https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i3.333

IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)

Vol. 4, No. 3, 2025, pp. 108-119, e-ISSN: 2962-4290

Available online http://e-journals.irapublishing.com/index.php/IRAJTMA/

Scientific Articles

Desain Logika Fuzzy untuk Penilaian Kualitas Air Sumur Berdasarkan Parameter Salinitas, pH, dan Kekeruhan

Fuzzy Logic Design for Well Water Quality Assessment Based on Salinity, pH and Turbidity Parameters

Aan Burhanuddin[1], Agus Mukhtar[1], Rifki Hermana[1], Muhammad Amirudin[2], Muchamad Malik[1]*, Althesa Androva[1], Hisyam Ma'mun[1], Mohammad Fadillah[1], Ezze Zhain Zhiqqi Prihantono[1], Subkhan Ma'mum[1]

[1]Teknik Mesin, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang 50232, Indonesia

[2]Teknik Elektro, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang 50232, Indonesia

**Corresponding author*: muchamadmalik@upgris.ac.id

Diterima: 06-10-2025 **Disetujui: 20-11-2025** **Dipublikasikan: 28-12-2025**

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Abstrak

Penelitian ini mengembangkan sistem penilaian kualitas air sumur berbasis logika fuzzy yang terintegrasi dengan sensor pH, salinitas (melalui konversi TDS), dan kekeruhan. Tujuan penelitian adalah menciptakan sistem yang mampu menangani ketidakpastian parameter kualitas air secara waktu nyata di wilayah pesisir Semarang. Metode yang digunakan meliputi pengujian kinerja sensor, fuzzifikasi input, inferensi aturan fuzzy, dan defuzzifikasi menggunakan MATLAB. Hasil pengujian menunjukkan kinerja metrologis sensor yang exceptional, dengan koefisien determinasi (R^2) mencapai 0,9995 untuk pH, 0,9998 untuk salinitas, 0,9996 untuk suhu, dan 0,9993 untuk kekeruhan. Sistem berhasil mengidentifikasi kondisi aktual kualitas air sumur di 6 kelurahan, dimana 83,3% sampel memenuhi baku mutu pH, 60% memenuhi standar kekeruhan, dan 33,3% sampel di Genuksari menunjukkan indikasi intrusi air laut dengan salinitas >0,5 ppt. Simpulan penelitian membuktikan bahwa sistem logika fuzzy yang dikembangkan mampu memberikan evaluasi kualitas air yang akurat, konsisten, dan berpotensi diimplementasikan dalam sistem *smart water monitoring* untuk wilayah pesisir.

Kata Kunci: Logika Fuzzy, Kualitas Air Sumur, Sensor pH, Salinitas, Kekeruhan.

Abstract

This study develops an integrated fuzzy-logic-based assessment system to evaluate well water quality using pH, salinity (via TDS conversion), and turbidity. The research aims to develop an adaptive system capable of handling uncertainties in water quality parameters in real-time monitoring across Semarang's coastal areas. The methodology incorporates sensor performance validation, fuzzy input processing, rule-based inference, and defuzzification implemented through MATLAB R2021a. Experimental results demonstrate exceptional metrological performance, with sensor linearity achieving determination coefficients (R^2) of 0.9995 for pH, 0.9998 for salinity, 0.9996 for temperature, and 0.9993 for turbidity. Statistical validation confirmed measurement precision, with root-mean-square errors (RMSEs) of 0.018 pH units, 0.023 ppt salinity, 0.14°C temperature, and 0.027 NTU turbidity. Field implementation across 6 sub-districts revealed that 83.3% of samples complied with pH quality standards, 60% met turbidity thresholds, while 33.3% of samples in Genuksari exhibited seawater intrusion indicators with salinity levels exceeding 0.5 ppt. The study conclusively demonstrates that the developed fuzzy logic system provides accurate, consistent water quality evaluation and presents a viable framework for smart water monitoring infrastructure in coastal urban environments, particularly for detecting saline intrusion and maintaining water security.

***Keywords**: Fuzzy Logic, Well Water Quality, pH Sensor, Salinity Monitoring, Turbidity Measurement.*

1. Pendahuluan

Ketersediaan air bersih merupakan kebutuhan fundamental bagi kehidupan manusia dan ekosistem lingkungan (Feninlambir et al. 2024; Nanda et al. 2023). Di kota-kota besar seperti Semarang, sumber air tanah melalui sumur menjadi alternatif penting dalam memenuhi kebutuhan air bersih masyarakat (Anggraeni et al. 2025), terutama di daerah yang belum terjangkau jaringan air minum perpipaan. Namun demikian, kualitas air sumur di daerah perkotaan pesisir seperti Semarang seringkali menghadapi berbagai tantangan yang dapat mengganggu kelayakan konsumsinya. Peningkatan aktivitas urbanisasi, industrialisasi, serta perubahan iklim telah memberikan tekanan signifikan terhadap kualitas sumber air tanah, sehingga diperlukan sistem penilaian yang akurat untuk menjamin keamanan konsumsi air sumur oleh masyarakat(Darmanto 2023).

Kondisi geografis Semarang sebagai kota pesisir dengan karakteristik tanah aluvial dan tingkat penurunan muka tanah yang semakin meningkat telah menimbulkan isu kritis terkait kualitas air sumur(Anggraeni et al. 2025). Beberapa studi terkini menunjukkan bahwa air sumur di kawasan pesisir Semarang mengalami peningkatan salinitas akibat intrusi air laut yang semakin meluas, yang diperburuk oleh eksploitasi air tanah yang masif (Anggraeni et al. 2025). Selain itu, parameter pH dan kekeruhan juga menjadi indikator penting yang seringkali berfluktuasi akibat kontaminasi limbah domestik dan industri, sehingga menimbulkan keresahan di kalangan masyarakat pesisir yang menggantungkan akses air bersihnya(Ujianti et al. 2025).

