < x < 5 \\ 1 & \text{jika } 5 \leq x \leq 25 \\ \frac{30 - x}{5} & \text{jika } 25 < x < 30 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(3.9) = 0.45$

Berdasarkan persamaan 4.3

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} \frac{x - 20}{20} & \text{jika } 20 < x < 40 \\ 1 & \text{jika } 40 \leq x \leq 120 \\ \frac{130 - x}{10} & \text{jika } 120 < x < 130 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(3.9) = 0$

- **Salinitas ($x = 0.7$)**

Berdasarkan persamaan 4.4

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \leq 0.3 \\ \frac{0.7 - x}{0.4} & \text{jika } 0.3 < x < 0.7 \\ 0 & \text{jika } x \geq 0.7 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(0.7) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.5

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 0.5 \\ \frac{x - 0.5}{0.3} & \text{jika } 0.5 < x < 0.8 \\ 1 & \text{jika } 0.8 \leq x \leq 2.5 \\ \frac{3.5 - x}{1.0} & \text{jika } 2.5 < x < 3.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 3.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(0.7) = 0.67$

Berdasarkan persamaan 4.6

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 3.0 \\ \frac{x - 3.0}{1.0} & \text{jika } 3.0 < x < 4.0 \\ 1 & \text{jika } 4.0 \leq x \leq 6.0 \\ \frac{6.5 - x}{0.5} & \text{jika } 6.0 < x < 6.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 6.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(0.7) = 0$

- **pH ($x = 8.3$)**

Berdasarkan persamaan 4.7

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 1 \\ \frac{x - 1}{2} & \text{jika } 1 < x < 3 \\ 1 & \text{jika } 3 \leq x \leq 6 \\ \frac{8 - x}{2} & \text{jika } 6 < x < 8 \\ 0 & \text{jika } x \geq 8 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(8.3) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.8

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 7 \\ \frac{x-7}{0.5} & \text{jika } 7 < x < 7.5 \\ 1 & \text{jika } 7.5 \leq x \leq 10 \\ \frac{11.5-x}{1.5} & \text{jika } 10 < x < 11.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 11.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(8.3) = 1$

Berdasarkan persamaan 4.9

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 10.5 \\ \frac{x-10.5}{1.5} & \text{jika } 10.5 < x < 12 \\ 1 & \text{jika } 12 \leq x \leq 13 \\ \frac{14-x}{1} & \text{jika } 13 < x < 14 \\ 0 & \text{jika } x \geq 14 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(8.3) = 0$

Langkah 2: Evaluasi Aturan

Dengan nilai input

Kekeruhan = 3.9 (Sedang)

Salinitas = 0.7 (Sedang)

pH = 8.3 (Tinggi)

maka aturan fuzzy yang aktif adalah aturan 14 (Tabel 4.14) yaitu:

Jika Kekeruhan Sedang, Salinitas Sedang, dan pH Sedang, maka kualitas air adalah Baik

maka $\alpha_1 = \min(0.45, 0.67, 1) = 0.45$

dan $z_1 = 0.8$ (Tabel 4.13)

Aturan lain tidak aktif karena nilai minimum dari setiap kombinasi = 0.

Langkah 3: Hitung output dengan metode Weighted Average

maka nilai output kualitas air adalah

$$\begin{aligned}
 Output &= \frac{\sum(\alpha_i \cdot z_i)}{\sum \alpha_i} \\
 &= \frac{\sum(0.45 \cdot 0.8)}{\sum 0.45} \\
 &= 0.8 \text{ (kategori baik)}
 \end{aligned}$$

Contoh Perhitungan 3:

Nilai input:

Kekeruhan = 101.2

Salinitas = 5.2

pH = 4.9

Langkah 1: Fuzzifikasi

- **Kekeruhan ($x = 101.2$)**

Berdasarkan persamaan 4.1

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \leq 0.3 \\ \frac{0.7 - x}{0.4} & \text{jika } 0.3 < x < 0.7 \\ 0 & \text{jika } x \geq 0.7 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(101.2) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.2

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} \frac{x - 3}{2} & \text{jika } 3 < x < 5 \\ 1 & \text{jika } 5 \leq x \leq 25 \\ \frac{30 - x}{5} & \text{jika } 25 < x < 30 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(101.2) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.3

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} \frac{x - 20}{20} & \text{jika } 20 < x < 40 \\ 1 & \text{jika } 40 \leq x \leq 120 \\ \frac{130 - x}{10} & \text{jika } 120 < x < 130 \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(101.2) = 1$

- **Salinitas ($x = 5.2$)**

Berdasarkan persamaan 4.4

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \leq 0.3 \\ \frac{0.7 - x}{0.4} & \text{jika } 0.3 < x < 0.7 \\ 0 & \text{jika } x \geq 0.7 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(5.2) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.5

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 0.5 \\ \frac{x - 0.5}{0.3} & \text{jika } 0.5 < x < 0.8 \\ 1 & \text{jika } 0.8 \leq x \leq 2.5 \\ \frac{3.5 - x}{1.0} & \text{jika } 2.5 < x < 3.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 3.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(5.2) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.6

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 3.0 \\ \frac{x - 3.0}{1.0} & \text{jika } 3.0 < x < 4.0 \\ 1 & \text{jika } 4.0 \leq x \leq 6.0 \\ \frac{6.5 - x}{0.5} & \text{jika } 6.0 < x < 6.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 6.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(5.2) = 1$

- **pH ($x = 4.9$)**

Berdasarkan persamaan 4.7

$$\mu_{Rendah}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 1 \\ \frac{x-1}{2} & \text{jika } 1 < x < 3 \\ 1 & \text{jika } 3 \leq x \leq 6 \\ \frac{8-x}{2} & \text{jika } 6 < x < 8 \\ 0 & \text{jika } x \geq 8 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Rendah}(4.9) = 1$

Berdasarkan persamaan 4.8

$$\mu_{Sedang}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 7 \\ \frac{x-7}{0.5} & \text{jika } 7 < x < 7.5 \\ 1 & \text{jika } 7.5 \leq x \leq 10 \\ \frac{11.5-x}{1.5} & \text{jika } 10 < x < 11.5 \\ 0 & \text{jika } x \geq 11.5 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Sedang}(4.9) = 0$

Berdasarkan persamaan 4.9

$$\mu_{Tinggi}(x) = \begin{cases} 0 & \text{jika } x \leq 10.5 \\ \frac{x-10.5}{1.5} & \text{jika } 10.5 < x < 12 \\ 1 & \text{jika } 12 \leq x \leq 13 \\ \frac{14-x}{1} & \text{jika } 13 < x < 14 \\ 0 & \text{jika } x \geq 14 \end{cases}$$

maka nilai $\mu_{Tinggi}(4.9) = 0$

Langkah 2: Evaluasi Aturan

Dengan nilai input

Kekeruhan = 101.2 (Tinggi)

Salinitas = 5.2 (Tinggi)

pH = 4.9 (Rendah)

maka aturan fuzzy yang aktif adalah aturan 25 (Tabel 4.14) yaitu:

Jika Kekeruhan Tinggi, Salinitas Tinggi, dan pH Rendah, maka kualitas air adalah Buruk

maka $\alpha_1 = \min(1,1,1) = 1$

dan $z_1 = 0.2$ (Tabel 4.13)

Aturan lain tidak aktif karena nilai minimum dari setiap kombinasi = 0.

Langkah 3: Hitung output dengan metode Weighted Average

maka nilai output kualitas air adalah

$$\begin{aligned} \text{Output} &= \frac{\sum(\alpha_i \cdot z_i)}{\sum \alpha_i} \\ &= \frac{\sum(1 \cdot 0.2)}{\sum 1} \\ &= 0.2 \text{ (kategori buruk)} \end{aligned}$$

Hasil lengkap perhitungan nilai output kualitas air yang dihasilkan oleh sistem fuzzy menggunakan *software MATLAB* ditunjukkan pada Tabel 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20, dan 4.21 berikut ini.

