

TEMPLATE ARTIKEL AL ULUM

Muchtarul Hadist new.pdf

by Turnitin Kita

Submission date: 02-Jan-2026 09:05PM (UTC+0900)

Submission ID: 2846651889

File name: TEMPLATE_ARTIKEL_AL_ULUM_Muchtarul_Hadist_new.pdf (717.96K)

Word count: 7129

Character count: 42374

Sistem Pengambilan Keputusan Otomatis Berbasis Fuzzy untuk Kelayakan Reuse Air Drain Mesin Retort

Mohamad Muchtarul Hadist¹, Indah Sulistyowati², Syamsudduha Syahririni³,
Agus Hayatal Falah⁴

^{1,2,3,4} Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo,
Sidoarjo, Indonesia

email: ¹muchtarul2293@gmail.com, ²indah_sulistyowati@umsida.ac.id,
³syahririni@umsida.ac.id, ⁴agushf@umsida.ac.id

ABSTRAK

Tingginya konsumsi air pada proses sterilisasi mesin retort serta pembuangan air drain yang masih berpotensi dimanfaatkan kembali mendorong perlunya sistem penilaian kelayakan reuse air yang objektif dan otomatis. Penelitian ini bertujuan merancang dan menguji prototipe sistem monitoring multi-parameter menggunakan sensor turbidity, pH, dan TDS, mengimplementasikan metode fuzzy logic Mamdani berbasis standar *food-grade* untuk pengambilan keputusan kelayakan reuse air, serta mengintegrasikan hasil keputusan dengan kontrol valve otomatis untuk pengaturan aliran air. Penelitian menggunakan metode eksperimental terapan dengan pendekatan *research and development*, dimana data sensor diproses menggunakan sistem inferensi fuzzy Mamdani dengan 27 rule base dan mekanisme *rule override* pada parameter turbidity. Hasil pengujian menunjukkan seluruh sensor memiliki akurasi kurang dari 1%, repeatability di bawah 0,3%, serta linearitas tinggi pada rentang operasional masing-masing sensor. Pengujian logika fuzzy menghasilkan tingkat akurasi keputusan sebesar 100% sesuai dengan perhitungan manual. Integrasi sistem keputusan fuzzy dengan kontrol valve otomatis berhasil mengarahkan aliran air secara real-time ke jalur *reuse*, *treatment*, atau *reject* tanpa kesalahan aktivasi. Pengujian terhadap 30 sampel air drain retort menunjukkan 26,67% sampel layak untuk reuse langsung, 66,67% memerlukan treatment, dan 6,67% dikategorikan sebagai reject. Sistem menunjukkan potensi penghematan air sebesar 93,33% dengan proyeksi penghematan hingga 1.176 m³ per tahun pada skala industri. Hasil penelitian membuktikan efektivitas sistem dalam meningkatkan efisiensi penggunaan air, menurunkan biaya operasional, dan mendukung penerapan praktik industri pangan berkelanjutan.

Kata kunci : Fuzzy Logic Mamdani, Kualitas Air, Pengambilan Keputusan Otomatis, Reuse Air Retort

ABSTRACT

High water consumption in retort sterilization processes and the disposal of drain water that still has reuse potential highlight the need for an objective and automated system to assess water reuse feasibility. This study aims to design and test a multi-parameter monitoring system prototype using turbidity, pH, and TDS sensors, to implement a Mamdani fuzzy logic method based on food-grade standards for reuse decision-making, and to integrate the decision results with automated valve control for water flow routing. The study applies an experimental research and development approach, in which sensor data are processed using a Mamdani fuzzy inference system with 27 rule bases and a turbidity-based rule override mechanism. Testing results indicate that all sensors achieve accuracy below 1%, repeatability below 0.3%, and high linearity within their operational ranges. Fuzzy logic evaluation produces a decision accuracy of 100% compared to manual calculations. Integration of fuzzy decision-making with automated valve control successfully routes water flow in real time to reuse, treatment, or

reject pathways without activation errors. Testing of 30 retort drain water samples shows that 26.67% are suitable for direct reuse, 66.67% require treatment, and 6.67% are classified as reject. The system demonstrates a water-saving potential of 93.33%, with projected savings of up to 1,176 m³ per year at the industrial scale. The results confirm the effectiveness of the system in improving water-use efficiency, reducing operational costs, and supporting sustainable practices in the food processing industry.