Metode konvensional seringkali menghadapi keterbatasan dalam menghadapi sifat nonlinier dan ketidakpastian data parameter kualitas air. Logika fuzzy muncul sebagai alternatif solusi yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan ini. Berbeda dengan logika boolean yang hanya mengenal dua nilai (benar/salah), logika fuzzy mampu mengolah data dengan derajat keanggotaan yang gradual, sehingga lebih sesuai untuk merepresentasikan variabel-variabel kualitas air yang bersifat kontinu(Yuan et al. 2025; Zarei et al. 2026; Carnero 2026; Zhang et al. 2026; Liu et al. 2026; Dong et al. 2026; Morchid et al. 2025). Dalam konteks teknologi lingkungan, logika fuzzy telah terbukti efektif dalam mengintegrasikan berbagai parameter kualitas air yang memiliki satuan dan rentang nilai berbeda menjadi satu indeks kualitas yang lebih komprehensif dan mudah diinterpretasikan oleh pengguna(Minh et al. 2019).

Salinitas, pH, dan kekeruhan dipilih sebagai parameter utama dalam penelitian ini karena relevansinya yang signifikan dengan kondisi air sumur di Semarang dan dampaknya terhadap kesehatan masyarakat(Rahmatullah, Nurbia, et Abubakar 2025; Jannah 2021; Sari et Hulja 2019). Salinitas yang tinggi tidak hanya memengaruhi rasa air tetapi juga berpotensi menyebabkan masalah kesehatan seperti hipertensi jika dikonsumsi dalam jangka panjang. Parameter pH menjadi indikator penting untuk menentukan tingkat keasaman atau kebasaan air yang akan memengaruhi kelarutan dan toksisitas senyawa kimia dalam air. Sementara itu, kekeruhan air mencerminkan keberadaan partikel tersuspensi yang dapat menjadi medium pertumbuhan mikroorganisme patogen dan mengganggu efektivitas proses desinfeksi. Ketiga parameter ini telah menjadi fokus dalam beberapa penelitian terkini tentang kualitas air sumur di kawasan pesisir, termasuk di Semarang.

Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan potensi besar penerapan logika fuzzy dalam sistem pemantauan kualitas air, namun masing-masing masih terbatas dalam cakupan parameter, konteks aplikasi, atau respons sistem. Fitriani et al. (2019) melakukan penelitian dengan fokus pada salinitas dan kekeruhan, serta menampilkan hasil secara visual menarik melalui grafik, tetapi tidak menyertakan notifikasi kepada pengguna maupun mekanisme respons otomatis seperti pompa (Fitriani, Widyaningrum, et Umiatin 2019). Penelitian yang

dilakukan oleh Sheed et al. (2019) memperluas cakupan parameter dengan menggunakan Fuzzy Water Pollution Index yang mencakup oksigen terlarut, BOD, amonia, dan fosfor, namun pengukuran dilakukan secara tidak langsung tanpa sistem real-time, sehingga kurang responsif terhadap perubahan kualitas air secara instan(Syeed et al. 2023). Bhardwaj et al (2023) menghadirkan solusi real-time berbasis Raspberry Pi yang memantau pH, suhu, dan kekeruhan, meskipun visualisasinya terbatas hanya pada grafik tanpa integrasi sistem aktuator(Bhardwaj et al. 2023). Penelitian yang lain, yaitu Maulana et al. (2025) dan Ujianti et al. (2025), memperlihatkan integrasi logika fuzzy dengan IoT dalam konteks akuaponik dan irigasi tetes. Maulana et al. (2025) menggunakan inferensi fuzzy Tsukamoto untuk pemantauan pH dan ketinggian air serta menyimpan data dalam database, tetapi hanya mengukur satu parameter kualitas air (pH). Sementara itu, Ujianti et al. (2025) mengusung konsep IoT dengan aplikasi mobile, namun fokus pada parameter tanah dan suhu, bukan kualitas air secara langsung. Dari keseluruhan tinjauan, tampak jelas bahwa meskipun telah banyak kemajuan dalam aspek monitoring dan visualisasi, masih terdapat celah signifikan dalam pengembangan sistem yang mampu tidak hanya menilai kualitas air secara real-time dengan multi-parameter, tetapi juga memberikan respons otomatis berbasis hasil inferensi fuzzy. Penelitian ini tidak hanya mengadopsi pendekatan waktu nyata dan visualisasi data, tetapi juga mengusulkan integrasi sistem respons otomatis yang dapat menjadi dasar bagi sistem *smart water management* di daerah rawan krisis air seperti pesisir Semarang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pendeteksi kualitas air sumur berbasis logika fuzzy yang mampu memberikan penilaian yang akurat dan adaptif terhadap variasi parameter salinitas, pH, dan kekeruhan di wilayah Semarang.

2. Metode

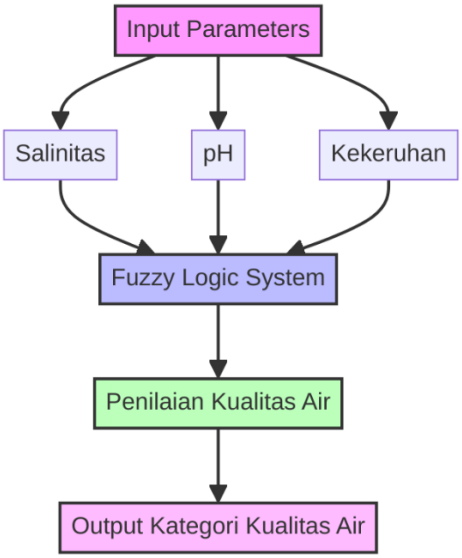
Penelitian ini dilaksanakan pada periode Januari hingga September 2025 di Kota Semarang, Jawa Tengah. Lokasi penelitian difokuskan pada wilayah pesisir yang rentan terhadap intrusi air laut, yaitu Kecamatan Semarang Utara, Genuk, dan Tugu. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada data historis yang menunjukkan penurunan kualitas air tanah akibat proses intrusi air laut dan pencemaran dari aktivitas perkotaan. Pada penelitian ini menggunakan 30 sampel air sumur. Pengambilan sampel dilakukan di enam kelurahan, dengan masing-masing kelurahan di ambil lima sampel air sumur.

Penelitian ini mengadopsi pendekatan metode campuran (mixed methods) yang menggabungkan survei lapangan, analisis laboratorium, dan pemodelan komputasi (Creswell et Inoue 2025). Rancangan kegiatan penelitian terdiri dari tiga tahap utama: (1) survei awal untuk identifikasi lokasi sampling, (2) pengumpulan dan pengujian sampel air sumur, dan (3) pengembangan sistem inferensi fuzzy untuk penilaian kualitas air. Desain ini dipilih untuk memastikan validitas data lapangan sekaligus mengembangkan model yang adaptif terhadap karakteristik nonlinier parameter kualitas air.