Tabel 4. 15 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Distilled Water)

No	Input			Output	Kualitas air	
	Kekeruhan	Salinitas	pH	Nilai kualitas air	Predicted	Actual
1	0,2	0,1	7,1	0,5	baik	baik
2	0,1	0,2	6,9	0,5	sedang	baik
3	0,3	0,1	7,2	0,6	baik	baik
4	0,4	0,2	7,0	0,5	sedang	baik
5	0,2	0,3	7,3	0,6	baik	baik
6	0,3	0,2	7,1	0,5	baik	baik
7	0,1	0,3	7,2	0,6	baik	baik
8	0,4	0,1	6,9	0,5	sedang	baik
9	0,3	0,2	7,0	0,5	sedang	baik
10	0,2	0,1	7,3	0,6	baik	baik
11	0,3	0,3	7,2	0,6	baik	baik
12	0,1	0,2	6,9	0,5	sedang	baik
13	0,2	0,1	7,1	0,5	baik	baik
14	0,4	0,2	7,0	0,5	sedang	baik
15	0,2	0,3	7,3	0,6	baik	baik
16	0,3	0,2	7,1	0,5	baik	baik
17	0,1	0,3	7,2	0,6	baik	baik
18	0,4	0,1	6,9	0,5	sedang	baik

19	0,3	0,2	7,0	0,5	sedang	baik
20	0,2	0,1	7,3	0,6	baik	baik
21	0,2	0,3	7,2	0,6	baik	baik
22	0,1	0,2	6,9	0,5	sedang	baik
23	0,3	0,1	7,1	0,5	baik	baik
24	0,4	0,2	7,0	0,5	sedang	baik
25	0,2	0,3	7,3	0,6	baik	baik
26	0,3	0,2	7,1	0,5	baik	baik
27	0,1	0,3	7,2	0,6	baik	baik

Tabel 4. 16 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Colored Water)

No	Input			Output	Kualitas air	
	Kekeruhan	Salinitas	pH	Nilai kualitas air	Predicted	Actual
1	5,3	0,4	6,1	0,2	buruk	buruk
2	4,8	0,5	6,2	0,2	buruk	buruk
3	5,7	0,6	5,9	0,3	buruk	buruk
4	5,1	0,4	6,0	0,2	buruk	buruk
5	6,0	0,5	6,3	0,2	buruk	buruk
6	5,2	0,6	6,1	0,3	buruk	buruk
7	4,9	0,4	6,2	0,2	buruk	buruk
8	5,6	0,5	5,9	0,2	buruk	buruk
9	5,0	0,3	6,0	0,2	buruk	buruk
10	6,1	0,4	6,3	0,2	buruk	buruk
11	5,4	0,5	6,1	0,2	buruk	buruk
12	4,7	0,6	6,2	0,4	buruk	buruk
13	5,8	0,4	5,9	0,2	buruk	buruk
14	5,1	0,5	6,0	0,2	buruk	buruk
15	6,2	0,3	6,3	0,2	buruk	buruk
16	5,3	0,4	6,1	0,2	buruk	buruk
17	4,6	0,5	6,2	0,2	buruk	buruk
18	5,9	0,6	5,9	0,3	buruk	buruk
19	5,2	0,4	6,0	0,2	buruk	buruk
20	6,0	0,5	6,3	0,2	buruk	buruk
21	5,5	0,3	6,1	0,2	buruk	buruk
22	4,8	0,4	6,2	0,2	buruk	buruk
23	5,7	0,5	5,9	0,2	buruk	buruk
24	5,0	0,6	6,0	0,3	buruk	buruk
25	6,3	0,4	6,3	0,2	buruk	buruk
26	5,4	0,5	6,1	0,2	buruk	buruk
27	4,7	0,6	6,2	0,4	buruk	buruk

28	5,8	0,4	5,9	0,2	buruk	buruk
----	-----	-----	-----	-----	-------	-------

Tabel 4.17 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Suspended Solids-laden Water)

No	Input			Output	Kualitas air	
	Kekeruhan	Salinitas	pH	Nilai kualitas air	Predicted	Actual
1	101,2	5,2	4,9	0,2	buruk	buruk
2	100,5	5,4	5,0	0,2	buruk	buruk
3	102,1	5,1	4,8	0,2	buruk	buruk
4	103,0	5,3	4,7	0,2	buruk	buruk
5	101,5	5,2	5,1	0,2	buruk	buruk
6	100,9	5,3	4,9	0,2	buruk	buruk
7	101,7	5,4	5,0	0,2	buruk	buruk
8	102,5	5,1	4,8	0,2	buruk	buruk
9	103,4	5,3	4,7	0,2	buruk	buruk
10	102,0	5,2	5,1	0,2	buruk	buruk
11	101,2	5,3	4,9	0,2	buruk	buruk
12	100,5	5,4	5,0	0,2	buruk	buruk
13	102,1	5,1	4,8	0,2	buruk	buruk
14	103,0	5,3	4,7	0,2	buruk	buruk
15	101,5	5,2	5,1	0,2	buruk	buruk
16	100,9	5,3	4,9	0,2	buruk	buruk
17	101,7	5,4	5,0	0,2	buruk	buruk
18	102,5	5,1	4,8	0,2	buruk	buruk
19	103,4	5,3	4,7	0,2	buruk	buruk
20	102,0	5,2	5,1	0,2	buruk	buruk
21	101,2	5,3	4,9	0,2	buruk	buruk
22	100,5	5,4	5,0	0,2	buruk	buruk
23	102,1	5,1	4,8	0,2	buruk	buruk
24	103,1	5,3	4,7	0,2	buruk	buruk
25	101,5	5,2	5,1	0,2	buruk	buruk
26	100,9	5,3	4,9	0,2	buruk	buruk

Tabel 4.18 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Softened Water)

No	Input			Output	Kualitas air	
	Kekeruhan	Salinitas	pH	Nilai kualitas air	Predicted	Actual
1	3,9	0,7	8,3	0,8	baik	baik
2	4,1	0,7	8,3	0,8	baik	baik
3	4,2	0,8	8,3	0,8	baik	baik
4	4,3	0,8	8,3	0,8	baik	baik
5	4,4	0,8	8,3	0,8	baik	baik
6	4,6	0,8	8,4	0,8	baik	baik

7	4,7	0,9	8,4	0,8	baik	baik
8	4,8	0,9	8,4	0,8	baik	baik
9	4,9	0,9	8,4	0,8	baik	baik
10	5,1	0,9	8,4	0,8	baik	baik
11	5,2	1,0	8,4	0,8	baik	baik
12	5,3	1,0	8,4	0,8	baik	baik
13	5,4	1,1	8,4	0,8	baik	baik
14	5,6	1,1	8,4	0,8	baik	baik
15	5,7	1,1	8,4	0,8	baik	baik
16	5,8	1,1	8,5	0,8	baik	baik
17	5,9	1,2	8,5	0,8	baik	baik
18	6,1	1,2	8,5	0,8	baik	baik
19	6,2	1,2	8,5	0,8	baik	baik
20	6,3	1,3	8,5	0,8	baik	baik
21	6,4	1,3	8,5	0,8	baik	baik
22	6,6	1,3	8,5	0,8	baik	baik
23	6,7	1,4	8,5	0,8	baik	baik
24	6,8	1,4	8,5	0,8	baik	baik
25	6,9	1,4	8,5	0,8	baik	baik
26	7,1	1,4	8,6	0,8	baik	baik

Tabel 4.19 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Hard Water)

No	Input			Output	Kualitas air	
	Kekeruhan	Salinitas	pH	Nilai kualitas air	Predicted	Actual
1	17,8	3,4	7,6	0,4	sedang	sedang
2	18,1	3,5	7,6	0,4	sedang	sedang
3	18,4	3,5	7,6	0,4	sedang	sedang
4	18,7	3,6	7,6	0,4	sedang	sedang
5	19,0	3,6	7,7	0,4	sedang	sedang
6	19,3	3,7	7,7	0,4	sedang	sedang
7	19,6	3,7	7,7	0,4	sedang	sedang
8	19,9	3,8	7,7	0,4	sedang	sedang
9	20,2	3,8	7,7	0,4	sedang	sedang
10	20,5	3,9	7,7	0,4	sedang	sedang
11	20,9	3,9	7,7	0,4	sedang	sedang
12	21,2	4,0	7,7	0,4	sedang	sedang
13	21,5	4,1	7,7	0,4	sedang	sedang
14	21,8	4,2	7,7	0,4	sedang	sedang
15	22,1	4,3	7,7	0,4	sedang	sedang
16	22,5	4,4	7,8	0,4	sedang	sedang
17	22,9	4,5	7,8	0,4	sedang	sedang
18	23,3	4,6	7,8	0,4	sedang	sedang
19	23,7	4,7	7,8	0,4	sedang	sedang
20	24,1	4,8	7,8	0,4	sedang	sedang