Keywords: Mamdani fuzzy logic, water quality, automated decision-making, retort water reuse

PENDAHULUAN

Retort merupakan perangkat yang digunakan untuk mensterilkan produk makanan dalam kemasan kaleng, *pouch*, dan sejenisnya. Alat ini dilengkapi dengan sistem sterilisasi menggunakan proses panas pada temperatur tinggi di atas 100°C dengan tujuan membunuh mikroorganisme patogen dan penyebab pembusukan dalam bentuk spora. Produk dinyatakan steril apabila tidak terdapat mikroorganisme yang mampu berkembang di dalamnya, sedangkan spora bakteri memiliki ketahanan panas yang lebih tinggi dibandingkan sel vegetatif bakteri. Retort mampu beroperasi pada suhu 121°C dengan tekanan 2 bar (Benjakul *et al.*, 2018), (Jimenez *et al.*, 2024). Industri pengolahan makanan yang memanfaatkan teknologi retort membutuhkan air dalam jumlah signifikan selama proses sterilisasi, dan air keluaran retort seringkali masih memiliki kualitas yang cukup baik tetapi umumnya langsung dibuang. Kondisi tersebut menimbulkan pemborosan sumber daya air sekaligus meningkatkan biaya pengolahan limbah. Sistem daur ulang air limbah retort berpotensi mengurangi biaya operasional dan mendukung praktik industri yang lebih ramah lingkungan sehingga diperlukan sistem monitoring yang mampu memastikan kualitas air sesuai standar pemanfaatan selanjutnya (Garnier *et al.*, 2023).

Logika fuzzy Mamdani dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya menangani ketidakpastian dan ambiguitas pada data sensor kualitas air. Parameter seperti *turbidity*, pH, dan TDS sering berada pada kondisi grey area yang tidak dapat ditentukan secara akurat dengan metode threshold biner konvensional. Pendekatan fuzzy Mamdani menggunakan fungsi keanggotaan dan rule base linguistik yang menyerupai penalaran manusia sehingga mampu menghasilkan keputusan yang fleksibel dan objektif. Metode ini juga memiliki tingkat interpretabilitas tinggi karena setiap keputusan dapat ditelusuri berdasarkan aturan yang diaktifkan, sehingga sesuai diterapkan pada industri makanan yang membutuhkan transparansi serta akuntabilitas dalam proses pengambilan keputusan (R. L. Bailone, R. C. Borra, H. C. S. Fukushima, 2022). Penelitian sebelumnya telah menerapkan *fuzzy logic* pada berbagai sistem monitoring kualitas air, seperti kontrol kualitas air *Reverse Osmosis* berbasis

Internet of Things menggunakan metode Sugeno (Plappally & Lienhard V, 2013), serta monitoring air limbah PLTU menggunakan *fuzzy Mamdani* dengan dua parameter, yaitu pH dan suhu, yang dipantau secara real-time melalui platform *IoT Blynk* (Barzegar *et al.*, 2023).

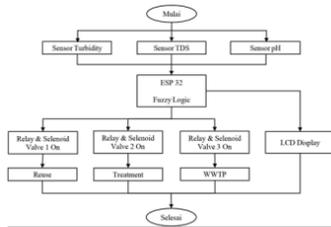
Mayoritas penelitian tersebut masih berfokus pada sistem monitoring atau pemberian rekomendasi tanpa menyediakan mekanisme pengambilan keputusan yang terstruktur dan konsisten (Al-Mutairi & Al-Aubidy, 2023). Penelitian terdahulu juga belum mengarahkan implementasinya pada industri makanan, khususnya pada sistem penentuan kelayakan reuse air retort berdasarkan data aktual dari sensor mesin. Sistem monitoring kualitas air yang ada masih memerlukan intervensi manual operator untuk menentukan routing aliran air baik menuju *reuse*, *treatment*, maupun *reject* sehingga berpotensi menimbulkan *human error* dan ketidakkonsistenan keputusan. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian terkait kebutuhan sistem pengambilan keputusan otomatis berbasis data *real-time* untuk mendukung efisiensi proses dan konsistensi penilaian kualitas air (Vadiati *et al.*, 2016).