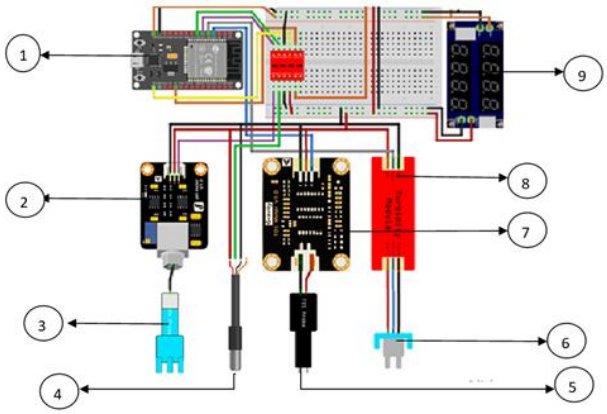
Software MATLAB R2023a dengan Fuzzy Logic Toolbox dalam proses pengembangan sistem inferensi fuzzy (Malik et Burhanuddin 2018). Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada pengembangan sistem fuzzy logic untuk menilai kualitas air sumur berdasarkan tiga parameter utama: salinitas (dinyatakan dalam mg/L atau ppt), pH (skala 0-14), dan kekeruhan (dinyatakan dalam NTU). Objek penelitian adalah air sumur gali dan sumur bor yang digunakan untuk kebutuhan domestik (non-PDAM) di wilayah pesisir Kota Semarang.

Prosedur penelitian mengikuti alur kerja sistematis yang terdiri dari tujuh tahap utama. Tahap pertama adalah identifikasi lokasi sampling berdasarkan peta kerentanan intrusi air laut dan data historis kualitas air tanah. Tahap kedua adalah pengambilan sampel air sumur dengan

mematuhi protokol standar pengambilan sampel air. Tahap ketiga adalah pengukuran parameter fisikokimia (salinitas, pH, dan kekeruhan) baik secara in-situ maupun di laboratorium. Tahap keempat adalah validasi data untuk memastikan akurasi dan konsistensi hasil pengukuran. Tahap kelima adalah normalisasi data input untuk memastikan kesesuaian dengan rentang nilai sistem fuzzy. Tahap keenam adalah desain sistem inferensi fuzzy yang meliputi fuzzifikasi variabel input, pembuatan basis aturan inferensi, dan defuzzifikasi variabel output. Tahap ketujuh adalah evaluasi sistem menggunakan data uji untuk mengukur tingkat akurasi dan performa model fuzzy yang dikembangkan.



Gambar 1. Diagram Alir Sistem



Keterangan bagian alat:

1. Mikrokontroler
2. Probe Sensor TDS
3. Head Sensor TDS
4. Sensor Suhu
5. Head Sensor pH
6. Head sensor Kekeruhan
7. Probe Sensor pH
8. Probe Sensor Kekeruhan
9. Layar penampil nilai sensor

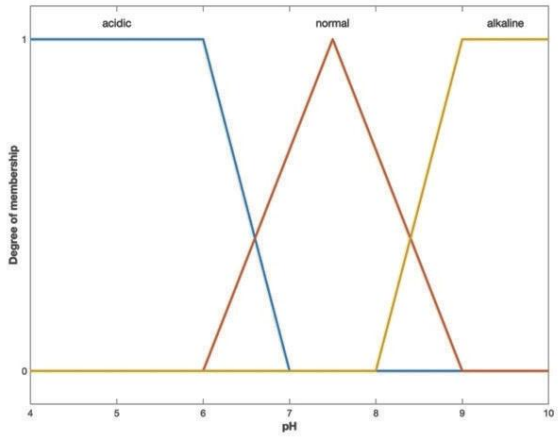
Gambar 2. Rangkaian Sistem Elektronika

Analisis data dalam penelitian ini menggunakan sistem inferensi logika fuzzy dengan tiga variabel input (salinitas, pH, dan kekeruhan) dan satu variabel output (kategori kualitas air). Variabel input dan output didefinisikan dalam himpunan fuzzy dengan fungsi keanggotaan segitiga dan trapesium. Proses fuzzifikasi mengubah nilai input krisp menjadi derajat keanggotaan fuzzy. Basis aturan inferensi dikembangkan berdasarkan kombinasi dari semua himpunan fuzzy input dengan menggunakan logika "AND" untuk menghubungkan antecedent, menghasilkan 27 aturan fuzzy. Metode implikasi yang digunakan adalah min-prodksi, sedangkan komposisi aturan menggunakan metode max. Proses defuzzifikasi mengubah output fuzzy menjadi nilai krisp dengan metode centroid untuk menentukan kategori kualitas air (Baik, Sedang, atau Buruk). Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil penilaian fuzzy dengan kriteria baku mutu air minum dan menghitung tingkat akurasi menggunakan *confusion matrix*.

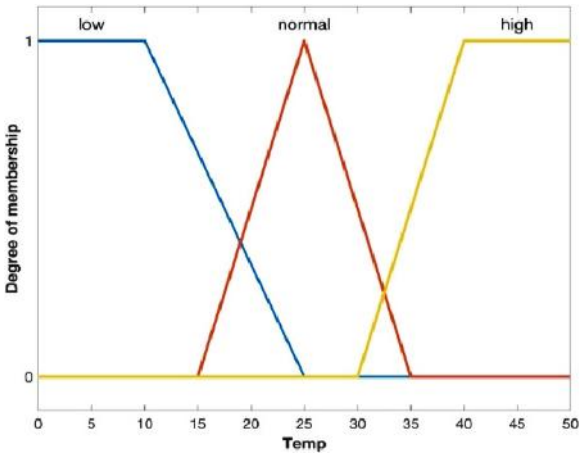
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Implementasi Fuzzy