21	24,5	4,9	7,8	0,4	sedang	sedang
22	24,9	5,0	7,8	0,4	sedang	sedang
23	25,3	5,1	7,8	0,4	sedang	sedang
24	25,8	5,2	7,8	0,4	buruk	sedang
25	26,3	5,3	7,8	0,4	buruk	sedang
26	26,9	5,5	7,8	0,4	buruk	sedang

Tabel 4.20 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Ground Water)

No	Input			Output	Kualitas air	
	Kekeruhan	Salinitas	pH	Nilai kualitas air	Predicted	Actual
1	8,5	1,2	7,0	0,5	sedang	sedang
2	8,8	1,3	7,0	0,5	sedang	sedang
3	9,1	1,3	7,0	0,5	sedang	sedang
4	9,4	1,4	7,0	0,5	sedang	sedang
5	9,7	1,4	7,0	0,5	sedang	sedang
6	10,0	1,5	7,0	0,5	sedang	sedang
7	10,3	1,5	7,0	0,5	sedang	sedang
8	10,6	1,6	7,0	0,5	sedang	sedang
9	10,9	1,6	7,0	0,5	sedang	sedang
10	11,2	1,7	7,0	0,5	sedang	sedang
11	11,5	1,7	7,0	0,5	sedang	sedang
12	11,8	1,8	7,0	0,5	sedang	sedang
13	12,1	1,8	7,0	0,5	sedang	sedang
14	12,4	1,9	7,0	0,5	sedang	sedang
15	12,7	1,9	7,0	0,5	sedang	sedang
16	13,0	2,0	7,0	0,5	sedang	sedang
17	13,3	2,0	7,0	0,5	sedang	sedang
18	13,6	2,1	7,0	0,5	sedang	sedang
19	13,9	2,2	7,0	0,5	sedang	sedang
20	14,2	2,3	7,0	0,5	sedang	sedang
21	14,5	2,4	7,0	0,5	sedang	sedang
22	14,8	2,5	7,0	0,5	sedang	sedang
23	15,1	2,6	7,0	0,5	sedang	sedang
24	15,4	2,7	7,0	0,5	sedang	sedang
25	15,7	2,8	7,0	0,5	sedang	sedang
26	16,0	2,9	7,0	0,5	sedang	sedang

Tabel 4.21 Hasil perhitungan nilai output kualitas air (Air lumpur (Sludge Water))

No	Input			Output	Kualitas air	
	Kekeruhan	Salinitas	pH	Nilai kualitas air	Predicted	Actual
1	110,2	5,3	7,2	0,2	buruk	buruk
2	102,5	5,6	6,9	0,2	buruk	buruk

3	107,1	5,6	7,1	0,2	buruk	buruk
4	105,0	5,8	6,8	0,2	buruk	buruk
5	106,5	5,5	7,3	0,2	buruk	buruk
6	102,9	5,5	7,0	0,2	buruk	buruk
7	102,7	5,6	7,1	0,2	buruk	buruk
8	106,5	5,4	7,2	0,2	buruk	buruk
9	107,4	5,7	6,7	0,2	buruk	buruk
10	106,0	5,7	7,4	0,2	buruk	buruk
11	103,2	5,5	6,9	0,2	buruk	buruk
12	103,5	5,8	7,3	0,2	buruk	buruk
13	104,1	5,2	6,8	0,2	buruk	buruk
14	108,0	5,8	7,1	0,2	buruk	buruk
15	106,5	5,6	7,2	0,2	buruk	buruk
16	103,9	5,6	6,9	0,2	buruk	buruk
17	105,7	5,6	7,0	0,2	buruk	buruk
18	105,5	5,2	6,7	0,2	buruk	buruk
19	106,4	5,7	7,4	0,2	buruk	buruk
20	104,0	5,6	7,1	0,2	buruk	buruk
21	106,2	5,7	7,3	0,2	buruk	buruk
22	105,5	5,7	6,9	0,2	buruk	buruk
23	103,1	5,4	7,2	0,2	buruk	buruk
24	106,1	5,7	7,1	0,2	buruk	buruk
25	104,5	5,3	7,0	0,2	buruk	buruk
26	105,9	5,5	6,8	0,2	buruk	buruk

Pengujian dilakukan terhadap 185 sampel data dari berbagai jenis air, yang meliputi Distilled Water, Colored Water, Suspended Solids-laden Water, Softened Water, Air sumur (Ground Water), Hard Water, dan Air lumpur (Sludge Water). Sistem fuzzy Sugeno yang telah dikembangkan menggunakan tiga parameter utama yaitu kekeruhan, salinitas, dan pH sebagai dasar klasifikasi kualitas air. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sistem berhasil mengklasifikasikan 172 sampel secara tepat ke dalam kategori kualitas air baik, sedang, atau buruk, sementara 13 sampel lainnya mengalami ketidaksesuaian klasifikasi (*mismatch*) terhadap kategori yang diharapkan.

Performa sistem diukur menggunakan nilai akurasi, yang dihitung sebagai berikut:

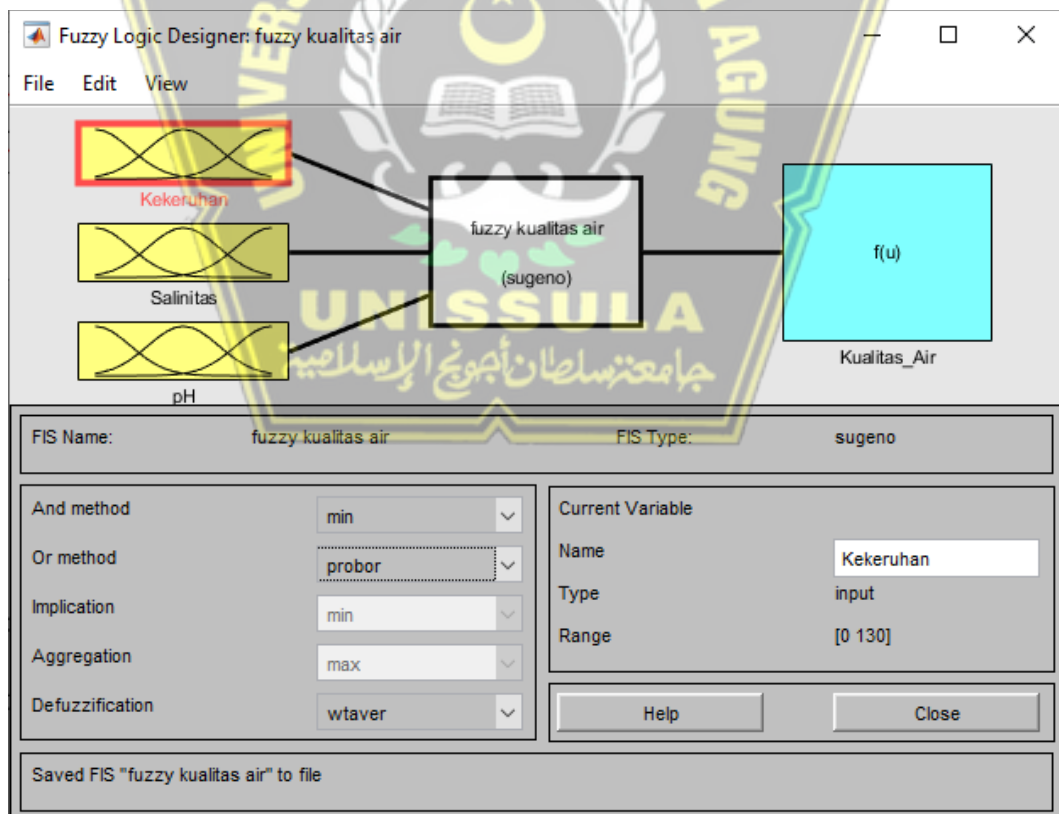
$$\begin{aligned}
 \text{Akurasi} &= \frac{\text{Jumlah prediksi benar}}{\text{Jumlah data}} \times 100\% \\
 &= \frac{172}{185} \times 100\%
 \end{aligned}$$

$$= 92.97\%$$

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem fuzzy yang dikembangkan terbukti efektif dan dapat diandalkan untuk membantu proses klasifikasi kualitas air secara otomatis dan cepat.