Penelitian ini bertujuan mengembangkan prototipe sistem pengambilan keputusan dan kontrol otomatis berbasis *fuzzy logic* untuk menilai kelayakan reuse air mesin retort dengan menggunakan sensor *turbidity*, pH, dan TDS. Sistem ini diharapkan mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air, mengurangi risiko kontaminasi, menurunkan biaya operasional, dan mendukung penerapan konsep keberlanjutan (*sustainability*) pada industri pengolahan pangan berbasis retort. Penelitian ini menawarkan nilai baru berupa integrasi metode fuzzy Mamdani dengan sistem kontrol otomatis berbasis *automated valve control* sehingga aliran air dapat diarahkan secara otomatis menuju jalur *reuse*, *treatment*, atau *reject* tanpa intervensi operator, sekaligus memberikan pengambilan keputusan yang objektif, konsisten, dan berbasis sensor *real-time*.

Tinjauan Pustaka Blok Diagram Sistem

Perancangan sistem dilakukan dengan mengintegrasikan sensor pH, TDS, dan

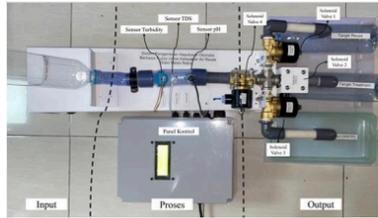
turbidity yang membaca kualitas air dan memprosesnya melalui mikrokontroler menggunakan algoritma *fuzzy logic* Mamdani untuk menghasilkan keputusan, yang selanjutnya ditampilkan pada LCD dan mengaktifkan *valve control* untuk mengarahkan aliran air ke tangki *reuse*, *treatment*, atau WWTP (Bellini *et al.*, 2025).



Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Simulasi air drain retort mengalir dari tangki penampungan menuju sistem monitoring kualitas air, kemudian tiga sensor (*turbidity*, pH, dan TDS) membaca parameter secara *real-time* dan mengirimkan data ke mikrokontroler ESP32. Mikrokontroler memproses data menggunakan algoritma *fuzzy logic* untuk menentukan kelayakan *reuse* air, dan setelah defuzzifikasi menghasilkan nilai z^* (0–100), ESP32 mengaktifkan SV1 sebagai *flow control gate*. Berdasarkan nilai z^* dan kategori keputusan, ESP32 mengaktifkan salah satu *valve routing*, yaitu $z^* < 40$ untuk *Reject* (trapezoid [0,0,14,40]) yang ditampilkan pada LCD kemudian mengaktifkan Relay 3 → SV4 → WWTP; nilai $30 \leq z^* \leq 70$ untuk *Treatment* (triangular [30,50,70]) yang ditampilkan pada LCD kemudian mengaktifkan Relay 2 → SV3 → Tangki *Treatment*; dan $z^* > 60$ untuk *Reuse* (trapezoid [60,85,100,100]) yang ditampilkan pada LCD kemudian mengaktifkan Relay 1 → SV2 → Tangki Air Bersih. Sistem *fuzzy logic* mengintegrasikan tiga parameter input dengan *rule base* berbasis standar kualitas air *food-grade*, melalui tahap fuzziifikasi, evaluasi *rule base*, inferensi, dan defuzziifikasi untuk menghasilkan keputusan yang lebih akurat dibandingkan metode *threshold* tunggal (Żywiec *et al.*, 2024).

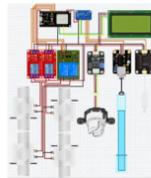
Prototype Sistem



Gambar 2. Prototype Sistem

Sistem prototype ini bekerja dengan mengalirkan air dari input melalui tiga sensor (*turbidity*, pH, dan TDS) yang mengukur kualitas air secara *real-time*, kemudian data sensor tersebut diproses oleh panel kontrol untuk mengambil keputusan otomatis melalui solenoid valve di bagian output jika kualitas air memenuhi standar maka akan diarahkan ke jalur *reuse/treatment* untuk digunakan kembali, namun jika tidak memenuhi standar maka akan diarahkan ke jalur *reject* untuk dibuang atau diolah lebih lanjut.

Rangkaian Perangkat Keras



Gambar 3. Rangkaian Perangkat Keras

Sistem ini menggunakan ESP32 sebagai mikrokontroler utama untuk pengolahan data dan kontrol perangkat. Kehandalan ESP32 dalam aplikasi multi-sensor dibuktikan oleh penelitian pada sistem monitoring kualitas air kolam ikan berbasis ESP32 dan IoT Ubidots, dimana ESP32 menunjukkan stabilitas tinggi dalam menangani pembacaan multi-sensor dan pemrosesan *real-time* (Moumni & Massour el Aoud, 2022), (Efendi *et al.*, 2024), sehingga sesuai untuk monitoring air drain retort yang memerlukan akuisisi data simultan dari tiga sensor (pH, TDS, *turbidity*) dan pengambilan keputusan cepat berbasis *fuzzy logic*. Mikrokontroler ESP32 terhubung dengan tiga