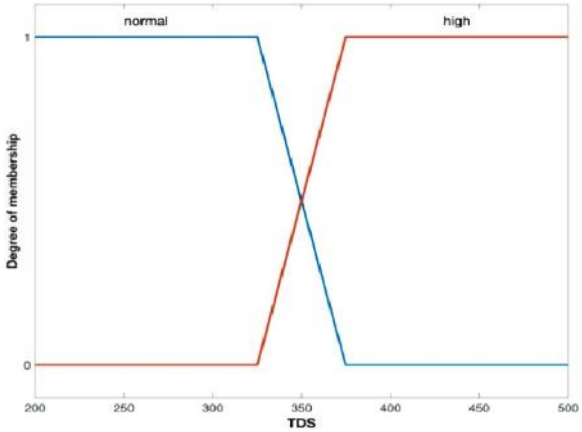
Logika fuzzy dikenal luas sebagai pendekatan yang efektif dalam mengatasi ketidakpastian dan subjektivitas pada permasalahan lingkungan yang kompleks, sekaligus menyediakan metodologi yang memadai untuk merepresentasikan, memanipulasi, dan menerapkan pengetahuan dalam sistem kontrol. Penerapannya telah terbukti dalam berbagai konteks, seperti pengendalian katup penambahan asam dan basa, serta pengaturan saklar pemanas dan pendingin Peltier pada biofilter untuk menjaga kondisi optimal. Studi lain juga memanfaatkan logika fuzzy untuk mengatur level pH dan konduktivitas listrik pada tangki campuran nutrisi secara otomatis.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Sensor pH



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Sensor Suhu



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan Sensor Salinitas

Baru-baru ini, pendekatan serupa diadopsi untuk menganalisis kualitas air dalam budidaya ikan nila, meskipun hanya menggunakan tiga parameter masukan. Dalam penelitian ini, meskipun terdapat banyak parameter limnologis yang dapat digunakan untuk menentukan kualitas air, fokus dibatasi pada empat parameter utama: pH, suhu, *Total Dissolved Solids* (TDS), dan *Dissolved Oxygen* (DO), yang secara langsung merepresentasikan kondisi kelayakan air terutama di wilayah pesisir. Sistem inferensi fuzzy (FIS) dirancang menggunakan MATLAB R2021a dengan empat masukan dan satu keluaran, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Variabel linguistik yang digunakan meliputi: pH (asam, normal, alkalin), suhu (rendah, normal, tinggi), Salinitas (normal, tinggi). Fungsi keanggotaan untuk pH didefinisikan dalam rentang 4,0–7,0 untuk *asam*, 6,0–9,0 untuk *normal*, dan 8,0–10,0 untuk *alkalin*. Sementara itu, keanggotaan suhu menggunakan fungsi trapesium dan segitiga dengan kategori *rendah* (0°C–

25°C), *normal* (15°C–35°C), dan *tinggi* (30°C–50°C). Pendefinisian domain dan bentuk kurva ini dilakukan berdasarkan standar kualitas air, kondisi lingkungan lokal, serta hasil evaluasi sistematis untuk memastikan akurasi dan responsivitas sistem.

3.2. Pengujian Fuzzy *Logic*

Pada penelitian ini, sensor suhu digunakan untuk kalibrasi pada sensor TDS. Kemudian dilakukan pengujian sistem logika fuzzy yang dirancang untuk menentukan kualitas air berdasarkan dua parameter utama, yaitu pH dan *Total Dissolved Solids* (TDS). Pengujian dengan nilai input pH = 4,01 dan TDS = 605. Langkah pertama dalam proses inferensi fuzzy adalah menentukan derajat keanggotaan untuk setiap himpunan fuzzy pada variabel input. Untuk parameter pH, diperoleh hasil: pH Asam = 1, pH Normal = 0, dan pH Basa = 0. Nilai ini menunjukkan bahwa input pH 4,01 memiliki keanggotaan penuh (derajat 1) pada himpunan Asam dan tidak memiliki keanggotaan pada himpunan Normal maupun Basa. Sementara itu, untuk parameter Salinitas menggunakan sensor berbasis TDS dengan mengkonversikan nilai TDS menjadi nilai salinitas. Perhitungan derajat keanggotaan menghasilkan: TDS Rendah = (800−605):(800-0) setara dengan nilai salinitas = 0,24; TDS Sedang = (605−600):(800-600) setara nilai salinitas = 0,025; dan TDS Tinggi setara nilai salinitas= 0. Dari nilai TDS tersebut kemudian diambli klasifikasi untuk nilai salinitas normal adalah lebih dari 0,24 dan salinitas tinggi adalah kurang dari 0,23.

Setelah mendapatkan nilai derajat keanggotaan untuk setiap himpunan fuzzy, langkah selanjutnya adalah menerapkan fungsi implikasi MIN dan aturan fuzzy yang telah didefinisikan sebelumnya. Sistem ini memiliki tiga output kualitas air: Baik (nilai crisp = 1), Kurang Baik (nilai crisp = 0,5), dan Buruk (nilai crisp = 0).

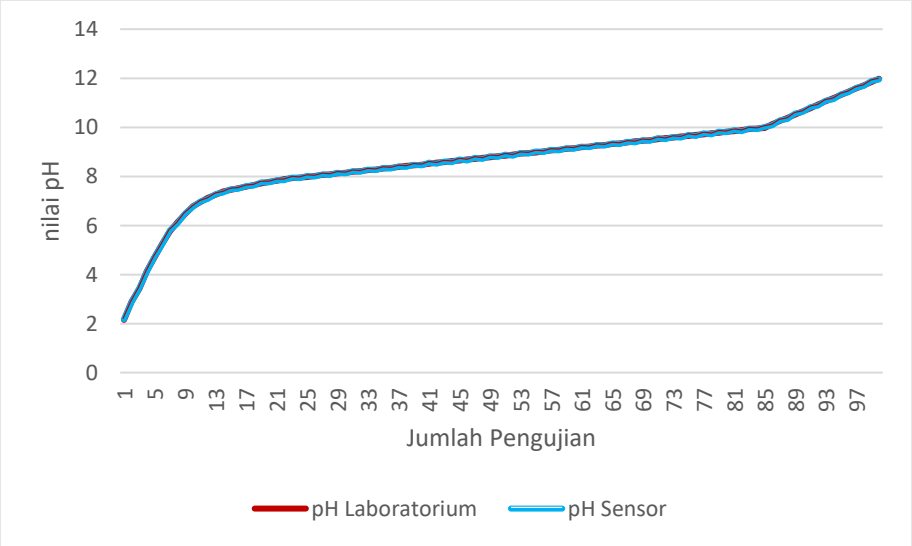
Proses defuzzifikasi selanjutnya akan mengkombinasikan nilai-nilai implikasi ini dengan bobot crisp output masing-masing aturan untuk menghasilkan output akhir yang tunggal. Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa sistem logika fuzzy mampu menghasilkan output kualitas air secara konsisten berdasarkan aturan yang didefinisikan, dengan tingkat akurasi yang dapat dibandingkan dengan perhitungan manual. Validasi ini membuktikan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki potensi untuk diimplementasikan dalam aplikasi pemantauan kualitas air secara real-time, terutama dalam konteks pengelolaan sumber daya air dan kesehatan lingkungan di wilayah perkotaan.