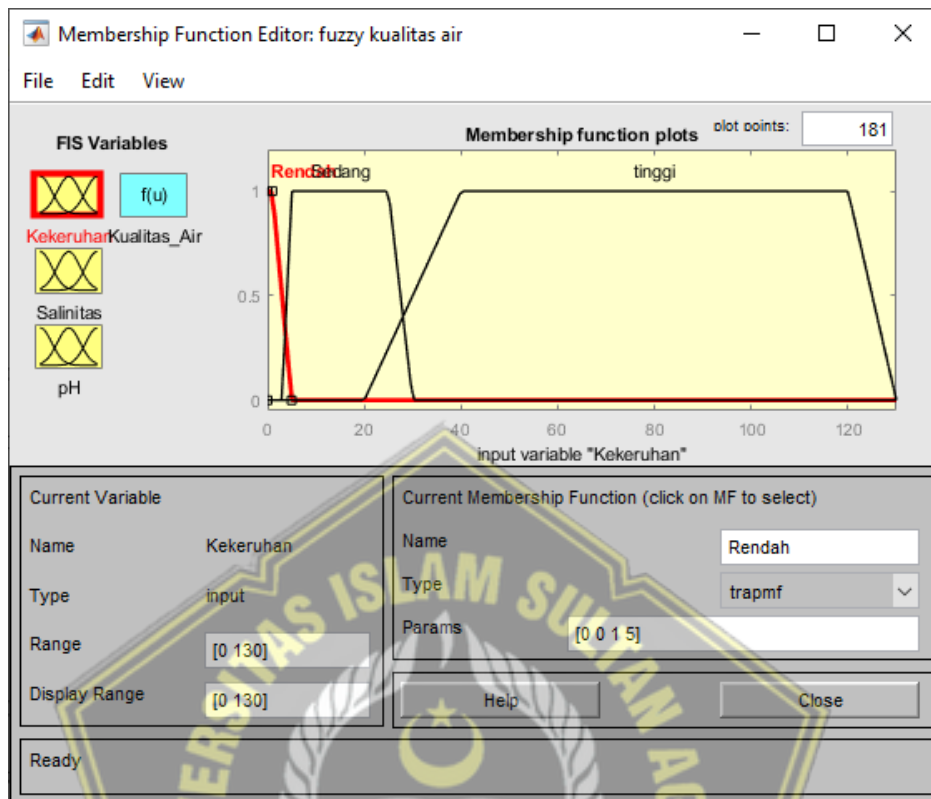
4.6. Penerapan Sistem Fuzzy Menggunakan Software MATLAB

Sistem fuzzy untuk analisis kualitas air yang dikembangkan diterapkan menggunakan software MATLAB. Penerapan ini membantu proses penilaian yang lebih objektif, khususnya ketika menghadapi data yang bersifat tidak pasti atau samar. Dengan memanfaatkan *Fuzzy Logic Toolbox* di MATLAB, parameter-parameter seperti kekeruhan, salinitas, dan pH dapat difuzzifikasi ke dalam kategori linguistik seperti “rendah,” “sedang,” dan “tinggi,” lalu dianalisis menggunakan aturan fuzzy untuk menentukan klasifikasi kualitas air, seperti “buruk,” “sedang,” atau “baik”. Tampilan *Fuzzy Logic Designer* untuk analisis kualitas air yang dikembangkan ditunjukkan pada Gambar 4.6.

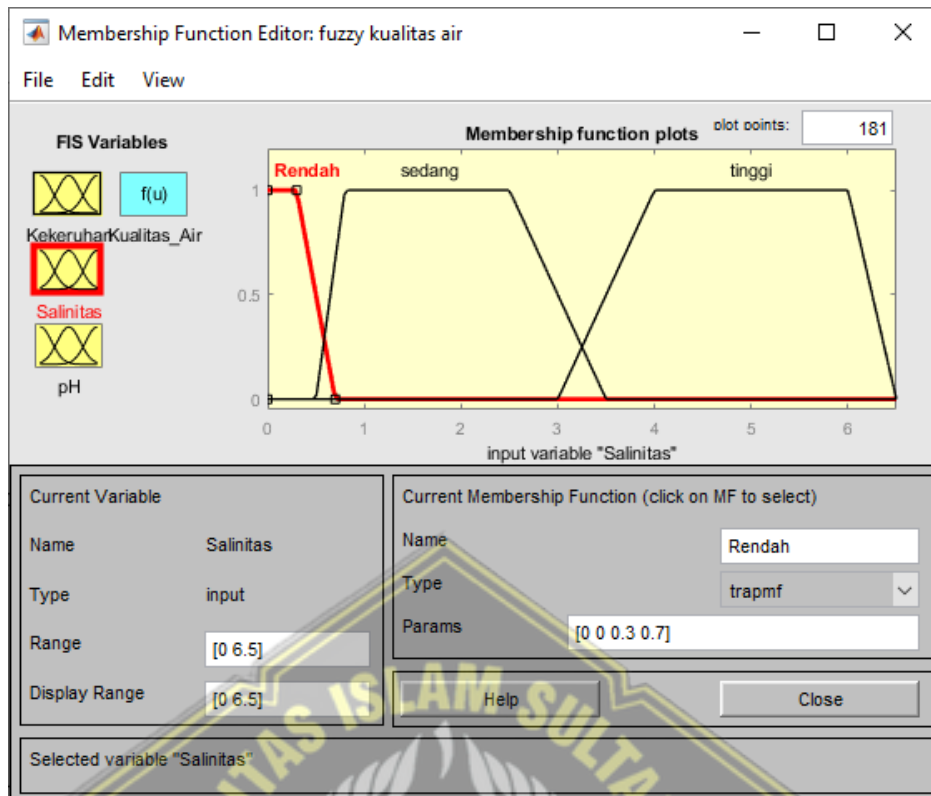


Gambar 4.6 Fuzzy Logic Designer untuk analisis kualitas air

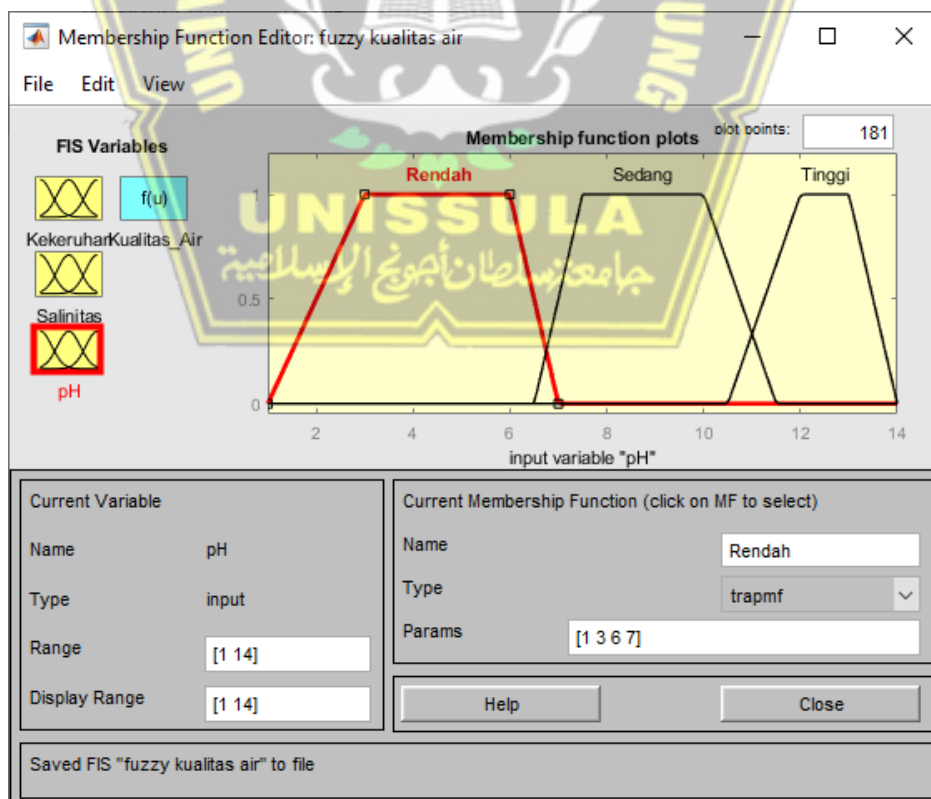
Sedangkan tampilan *Membership Function Editor* untuk variabel kekeruhan, salinitas, pH, dan kualitas air ditunjukkan pada Gambar 4.7, 4.8, 4.9, dan 4.10.