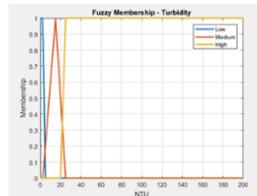
sensor analog melalui modul ADS1115 sebagai ADC 16-bit yang mengkonversi sinyal analog menjadi data digital presisi tinggi via I2C (Rosmasari *et al.*, 2025), kemudian memproses data menggunakan algoritma *fuzzy logic* Mamdani untuk menghasilkan keputusan kelayakan reuse air dan mengendalikan modul relay 4 channel yang mengoperasikan empat *solenoid valve* secara bertahap. Logika kontrol valve dirancang dengan SV1 sebagai flow control gate yang dibuka setelah pembacaan sensor selesai, kemudian berdasarkan hasil *fuzzy logic*, ESP32 mengaktifkan salah satu valve percabangan yaitu SV2 untuk tangki *reuse*, SV3 untuk tangki *treatment*, atau SV4 untuk WWTP, sementara SV1 tetap terbuka hingga proses pemilahan selesai. Hasil keputusan dan nilai parameter kualitas air ditampilkan secara real-time pada LCD melalui komunikasi I2C, dan seluruh rangkaian disuplai oleh *power supply* dengan tegangan stabil (Papa *et al.*, 2024), (Abuzairi *et al.*, 2021).

Perancangan Logic Fuzzy Mamdani

Konsep dasar sistem pengambilan keputusan otomatis ini mengimplementasikan logika *fuzzy* berdasarkan pembacaan tiga parameter sensor yaitu pH, TDS, dan turbidity menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) tipe Mamdani yang dipilih karena kemudahan interpretasi, kemiripan dengan penalaran manusia, dan kemampuannya mengelola data mengandung ketidakpastian (Golshan *et al.*, 2020). Sistem inferensi Mamdani terdiri dari tahap fuzzifikasi yang mengubah nilai numerik menjadi linguistik, evaluasi aturan berbasis IF-THEN, agregasi dan implikasi untuk menggabungkan output aturan aktif, serta defuzzifikasi yang mengubah nilai fuzzy menjadi nilai *crisp* sebagai keputusan akhir. Sistem *fuzzy logic* Mamdani memiliki tiga variabel input, yaitu pH (0–14), TDS (0–2000 ppm), dan turbidity (0–300 NTU), serta satu variabel output berupa status kelayakan air (0–100) dengan kategori Reject (0–40), Treatment (30–70), dan Reuse (60–100). Pada tahap fuzzifikasi, nilai parameter dikonversi berdasarkan standar baku mutu air industri pangan. Batas maksimal turbidity, 25 NTU sesuai Permenkes 32/2017 sehingga diberi bobot prioritas tertinggi sebagai indikator utama kelayakan *reuse* (WHO/UNICEF, 2017). pH, rentang 6,5–8,5 ditetapkan sebagai batas normal sesuai SNI 3553:2015 dan GMP

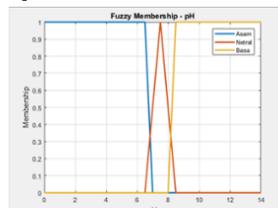
industri pangan untuk menjaga kondisi proses dan mencegah korosi peralatan (WHO, 2007). Rentang pH ini penting untuk mencegah korosi pada sistem distribusi dan peralatan, serta memastikan efektivitas disinfeksi dan kondisi optimal proses (Kirby *et al.*, 2003). TDS, batas maksimal 500 mg/L sesuai SNI 3553:2015 dan GMP untuk mencegah deposit mineral dan menjaga konsistensi kualitas air proses (Adjovu *et al.*, 2023).

Ketiga parameter ini kemudian dipetakan ke dalam fungsi keanggotaan *fuzzy* untuk mengklasifikasikan kondisi kualitas air. Setiap parameter memiliki fungsi keanggotaan dengan kategori linguistik.



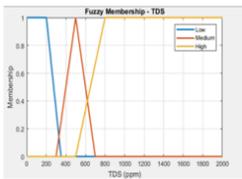
Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Turbidity

Variabel turbidity digunakan tiga kategori yaitu *Low* dengan bentuk trapezoid [0, 0, 2.5, 5], *Medium* dengan bentuk triangular [2.5, 15, 25], dan *High* dengan bentuk trapezoid [20, 25, 200, 200].