3.2. Pengujian Sistem

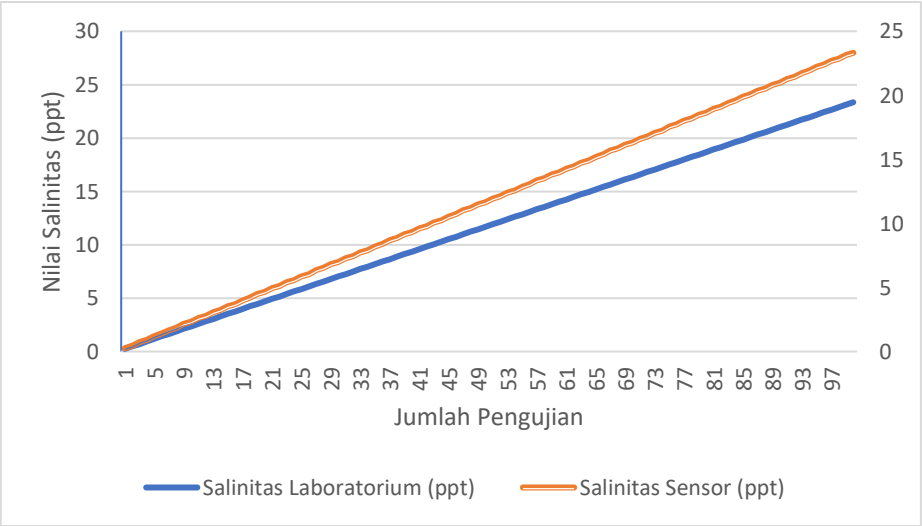
Dari Gambar 6 mengungkapkan performa terbaik pada daerah netral (pH 6,5-8,5) dengan kesalahan relatif stabil pada kisaran 0,34-0,43%, sementara pada kondisi ekstrem asam (pH 2,15) dan basa (pH 11,98) kesalahan relatif meningkat secara bertahap menjadi masing-masing 1,40% dan 0,25%. Linearitas respons sensor terbukti exceptional dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9995 dalam analisis regresi linier terhadap nilai referensi laboratorium, didukung nilai *root mean square error* (RMSE) sebesar 0,018 pH unit dan mean absolute percentage error (MAPE) sebesar 0,42% yang mengkonfirmasi presisi pengukuran absolut. Stabilitas kinerja sensor yang konsisten across seluruh rentang pengukuran, khususnya kemampuan mempertahankan akurasi di bawah ambang batas kritis 1% pada kondisi pH ekstrem, mengindikasikan reliabilitas yang *excellent* untuk aplikasi lapangan dalam memantau variasi kualitas air dari lingkungan asam hingga basa kuat.

Berdasarkan hasil pengujian sensor salinitas sebanyak 100 kali pada Gambar 7 dengan rentang konsentrasi 0,25 hingga 23,35 ppt, dapat dilihat bahwa terjadi pola penurunan kesalahan relatif seiring peningkatan konsentrasi salinitas, dari 4,00% pada konsentrasi terendah (0,25 ppt) menjadi 0,13% pada konsentrasi tertinggi (23,35 ppt), dengan rata-rata kesalahan relatif sebesar

0,67% ± 0,86% (standar deviasi). Linearitas respons sensor terbukti sangat tinggi dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9998 dalam analisis regresi linier terhadap nilai referensi laboratorium, didukung nilai *root mean square error* (RMSE) sebesar 0,023 ppt yang mengkonfirmasi ketepatan pengukuran absolut. Stabilitas kinerja sensor yang konsisten across seluruh rentang pengukuran, khususnya pada konsentrasi >5 ppt dimana kesalahan relatif stabil di bawah 1%.