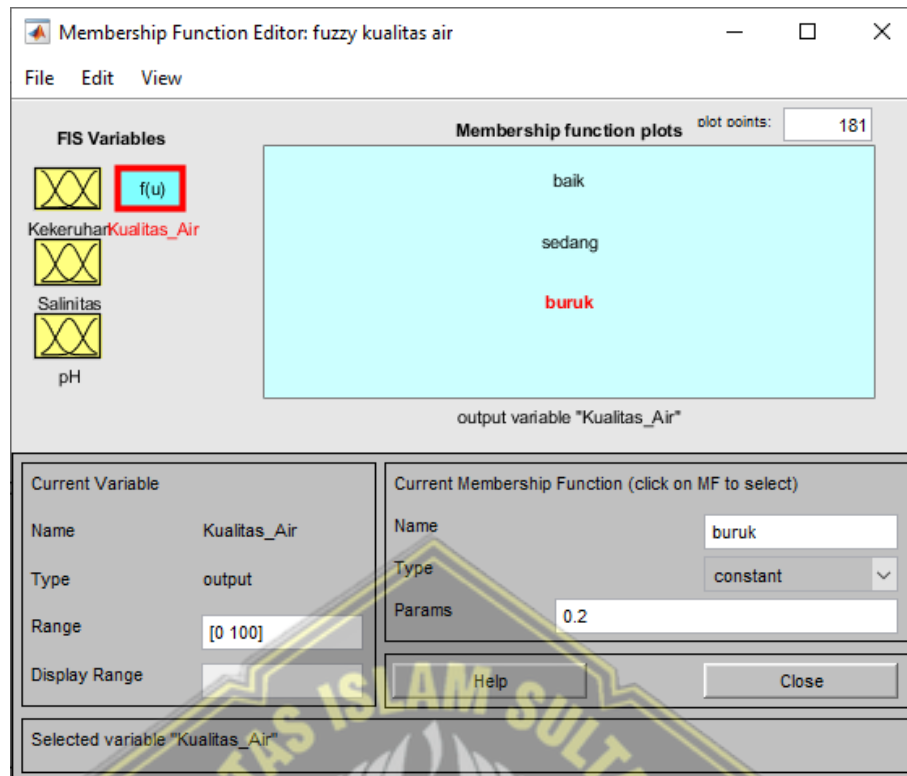
Gambar 4.7 Membership Function Editor untuk variabel input kekeruhan



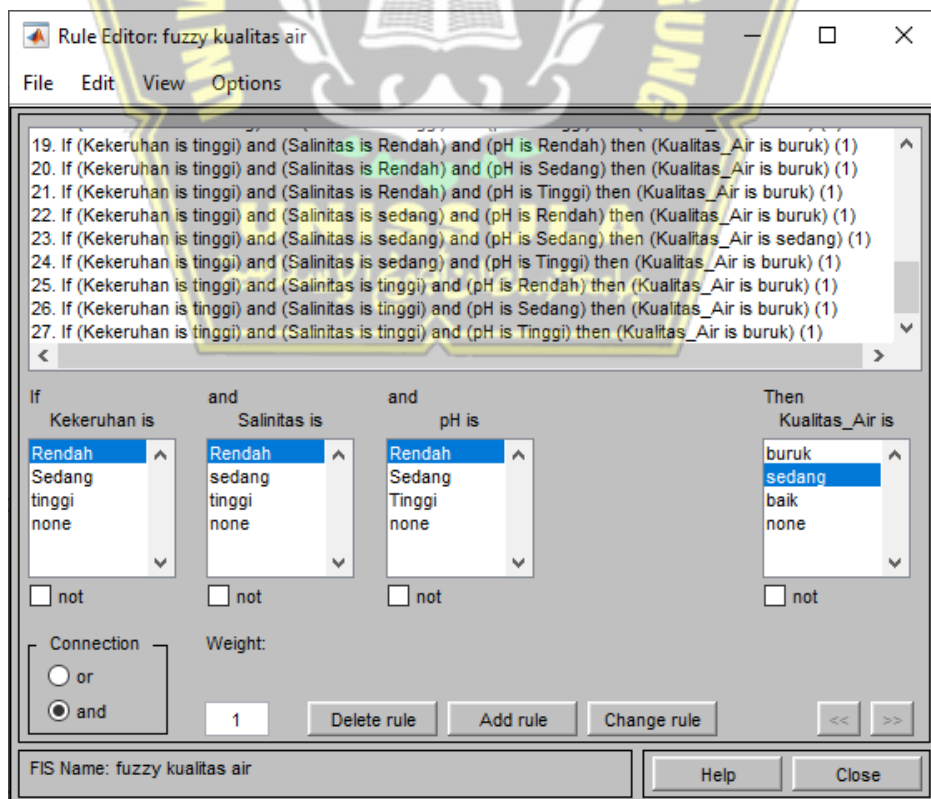
Gambar 4.8 Membership Function Editor untuk variabel input salinitas



Gambar 4.9 Membership Function Editor untuk variabel input pH



Gambar 4.10 Membership Function Editor untuk variabel output kualitas air
Tampilan *Rule Editor* yang berisi 27 aturan fuzzy ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Tampilan Rule Editor sistem fuzzy

Code program MATLAB untuk melakukan pengujian sistem fuzzy adalah sebagai berikut:

```
clc; clear; close all; warning off all;

% Load fuzzy system
fis = readfis('fuzzy kualitas air.fis');

% Baca data dari Excel
filename = 'data_fuzzy_kualitas_air.xlsx';
jenis_air = {"Distilled Water", "Colored Water", "Suspended Solids-laden Water", "Softened Water", ...
    "Hard Water", "Air sumur (Ground Water)", "Air lumpur (Sludge Water)"};

for k = 1:numel(jenis_air)
    data = readtable(filename, "Sheet", jenis_air{k});

    % Susun Data
    kekeruhan = data.Kekeruhan;
    salinitas = data.Salinitas;
    pH = data.pH;

    % Siapkan array output
    n = height(data);
    nilai_kualitas_air = zeros(n,1);

    kualitas_air = cell(n,1);
    % Loop per baris data dan hitung fuzzy output
    for i = 1:n
        input_values = [kekeruhan(i), salinitas(i), pH(i)];
        nilai_kualitas_air(i) = evalfis(input_values, fis);
        if nilai_kualitas_air(i) <= 0.4
            kualitas_air{i} = 'buruk';
        elseif nilai_kualitas_air(i) <= 0.5
            kualitas_air{i} = 'sedang';
        else
            kualitas_air{i} = 'baik';
        end
    end

    % Tampilkan hasil
    hasil = table(kekeruhan, salinitas, pH, nilai_kualitas_air, kualitas_air);
    disp(jenis_air{k})
    disp(hasil);
    % Simpan hasil ke Excel
    writetable(hasil, strcat('Hasil_', jenis_air{k}, '.xlsx'));
end
```

Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy menggunakan software MATLAB ditunjukkan pada Gambar 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, dan 4.18.

Command Window

Air Putih

kekeruhan	salinitas	pH	nilai_kualitas_air	kualitas_air
0.2	0.1	7.1	0.59231	{'baik' }
0.1	0.2	6.9	0.5	{'sedang'}
0.3	0.1	7.2	0.65	{'baik' }
0.4	0.2	7	0.5	{'sedang'}
0.2	0.3	7.3	0.68947	{'baik' }
0.3	0.2	7.1	0.59231	{'baik' }
0.1	0.3	7.2	0.65	{'baik' }
0.4	0.1	6.9	0.5	{'sedang'}
0.3	0.2	7	0.5	{'sedang'}
0.2	0.1	7.3	0.68947	{'baik' }
0.3	0.3	7.2	0.65	{'baik' }
0.1	0.2	6.9	0.5	{'sedang'}
0.2	0.1	7.1	0.59231	{'baik' }
0.4	0.2	7	0.5	{'sedang'}
0.2	0.3	7.3	0.68947	{'baik' }
0.3	0.2	7.1	0.59231	{'baik' }
0.1	0.3	7.2	0.65	{'baik' }
0.4	0.1	6.9	0.5	{'sedang'}
0.3	0.2	7	0.5	{'sedang'}
0.2	0.1	7.3	0.68947	{'baik' }
0.2	0.3	7.2	0.65	{'baik' }
0.1	0.2	6.9	0.5	{'sedang'}
0.3	0.1	7.1	0.59231	{'baik' }
0.4	0.2	7	0.5	{'sedang'}
0.2	0.3	7.3	0.68947	{'baik' }
0.3	0.2	7.1	0.59231	{'baik' }
0.1	0.3	7.2	0.65	{'baik' }