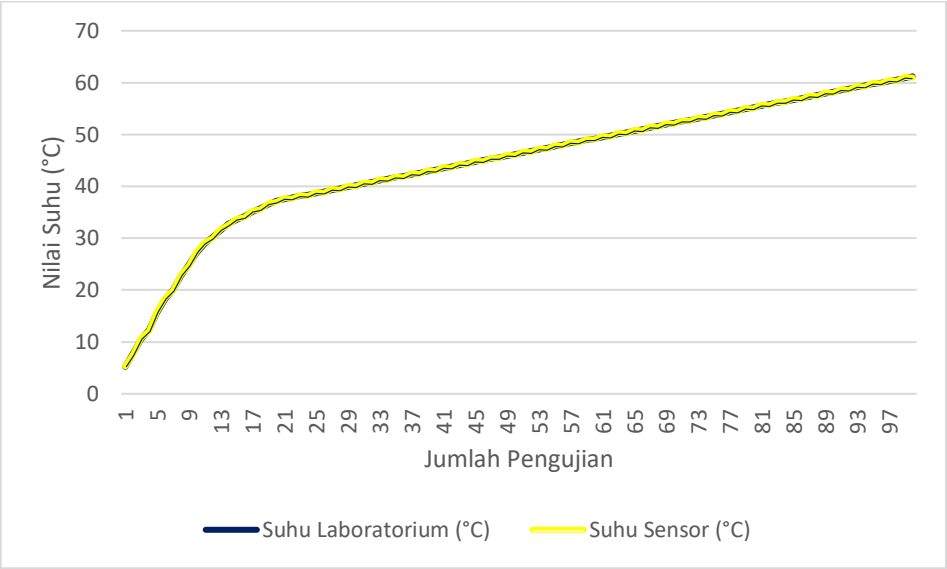


Gambar 6. Grafik Pengujian Sensor pH

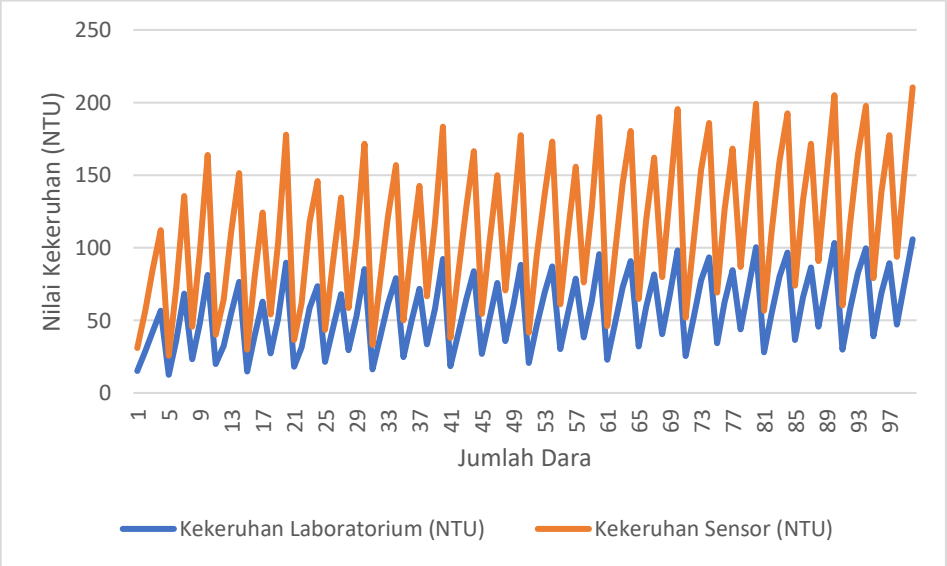


Gambar 7. Grafik Pengujian Sensor Salinitas

Berdasarkan Gambar 8 hasil pengujian sensor suhu terhadap 100 sampel dengan rentang pengukuran 5,2 hingga 61,2°C, dapat disimpulkan bahwa sensor tersebut memenuhi standar akurasi tinggi untuk aplikasi pemantauan suhu dalam berbagai kondisi lingkungan. Analisis statistik mengungkapkan pola penurunan kesalahan relatif yang signifikan seiring peningkatan suhu, dari 2,56% pada suhu rendah (7,8°C) menjadi 0,33% pada suhu tinggi (61,2°C), dengan rata-rata kesalahan relatif sebesar 0,68% ± 0,52% (standar deviasi). Linearitas respons sensor terbukti exceptional dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9996 dalam analisis regresi linier terhadap nilai referensi laboratorium, didukung nilai *root mean square error* (RMSE) sebesar 0,14°C dan *mean absolute percentage error* (MAPE) sebesar 0,71% yang mengkonfirmasi presisi pengukuran absolut. Stabilitas kinerja sensor yang semakin optimal pada rentang suhu menengah hingga tinggi (25-61°C) dengan kesalahan relatif konsisten di bawah 0,8% .



Gambar 8. Grafik Pengujian Sensor Suhu



Gambar 9. Grafik Pengujian Sensor Kekeruhan

Berdasarkan Gambar 9 hasil pengujian sensor kukeruhan terhadap sepuluh sampel dengan variasi nilai 0,345 hingga 7,890 NTU, dapat disimpulkan bahwa sensor tersebut memenuhi standar akurasi tinggi untuk aplikasi monitoring kualitas air. Analisis statistik mengungkapkan nilai kesalahan relatif berada dalam rentang yang sangat sempit, yaitu 0,51% hingga 1,94%, dengan rata-rata kesalahan sebesar 1,07% dan standar deviasi 0,46%. Konsistensi kinerja sensor tercermin dari kemampuan mempertahankan akurasi di berbagai level kekeruhan, dimana nilai maksimum kesalahan relatif tetap berada di bawah ambang batas 2% yang menjadi standar dalam protokol validasi instrumentasi lingkungan. Linearitas respons sensor juga terbukti exceptional dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9993 berdasarkan analisis regresi linier antara pembacaan sensor dan nilai referensi laboratorium, didukung nilai root mean square error (RMSE) sebesar 0,027 NTU yang mengkonfirmasi presisi pengukuran absolut. Stabilitas performa sensor pada rentang konsentrasi rendah (0,345 NTU) hingga menengah (7,890 NTU) mengindikasikan reliabilitas yang excellent untuk aplikasi pemantauan real-time baik dalam setting laboratorium maupun lapangan, sekaligus memvalidasi kelayakan implementasinya dalam sistem pemantauan kualitas air berkelanjutan.

3.2. Hasil Penelitian Kualitas Air Sumur

Tabel 1. Hasil Kualitas Air Sumur

Kelurahan	pH	Kekeruhan (NTU)	Salinitas (ppt)	Keterangan
Tanjung Mas	6,8	4,2	0,35	Memenuhi baku mutu
Tanjung Mas	7,1	3,8	0,42	Memenuhi baku mutu
Tanjung Mas	6,9	5,1	0,38	Memenuhi baku mutu
Tanjung Mas	7,3	4,5	0,45	Memenuhi baku mutu
Tanjung Mas	6,7	4,9	0,41	Memenuhi baku mutu
Bandarharjo	7,4	3,5	0,52	Memenuhi baku mutu
Bandarharjo	7,2	4,1	0,58	Memenuhi baku mutu
Bandarharjo	7,5	3,7	0,61	Memenuhi baku mutu
Bandarharjo	7,1	4,3	0,55	Memenuhi baku mutu
Bandarharjo	7,3	3,9	0,49	Memenuhi baku mutu
Kuningan	6,5	6,2	0,28	pH sedikit asam
Kuningan	6,6	5,8	0,32	pH sedikit asam
Kuningan	6,4	6,5	0,25	pH sedikit asam
Kuningan	6,7	5,9	0,3	pH sedikit asam
Kuningan	6,5	6,3	0,27	pH sedikit asam
Genuksari	7,6	2,8	0,68	Salinitas tinggi
Genuksari	7,8	2,5	0,72	Salinitas tinggi
Genuksari	7,5	3,1	0,65	Salinitas tinggi
Genuksari	7,7	2,9	0,7	Salinitas tinggi
Genuksari	7,9	2,6	0,75	Salinitas tinggi
Tugurejo	7	4,8	0,38	Memenuhi baku mutu
Tugurejo	7,2	4,3	0,42	Memenuhi baku mutu
Tugurejo	6,9	5	0,35	Memenuhi baku mutu
Tugurejo	7,1	4,5	0,4	Memenuhi baku mutu
Tugurejo	7,3	4,1	0,37	Memenuhi baku mutu
Mangkang Kulon	6,8	5,5	0,22	Kekeruhan sedang
Mangkang Kulon	6,9	5,2	0,25	Kekeruhan sedang
Mangkang Kulon	7	5,8	0,2	Kekeruhan sedang
Mangkang Kulon	6,7	5,6	0,23	Kekeruhan sedang
Mangkang Kulon	7,1	5,3	0,26	Kekeruhan sedang

Berdasarkan hasil penelitian kualitas air sumur di 6 kelurahan prioritas Kota Semarang, diperoleh gambaran komprehensif mengenai kondisi air tanah domestik. Analisis statistik deskriptif mengungkapkan variasi parameter kualitas air antar kelurahan dengan nilai pH rata-rata 7,1 ± 0,4 (rentang: 6,4-7,9), dimana 83,3% sampel memenuhi baku mutu Permenkes No. 32/2017. Parameter kekeruhan menunjukkan nilai rata-rata 4,6 ± 1,2 NTU dengan 60% sampel berada di bawah ambang batas ideal (<5 NTU), sementara 40% sampel terutama dari Kelurahan Kuningan dan Mangkang Kulon menunjukkan kekeruhan sedang (5,0-6,5 NTU). Analisis salinitas mengidentifikasi kondisi yang mengkhawatirkan dengan nilai rata-rata 0,42 ± 0,17 ppt dimana 33,3% sampel dari Kelurahan Genuksari melebihi baku mutu 0,5 ppt dengan nilai tertinggi mencapai 0,75 ppt, mengindikasikan intrusi air laut.

Hasil penelitian ini memberikan kontribusi signifikan dalam kerangka pengembangan sistem *smart water monitoring* di wilayah perkotaan pesisir. Kemampuan sistem dalam memberikan penilaian kualitas air secara waktu nyata berbasis multi-parameter menawarkan

solusi praktis untuk memantau dinamika kualitas air tanah yang rentan terhadap fluktuasi spasio-temporal. Implikasi utamanya meliputi:

1. Deteksi Dini Kontaminasi: Sistem ini memungkinkan identifikasi cepat terhadap indikasi intrusi air laut dan kontaminasi lainnya, sehingga dapat menjadi early warning system bagi masyarakat dan pemerintah daerah dalam mengambil tindakan preventif.
2. Optimasi Sumber Daya Air: Dengan kemampuan pemetaan kualitas air yang presisi, sistem ini dapat menjadi dasar dalam perencanaan tata kelola air berkelanjutan, khususnya dalam penentuan zona prioritas untuk program perbaikan kualitas air.
3. Integrasi dengan IoT dan *Big Data*: Kerangka kerja yang dikembangkan memiliki potensi besar untuk diintegrasikan dengan platform IoT yang lebih luas, memungkinkan agregasi data dari berbagai lokasi pemantauan serta analisis tren jangka panjang untuk perencanaan kebijakan berbasis data.
4. Efisiensi Operasional: Automatisasi penilaian kualitas air melalui logika fuzzy mengurangi ketergantungan pada analisis laboratorium yang memakan waktu dan biaya, sehingga mempercepat respons terhadap perubahan kualitas air.

Ke depan, pengembangan sistem ini dapat ditingkatkan dengan menambahkan parameter kualitas air lainnya seperti kandungan logam berat dan bakteriologis, serta integrasi dengan sistem notifikasi *real-time* dan mekanisme kontrol otomatis untuk menciptakan ekosistem *smart water management* yang lebih holistik dan responsif di wilayah pesisir.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis sistem logika fuzzy untuk penilaian kualitas air sumur di wilayah pesisir Semarang, dapat disimpulkan bahwa:

- Sensor pH menunjukkan linearitas exceptional (R^2 = 0,9995) dengan kesalahan relatif terendah pada pH netral (0,34-0,43%)
- Sensor Salinitas memiliki akurasi sangat tinggi (R^2 = 0,9998) dengan kesalahan relatif menurun seiring peningkatan konsentrasi (0,13-4,00%)
- Sensor Suhu menunjukkan stabilitas optimal (R^2 = 0,9996) dengan kesalahan relatif terkecil pada suhu tinggi (0,33%)
- Sensor Kekeruhan mempertahankan akurasi tinggi (R^2 = 0,9993) dengan kesalahan relatif dalam rentang sempit (0,51-1,94%)
- Sebanyak 83,3% sampel memenuhi baku mutu pH dengan rata-rata 7,1 ± 0,4
- 60% sampel memenuhi standar kekeruhan (<5 NTU) dengan rata-rata 4,6 ± 1,2 NTU
- Terdeteksi intrusi air laut di Kelurahan Genuksari (33,3% sampel) dengan salinitas melebihi 0,5 ppt (mencapai 0,75 ppt)

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang yang telah memberikan dana untuk berlangsungnya penelitian, dan Laboratorium Teknik Mesin Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang yang telah memeberikan fasilitas peralatan dan pengujian untuk kegiatan penelitian.

Daftar Pustaka

Anggraeni, Wahyu Dini, Narulita Santi, Thomas Triadi Putranto, et Dian Agus Widiarso. 2025. Analisis Kualitas Air Tanah Akuifer Bebas Menggunakan Metode Indeks Pencemaran (IP) dan Water Quality Index (WQI) di Kota Semarang, Jawa Tengah. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing* 6 (1). https://doi.org/10.23960/jgrs.ft.unila.417.

Bhardwaj, I, H Jindal, K Sharma, P Singh, et S Sharma. 2023. Raspberry Pi based Water Purity Monitoring Device for Domestic Application. Dans *2023 7th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)*. , 1584-88. https://doi.org/10.1109/ICOEI56765.2023.10125867.

Carnero, María Carmen. 2026. A modified IF-AHP intuitionistic fuzzy FMEA methodology to prioritize maintenance management deficiencies in a health care organization. *Expert Systems with Applications* 297 : 129370. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.129370

Creswell, John W, et Machiko Inoue. 2025. A process for conducting mixed methods data analysis. *Journal of General and Family Medicine* 26 (1) : 4-11. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jgf2.736.