Gambar 4.12 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Distilled Water

Command Window

Air Teh

kekeruhan	salinitas	pH	nilai_kualitas_air	kualitas_air
5.3	0.4	6.1	0.2	{'buruk'}
4.8	0.5	6.2	0.22727	{'buruk'}
5.7	0.6	5.9	0.37143	{'buruk'}
5.1	0.4	6	0.2	{'buruk'}
6	0.5	6.3	0.2	{'buruk'}
5.2	0.6	6.1	0.37143	{'buruk'}
4.9	0.4	6.2	0.20968	{'buruk'}
5.6	0.5	5.9	0.2	{'buruk'}
5	0.3	6	0.2	{'buruk'}
6.1	0.4	6.3	0.2	{'buruk'}
5.4	0.5	6.1	0.2	{'buruk'}
4.7	0.6	6.2	0.39773	{'buruk'}
5.8	0.4	5.9	0.2	{'buruk'}
5.1	0.5	6	0.2	{'buruk'}
6.2	0.3	6.3	0.2	{'buruk'}
5.3	0.4	6.1	0.2	{'buruk'}
4.6	0.5	6.2	0.25	{'buruk'}
5.9	0.6	5.9	0.37143	{'buruk'}
5.2	0.4	6	0.2	{'buruk'}
6	0.5	6.3	0.2	{'buruk'}
5.5	0.3	6.1	0.2	{'buruk'}
4.8	0.4	6.2	0.21875	{'buruk'}
5.7	0.5	5.9	0.2	{'buruk'}
5	0.6	6	0.37143	{'buruk'}
6.3	0.4	6.3	0.2	{'buruk'}
5.4	0.5	6.1	0.2	{'buruk'}
4.7	0.6	6.2	0.39773	{'buruk'}
5.8	0.4	5.9	0.2	{'buruk'}

Gambar 4.13 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Colored Water

Command Window				
Air Kopi Bubuk				
kekeruhan	salinitas	pH	nilai_kualitas_air	kualitas_air
101.2	5.2	4.9	0.2	{'buruk'}
100.5	5.4	5	0.2	{'buruk'}
102.1	5.1	4.8	0.2	{'buruk'}
103	5.3	4.7	0.2	{'buruk'}
101.5	5.2	5.1	0.2	{'buruk'}
100.9	5.3	4.9	0.2	{'buruk'}
101.7	5.4	5	0.2	{'buruk'}
102.5	5.1	4.8	0.2	{'buruk'}
103.4	5.3	4.7	0.2	{'buruk'}
102	5.2	5.1	0.2	{'buruk'}
101.2	5.3	4.9	0.2	{'buruk'}
100.5	5.4	5	0.2	{'buruk'}
102.1	5.1	4.8	0.2	{'buruk'}
103	5.3	4.7	0.2	{'buruk'}
101.5	5.2	5.1	0.2	{'buruk'}
100.9	5.3	4.9	0.2	{'buruk'}
101.7	5.4	5	0.2	{'buruk'}
102.5	5.1	4.8	0.2	{'buruk'}
103.4	5.3	4.7	0.2	{'buruk'}
102	5.2	5.1	0.2	{'buruk'}
101.2	5.3	4.9	0.2	{'buruk'}
100.5	5.4	5	0.2	{'buruk'}
102.1	5.1	4.8	0.2	{'buruk'}
103.1	5.3	4.7	0.2	{'buruk'}
101.5	5.2	5.1	0.2	{'buruk'}
100.9	5.3	4.9	0.2	{'buruk'}

Gambar 4.14 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Suspended Solids-laden Water

Command Window

Air Softener

kekeruhan	salinitas	pH	nilai_kualitas_air	kualitas_air
3.9	0.7	8.3	0.8	{'baik'}
4.1	0.7	8.3	0.8	{'baik'}
4.2	0.8	8.3	0.8	{'baik'}
4.3	0.8	8.3	0.8	{'baik'}
4.4	0.8	8.3	0.8	{'baik'}
4.6	0.8	8.4	0.8	{'baik'}
4.7	0.9	8.4	0.8	{'baik'}
4.8	0.9	8.4	0.8	{'baik'}
4.9	0.9	8.4	0.8	{'baik'}
5.1	0.9	8.4	0.8	{'baik'}
5.2	1	8.4	0.8	{'baik'}
5.3	1	8.4	0.8	{'baik'}
5.4	1.1	8.4	0.8	{'baik'}
5.6	1.1	8.4	0.8	{'baik'}
5.7	1.1	8.4	0.8	{'baik'}
5.8	1.1	8.5	0.8	{'baik'}
5.9	1.2	8.5	0.8	{'baik'}
6.1	1.2	8.5	0.8	{'baik'}
6.2	1.2	8.5	0.8	{'baik'}
6.3	1.3	8.5	0.8	{'baik'}
6.4	1.3	8.5	0.8	{'baik'}
6.6	1.3	8.5	0.8	{'baik'}
6.7	1.4	8.5	0.8	{'baik'}
6.8	1.4	8.5	0.8	{'baik'}
6.9	1.4	8.5	0.8	{'baik'}
7.1	1.4	8.6	0.8	{'baik'}

Gambar 4.15 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Softened Water

Command Window

Air Sadah	kekeruhan	salinitas	pH	nilai_kualitas_air	kualitas_air
17.8	3.4	7.6	0.4625	{ 'sedang' }	
18.1	3.5	7.6	0.41429	{ 'sedang' }	
18.4	3.5	7.6	0.41429	{ 'sedang' }	
18.7	3.6	7.6	0.425	{ 'sedang' }	
19	3.6	7.7	0.44	{ 'sedang' }	
19.3	3.7	7.7	0.44706	{ 'sedang' }	
19.6	3.7	7.7	0.44706	{ 'sedang' }	
19.9	3.8	7.7	0.45263	{ 'sedang' }	
20.2	3.8	7.7	0.44742	{ 'sedang' }	
20.5	3.9	7.7	0.44545	{ 'sedang' }	
20.9	3.9	7.7	0.43684	{ 'sedang' }	
21.2	4	7.7	0.43622	{ 'sedang' }	
21.5	4.1	7.7	0.43077	{ 'sedang' }	
21.8	4.2	7.7	0.42556	{ 'sedang' }	
22.1	4.3	7.7	0.42059	{ 'sedang' }	
22.5	4.4	7.8	0.42642	{ 'sedang' }	
22.9	4.5	7.8	0.42305	{ 'sedang' }	
23.3	4.6	7.8	0.41978	{ 'sedang' }	
23.7	4.7	7.8	0.41661	{ 'sedang' }	
24.1	4.8	7.8	0.41352	{ 'sedang' }	
24.5	4.9	7.8	0.41053	{ 'sedang' }	
24.9	5	7.8	0.40761	{ 'sedang' }	
25.3	5.1	7.8	0.40071	{ 'sedang' }	
25.8	5.2	7.8	0.38947	{ 'buruk' }	
26.3	5.3	7.8	0.37689	{ 'buruk' }	
26.9	5.5	7.8	0.35966	{ 'buruk' }	

Gambar 4.16 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Hard Water

Command Window					
Air Sumur					
	kekeruhan	salinitas	pH	nilai_kualitas_air	kualitas_air
	8.5	1.2	7	0.5	{'sedang'}
	8.8	1.3	7	0.5	{'sedang'}
	9.1	1.3	7	0.5	{'sedang'}
	9.4	1.4	7	0.5	{'sedang'}
	9.7	1.4	7	0.5	{'sedang'}
	10	1.5	7	0.5	{'sedang'}
	10.3	1.5	7	0.5	{'sedang'}
	10.6	1.6	7	0.5	{'sedang'}
	10.9	1.6	7	0.5	{'sedang'}
	11.2	1.7	7	0.5	{'sedang'}
	11.5	1.7	7	0.5	{'sedang'}
	11.8	1.8	7	0.5	{'sedang'}
	12.1	1.8	7	0.5	{'sedang'}
	12.4	1.9	7	0.5	{'sedang'}
	12.7	1.9	7	0.5	{'sedang'}
	13	2	7	0.5	{'sedang'}
	13.3	2	7	0.5	{'sedang'}
	13.6	2.1	7	0.5	{'sedang'}
	13.9	2.2	7	0.5	{'sedang'}
	14.2	2.3	7	0.5	{'sedang'}
	14.5	2.4	7	0.5	{'sedang'}
	14.8	2.5	7	0.5	{'sedang'}
	15.1	2.6	7	0.5	{'sedang'}
	15.4	2.7	7	0.5	{'sedang'}
	15.7	2.8	7	0.5	{'sedang'}
	16	2.9	7	0.5	{'sedang'}

Gambar 4.17 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Air sumur (Ground Water)

Air Lumpur				
kekeruhan	salinitas	pH	nilai_kualitas_air	kualitas_air
110.2	5.3	7.2	0.2	{'buruk'}
102.5	5.6	6.9	0.2	{'buruk'}
107.1	5.6	7.1	0.2	{'buruk'}
105	5.8	6.8	0.2	{'buruk'}
106.5	5.5	7.3	0.2	{'buruk'}
102.9	5.5	7	0.2	{'buruk'}
102.7	5.6	7.1	0.2	{'buruk'}
106.5	5.4	7.2	0.2	{'buruk'}
107.4	5.7	6.7	0.2	{'buruk'}
106	5.7	7.4	0.2	{'buruk'}
103.2	5.5	6.9	0.2	{'buruk'}
103.5	5.8	7.3	0.2	{'buruk'}
104.1	5.2	6.8	0.2	{'buruk'}
108	5.8	7.1	0.2	{'buruk'}
106.5	5.6	7.2	0.2	{'buruk'}
103.9	5.6	6.9	0.2	{'buruk'}
105.7	5.6	7	0.2	{'buruk'}
105.5	5.2	6.7	0.2	{'buruk'}
106.4	5.7	7.4	0.2	{'buruk'}
104	5.6	7.1	0.2	{'buruk'}
106.2	5.7	7.3	0.2	{'buruk'}
105.5	5.7	6.9	0.2	{'buruk'}
103.1	5.4	7.2	0.2	{'buruk'}
106.1	5.7	7.1	0.2	{'buruk'}
104.5	5.3	7	0.2	{'buruk'}
105.9	5.5	6.8	0.2	{'buruk'}

Gambar 4.18 Tampilan hasil pengujian sistem fuzzy untuk Air lumpur (Sludge Water)

Dengan diterapkannya sistem fuzzy analisis kualitas air menggunakan software MATLAB, memungkinkan analisis dapat dilakukan lebih cepat terhadap berbagai skenario input dan evaluasi output dibandingkan dengan perhitungan secara manual.

4.7. Penerapan Sistem Fuzzy pada ESP32

Setelah melakukan penerapan sistem fuzzy analisis kualitas air menggunakan software MATLAB, maka diterapkan pula coding sistem fuzzy sugeno pada ESP32. Code sistem fuzzy sugeno pada penerapan di ESP32 adalah sebagai berikut:

```

#include <WiFi.h>
#include <FirebaseESP32.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// OLED config
#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET -1
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire,
OLED_RESET);

// Firebase config
#define FIREBASE_HOST "https://your-project-id.firebaseio.com/"
#define FIREBASE_AUTH "your-database-secret"
FirebaseData firebaseData;

// WiFi config
const char* ssid = "your-SSID";
const char* password = "your-PASSWORD";

// Pin konfigurasi
const int TDS_PIN = 34;
const int PH_PIN = 35;
const int TURBIDITY_PIN = 32;
#define ONE_WIRE_BUS 27

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

float TdsFactor = 0.5;
float offsetPH = 0.0;

String getKategoriKekeruhan(float t) {
    if (t <= 5) return "Rendah";
    else if (t <= 30) return "Sedang";
    else return "Tinggi";
}

String getKategoriSalinitas(float s) {
    if (s <= 0.7) return "Rendah";
    else if (s <= 3.5) return "Sedang";
    else return "Tinggi";
}

String getKategoriPH(float pH) {
    if (pH <= 8) return "Rendah";
    else if (pH <= 11.5) return "Sedang";
    else return "Tinggi";
}

float inferFuzzy(String keruh, String salin, String ph) {
    String rule = keruh + "," + salin + "," + ph;
    String kualitas;

```

```

if (rule == "Rendah,Rendah,Rendah") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Rendah,Rendah,Sedang") kualitas = "Baik";
else if (rule == "Rendah,Rendah,Tinggi") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Rendah,Sedang,Rendah") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Rendah,Sedang,Sedang") kualitas = "Baik";
else if (rule == "Rendah,Sedang,Tinggi") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Rendah,Tinggi,Rendah") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Rendah,Tinggi,Sedang") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Rendah,Tinggi,Tinggi") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Sedang,Rendah,Rendah") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Sedang,Rendah,Sedang") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Sedang,Rendah,Tinggi") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Sedang,Sedang,Rendah") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Sedang,Sedang,Sedang") kualitas = "Baik";
else if (rule == "Sedang,Sedang,Tinggi") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Sedang,Tinggi,Rendah") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Sedang,Tinggi,Sedang") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Sedang,Tinggi,Tinggi") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Tinggi,Rendah,Rendah") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Tinggi,Rendah,Sedang") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Tinggi,Rendah,Tinggi") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Tinggi,Sedang,Rendah") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Tinggi,Sedang,Sedang") kualitas = "Sedang";
else if (rule == "Tinggi,Sedang,Tinggi") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Tinggi,Tinggi,Rendah") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Tinggi,Tinggi,Sedang") kualitas = "Buruk";
else if (rule == "Tinggi,Tinggi,Tinggi") kualitas = "Buruk";
else kualitas = "Sedang";

if (kualitas == "Buruk") return 0.2;
else if (kualitas == "Sedang") return 0.5;
else return 0.8;
}

String interpretOutput(float out) {
    if (out <= 0.4) return "Buruk";
    else if (out <= 0.5) return "Sedang";
    else return "Baik";
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    if (!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
        Serial.println(F("OLED failed"));
        while (1);
    }
    display.clearDisplay();

    WiFi.begin(ssid, password);
    displayPrint("Connecting WiFi...");
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        delay(500);
        Serial.print(".");
    }
    displayPrint("WiFi Connected");
}

```

```

    Firebase.begin(FIREBASE_HOST, FIREBASE_AUTH);
    Firebase.reconnectWiFi(true);

    sensors.begin();
}

void loop() {
    sensors.requestTemperatures();
    float temperature = sensors.getTempCByIndex(0);

    int phValue = analogRead(PH_PIN);
    float voltagePH = phValue * (3.3 / 4095.0);
    float pH = 7 + ((2.5 - voltagePH) / 0.18) + offsetPH;

    int tdsValue = analogRead(TDS_PIN);
    float voltageTDS = tdsValue * (3.3 / 4095.0);
    float ec = (133.42 * pow(voltageTDS, 3) - 255.86 * pow(voltageTDS,
2) + 857.39 * voltageTDS) * 0.5;
    float tds = ec * TdsFactor;

    int turbidityValue = analogRead(TURBIDITY_PIN);
    float voltageTurb = turbidityValue * (3.3 / 4095.0);
    float turbidity = 100 - (voltageTurb * 100 / 3.3);

    String kategoriTurb = getKategoriKekeruhan(turbidity);
    String kategoriSalin = getKategoriSalinitas(ec);
    String kategoriPH = getKategoriPH(pH);

    float nilaiOutput = inferFuzzy(kategoriTurb, kategoriSalin,
kategoriPH);
    String kualitasAir = interpretOutput(nilaiOutput);

    display.clearDisplay();
    display.setTextSize(1);
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
    display.setCursor(0, 0);

    display.print("TDS: "); display.print(tds); display.println(" ppm");
    display.print("pH : "); display.println(pH, 2);
    display.print("Turb: "); display.print(turbidity); display.println("
NTU");
    display.print("Temp: "); display.print(temperature);
display.println(" C");
    display.print("Kualitas: "); display.println(kualitasAir);
    display.display();

    Firebase.setFloat(firebaseData, "/air_quality/tds", tds);
    Firebase.setFloat(firebaseData, "/air_quality/ph", pH);
    Firebase.setFloat(firebaseData, "/air_quality/turbidity",
turbidity);
    Firebase.setFloat(firebaseData, "/air_quality/temperature",
temperature);
    Firebase.setString(firebaseData, "/air_quality/kualitas",
kualitasAir);

    delay(5000);
}

```

```
}  
  
void displayPrint(String text) {  
    display.clearDisplay();  
    display.setCursor(0, 0);  
    display.setTextSize(1);  
    display.setTextColor(SSD1306_WHITE);  
    display.println(text);  
    display.display();  
}
```



BAB V

KESIMPULAN & SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Perancangan Sistem Monitoring Air Realtime: Telah berhasil dirancang sistem monitoring kualitas air pengumpanan ketel uap yang bekerja secara realtime dengan mengintegrasikan sensor pH, sensor suhu, sensor TDS, dan sensor turbidity (kekeruhan).
2. Pengujian dan Validasi Sistem: Sistem yang dikembangkan telah diuji dan terbukti mampu memantau parameter kualitas air secara stabil dan akurat, menunjukkan performa yang baik dalam pengambilan data secara realtime, dengan akurasi pemantauan sistem mencapai 92,97%.
3. Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Orde 0: Metode logika fuzzy Sugeno orde 0 telah berhasil diterapkan untuk mengolah data sensor dan mengklasifikasikan kualitas air menjadi kategori baik, sedang, dan buruk, dengan tingkat keakuratan klasifikasi sebesar 92,97% berdasarkan perhitungan Weighted Average.