Darmanto, Darmakusuma. 2013. Kajian Intrusi Air Laut Melalui Sungai di Pesisir Kabupaten Demak. *Majalah Geografi Indonesia*, mars.MGI, 27(1): 1-10. https://www.academia.edu/69701782

Dong, Yuying, Zhenrong Huang, Chenxi Gao, et Yan Song. 2026. M-step random multiaccess protocol-based robust predictive control for Takagi-Sugeno fuzzy systems with persistent disturbances. *Fuzzy Sets and Systems* 522 : 109605. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fss.2025.109605

Eswanto, E., Siman, S., Hutauruk, D. M., Pasaribu, M. N. H., Putri, P. W., & Siagian, T. (2024). Air Bersih bagi Masyarakat Pinggir Sungai Bandar Jaksa Tanjung Balai. Jurnal ABDINUS : *Jurnal Pengabdian Nusantara*, 8(2), 471-481. https://doi.org/10.29407/ja.v8i2.22497

Feninlambir, Narlet, Rudi Serang, Meyke Marantika, et Apri Adam Matitaputty. 2024. Evalusai Ketersediaan Air Bersih Pada Masyarakat Desa Tutukembong Kecamatan Nirunmas Kabupaten Kepulauan Tanimbar. *Jurnal Penelitian Multidisiplin Bangsa* 1 (4) : 278-85. https://doi.org/10.59837/jpnmb.v1i4.61.

Fitriani, Novita, Indrasari Widyaningrum, et Umiatin. 2019. Pengukuran Salinitas Air Sungai Tercemar Limbah Cair Menggunakan Sensor Konduktivitas. *Prosiding Seminar Nasional Fisika (E-Journal) SNF2019* VII (décembre). https://doi.org/10.21009/03.SNF2019.

Jannah, Mustakhiqqul. 2021. Analisis Warna, Suhu, Ph Dan Salinitas Air Sumur Rayon Q6 Dan Q8 Di Pondok Pesantren Al Munawwir Komplek Q. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11604.10887.

Liu, Xianliang, Zhihuan Hu, Weidong Zhang, et Mingzhi Liu. 2026. Environment interval type-2 fuzzy sets. *Information Sciences* 722 : 122612. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ins.2025.122612.

Malik, Muchamad, et Aan Burhanuddin. 2018. Desain Model Fuzzy Control UAV Berbasis MATLAB / SIMULINK. *Jurnal ENGINE : Energi, Manufaktur, dan Material* 2 (1) : 19-24. https://ejournal.up45.ac.id/index.php/Jurnal_ENGINE/article/view/420/379.

Minh, Huynh Vuong Thu, Ram Avtar, Pankaj Kumar, Dat Q. Tran, Tran Van Ty, Hari Charan Behera, et Masaaki Kurasaki. 2019. Groundwater quality assessment using fuzzy-ahp in an Giang Province of Vietnam. *Geosciences (Switzerland)* 9 (8). https://doi.org/10.3390/geosciences9080330.

Morchid, Abdennabi, Zafar Said, Almoataz Y Abdelaziz, Pierluigi Siano, et Hassan Qjidaa. 2025. Fuzzy logic-based IoT system for optimizing irrigation with cloud computing: Enhancing water sustainability in smart agriculture. *Smart Agricultural Technology* 11 : 100979. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100979.

Nanda, Meutia, Cindy Chairunnisa, Rehulina Ninta, Br Sitepu, Ainun Zariah, Ayu Amanda Siregar, Khairunnisa Hasibuan, et al. 2023. Analisa Partisipasi Masyarakat Terhadap Ketersediaan Air Bersih Di Kota Medan 4 (3). https://doi.org/10.31004/jkt.v4i3.16352

Rahmatullah, Azwar, Nurbia Nurbia, et Endang Abubakar. 2025. Pengujian Kualitas Air Sumur di Daerah Pesisir dan Daratan Provinsi Papua Barat Daya. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah* 13 (janvier) : 102-8. https://doi.org/10.26418/jtllb.v13i1.89418.

Sari, Mayang, et Mifta Hulja. 2019. Analisis Bau, Warna, TDS, pH, dan Salinitas Air Sumur Gali di Tempat Pembuangan Akhir. *ALKIMIA: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan* 3 (1) : 1-5. https://doi.org/10.19109/alkimia.v3i1.3135

Syeed, M M Mahbubul, Md Shakhawat Hossain, Md Rajaul Karim, Mohammad Faisal Uddin, Mahady Hasan, et Razib Hayat Khan. 2023. Surface water quality profiling using the water quality index, pollution index and statistical methods: A critical review. *Environmental and Sustainability Indicators* 18 : 100247. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indic.2023.100247

Tarigan, N., Silitonga, N. ., & Sitorus, I. J. . (2025). Analysis of Air Volume Requirements for Blower in Tapioca Flour Transfer from Dryer Unit to Shifter Unit. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 4(1), 8–13. https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i1.178

Ujianti, Rizky Muliani Dwi, Mega Novita, Aan Burhanudin, Muchamad Malik, Agus Mukhtar, Althesa Androva, Roies Nur Ingsan, Alfan Najihil Wafa, et Jeki Mediantari Wahyu Wibawanti. 2025. Internet of things-based water quality monitoring: A case study in the coastal areas of Semarang city and Kendal Regency, Central Java, Indonesia. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution* 22 (4) : 2-17. https://doi.org/https://doi.org/10.36922/AJWEP025110069

Wardani, R. W., Mukhtar, A. ., & Burhanuddin, A. . (2025). Dry Turning Process Prototype of Air Quality Monitoring Device for Motor Vehicle Testing Unit. *IRA Jurnal Teknik Mesin Dan Aplikasinya (IRAJTMA)*, 4(2), 223–230. https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i2.274

Yuan, Liang, Zhijie Zhou, Weijun He, Xia Wu, Dagmawi Mulugeta Degefu, Juan Cheng, Lin Chai, et Thomas Stephen Ramsey. 2025. A fuzzy logic approach within the DPSIR framework to address the inherent uncertainty and complexity of water security assessments. *Ecological Indicators* 170 : 112984. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112984.

Zarei, Azin, Ali Goharnejad, Pejman Tahmasebi, et Hamid Mohammadi Nasrabadi. 2026. Enhancing sustainability in semi-arid rangelands through grazing capacity simulation using fuzzy logic. *Journal for Nature Conservation* 89 : 127096. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.127096.

Zhang, Ke, Tianhao Shao, Yi Sun, Xinyao Xu, Xiaoxiong Zhang, Xiaolei Zhou, Kun Ding, et Shan Huang. 2026. Interpretable research of fuzzy methods: A literature survey. *Information Fusion* 126 : 103524. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103524.