5.2 Saran

1. Pengembangan Model: Melakukan pengembangan model fuzzy dengan menambahkan variabel input tambahan yang dapat memberikan informasi lebih komprehensif mengenai kualitas air. Hal ini dapat mencakup parameter-parameter seperti tingkat polutan tertentu atau variabel lain yang relevan dengan standar kualitas air.
2. Optimasi Bobot: Melakukan optimasi pada bobot setiap aturan fuzzy untuk meningkatkan akurasi sistem. Pengoptimalan ini dapat dilakukan melalui uji coba dan penyesuaian bobot berdasarkan analisis statistik terhadap data hasil uji coba.
3. Pengujian Lebih Lanjut: Melakukan pengujian lebih lanjut dengan membandingkan hasil monitoring sistem dengan metode lain atau perangkat serupa. Pengujian lintas *platform* dapat memberikan gambaran yang lebih mendalam mengenai keunggulan sistem ini.

4. Implementasi Praktis: Menyesuaikan sistem ini untuk implementasi praktis, seperti pada instalasi sistem monitoring air sungai atau dalam industri. Pengembangan lebih lanjut dapat mencakup penyempurnaan desain prototipe agar lebih mudah dipasang dan diintegrasikan dengan infrastruktur yang ada.
5. Pengoptimalan Kinerja Sensor: Mengevaluasi dan mengoptimalkan kinerja sensor yang digunakan, termasuk perawatan rutin dan kalibrasi secara berkala. Kondisi sensor yang optimal akan memastikan data yang dihasilkan akurat dan dapat diandalkan.

Penelitian ini memberikan landasan penting bagi pengembangan sistem monitoring kualitas air yang lebih canggih dan akurat di masa mendatang. Dengan implementasi saran-saran di atas, diharapkan sistem ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pemantauan dan pemeliharaan kualitas air yang berkelanjutan.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. S. Santosa, N. Astriawati, S. Salim, and I. A. Prasojo, "Optimalisasi Perawatan Sistem Auxiliary Boiler Dalam Menghasilkan Uap Panas," *Dinamika Bahari*, vol. 3, no. 2, pp. 69–77, Oct. 2022, doi: 10.46484/db.v3i2.312.
- [2] B. S. Panigrahi and K. Ganapathysubramanian, "Boiler Water Treatment," *Mineral Scales and Deposits: Scientific and Technological Approaches*, pp. 639–655, Jan. 2015, doi: 10.1016/B978-0-444-63228-9.00026-7.
- [3] A. N. Garai, I. Hamsir, A. Wahab, and A. P. Sardju, "Sistem Akuisisi Data Salinitas Pada Perairan Laut," *Jurnal PROtek*, vol. 05, no. 1, 2018.
- [4] Mus Mu'Alim and Sukardi, "Sistem Monitoring Boiler Air Berbasis Iot," *Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 2022, [Online]. Available: <https://ranahresearch.com>.
- [5] R. A. Purnomo, D. Syauqy, and M. H. Hanafi, "Implementasi Metode Fuzzy Sugeno Pada Embedded System Untuk Mendeteksi Kondisi Kebakaran Dalam Ruangan," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 2, no. 4, pp. 1428–1435, 2018, [Online]. Available: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [6] Y. Klistafani, R. Arsal, and R. Rahmawati, "Rancang Bangun Sistem Pengolahan Air Umpan Boiler Untuk Pengembangan Praktikum Sistem Pembangkit II," *Jurnal Teknik Mesin Sinergi*, vol. 19, no. 2, p. 183, Dec. 2021, doi: 10.31963/sinergi.v19i2.3026.
- [7] A. Irawan, S. Heranurweni, and T. Nurhayati, "Simulasi Ph Air Untuk Air Boiler Dan Air Chiller Pada Mesin Produksi Refrigerator Dengan Menggunakan Logika Fuzzy," *eLEKTRIKAL*, 2019.
- [8] Husnawati, Bhayu Gita Bernama, and Tarmizi, "Analisis Air Boiler Dengan Parameter Ph, Alkalinitas, Tds, Hardness Dan Silika Di Pt. Beurata Subur Persada," *AMINA*, 2021.
- [9] D. Despa *et al.*, *Monitoring dan Manajemen Energi Listrik Gedung Laboratorium Berbasis Internet of Things (IoT)*. Malang: FORT, 2018.
- [10] T. Juwariyah, D. Widiyanto, and S. Sulasmingsih, "Purwa Rupa Sistem Pengaman Sepeda Motor Berbasis IoT (Internet of Things)," *Ktrl.Inst (J.Auto.Ctrl.Inst)*, vol. 11, no. 1, p. 2019, 2019.
- [11] U. Syafiqoh *et al.*, "Pengembangan Wireless Sensor Network Berbasis Internet of Things untuk Sistem Pemantauan Kualitas Air dan Tanah Pertanian," *Jurnal Informatika: Jurnal Pengembangan IT (JPIT)*, no. 02, 2018.

- [12] E. Nurazizah, M. Ramdhani, and A. Rizal, "Rancang Bangun Termometer Digital Berbasis Sensor Ds18b20 Untuk Penyandang Tunanetra (Design Digital Thermometer Based On Sensor Ds18b20 For Blind People)," *e-Proceeding of Engineering*, 2017.
- [13] F. Tirta Kirana dan Suryono, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Kadar Salinitas Air Menggunakan Wireless Sensor Systems (WSS)," 2016.
- [14] Khanif Pramusinto and Suryono, "Sistem Monitoring Kekeruhan Air Menggunakan Jaringan Wireless Sensor System Berbasis Web," *Youngster Physics Journal*, Oct. 2016.
- [15] B. Mohamad Yusuf Efendi, J. Eka Chandra, and M. Yusuf Efendi & Joni Eka Chandra, "Implementasi Internet of Things Pada Sistem Kendali Lampu Rumah Menggunakan Telegram Messenger Bot Dan Nodemcu Esp 8266," *Global Journal of Computer Science and Technology: A Hardware & Computation*, 2019.
- [16] M. Artiyasa, I. Himawan Kusumah, F. Firmansyah, M. Arif Efendi, and M. Iriyanto, "Studi Perbandingan Platform Internet of Things (IoT) untuk Smart Home Kontrol Lampu Menggunakan NodeMCU dengan Aplikasi Web Thingspeak dan Blynk," 2020.
- [17] D. Fuzzy, S. Untuk, P. Kualitas, C. Beton, and I. Supina Batubara, "Analisis Perbandingan Metode Fuzzy Mamdani," *Journal Research and Development*, vol. 2, no. 1, 2017.
- [18] D. L. Rahakbauw, "Penerapan Logika Fuzzy Metode Sugeno Untuk Menentukan Jumlah Produksi Roti Berdasarkan Data Persediaan Dan Jumlah Permintaan (Studi Kasus: Pabrik Roti Sarinda Ambon)," 2015.
- [19] Book, "Metode Penelitian Ekonomi Syariah," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344211215>
- [20] "Metode Penelitian - Dr. Muhammad Ramdhan, S.Pd., M.M. - Google Books." Accessed: May 30, 2025. [Online]. Available: https://books.google.co.id/books?id=Ntw_EAAAQBAJ&printsec=copyright&source=gbs_pub_info_r#v=onepage&q&f=false
- [21] M. Faisal and D. Puryanti, "Perancangan Sistem Monitoring Tingkat Kekeruhan Air Secara Realtime Menggunakan Sensor Tsd-10," 2016.
- [22] H. Hariyadi, M. Kamil, and P. Ananda, "Sistem Pengecekan Ph Air Otomatis Menggunakan Sensor Ph Probe Berbasis Arduino Pada Sumur Bor," *Rang Teknik Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 340–346, Jun. 2020, doi: 10.31869/rtj.v3i2.1930.
- [23] Degrémont, "Water Treatment Handbook, 6th ed." *Paris, France: Lavoisier*, 1991. (ISBN: 2-9503984-1-3).