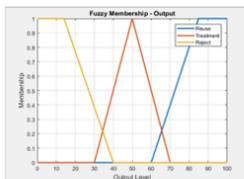
Gambar 5. Fungsi Keanggotaan pH

Variabel pH digunakan tiga kategori fungsi keanggotaan, yaitu *Asam* dengan bentuk trapezoid [0, 0, 6, 7, 0], *Netral* dengan bentuk triangular [6.5, 7, 8.5], dan *Basa* dengan bentuk trapezoid [8, 8.5, 14, 14].



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan TDS

Variabel TDS digunakan tiga kategori fungsi keanggotaan, yaitu *Low* dengan bentuk trapezoid [0, 0, 200, 350], *Medium* dengan bentuk triangular [300, 500, 700], dan *High* dengan bentuk trapezoid [500, 800, 2000, 2000].



Gambar 7. Fungsi Keanggotaan Output

Variabel output digunakan tiga kategori fungsi keanggotaan, yaitu *Reject* dengan bentuk trapezoid [0, 0, 14, 40], *Treatment* dengan bentuk triangular [30, 50, 70], dan *Reuse* dengan bentuk trapezoid [60, 85, 100, 100].

Basis Aturan Fuzzy (Rule Base)

Sistem fuzzy dirancang dengan 27 aturan yang merupakan kombinasi lengkap dari 3 variabel input, dimana masing-masing variabel memiliki 3 himpunan fuzzy ($3 \times 3 \times 3 = 27$ kombinasi), namun diberlakukan aturan prioritas utama yaitu jika turbidity ≥ 25 NTU (kategori *High* sepenuhnya tercapai), sistem langsung mengklasifikasikan output sebagai "*Reject*" karena turbidity merupakan parameter paling kritis yang dapat menghambat efektivitas disinfeksi/sterilisasi dan melindungi mikroorganisme dari proses inaktivasi (Fernandez Alvarez *et al.*, 2023).

Mekanisme Inferensi dan Defuzzifikasi

Mekanisme inferensi fuzzy pada penelitian ini menggunakan Metode Mamdani (Max-Min) yang terdiri dari tiga tahap utama yaitu fuzzifikasi, penerapan rule, dan agregasi output. Pada tahap fuzzifikasi, nilai input *crisp* dari

sensor (Turbidity, TDS, pH) dikonversi menjadi derajat keanggotaan fuzzy berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah didefinisikan, di mana setiap input memiliki tiga kategori linguistik: *Low*, *Medium*, dan *High* untuk *turbidity* dan TDS, serta Asam, Netral, dan Basa untuk pH. Pada tahap penerapan rule, sistem mengevaluasi 27 aturan fuzzy menggunakan operator AND (minimum) dan OR (maksimum), dengan rule override berprioritas tertinggi yaitu apabila Turbidity > 25 NTU (*High*), sistem langsung mengklasifikasikan output sebagai "*Reject*" tanpa mempertimbangkan parameter lainnya (Rule 1–9). *Firing strength* setiap rule dihitung dengan formula $\alpha\text{-rule} = \min(\mu_{Turbidity}, \mu_{TDS}, \mu_{pH})$. Contoh evaluasinya yaitu Rule 11: IF *Turbidity* = *Medium* AND TDS = *Low* AND pH = *Netral* \rightarrow *Reuse*, dengan $\alpha_{11} = \min(0.8, 0.6, 0.9) = 0.6$; dan Rule 1: IF *Turbidity* = *High* \rightarrow *Reject (override)*, dengan $\alpha_1 = \min(0.7, 0.3, 0.2) = 0.2$. Pada tahap agregasi output, hasil dari setiap rule digabungkan menggunakan operator maksimum untuk membentuk tiga himpunan fuzzy output yaitu *Reuse* dari Rule 11 dan 20 (pH = *Netral*, TDS = *Low* wajib), *Treatment* dari 16 *rules* (kondisi tidak optimal), dan *Reject* dari Rule 1–9 (*Turbidity* = *High*).

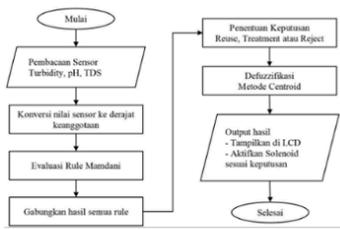
Output fuzzy kemudian dikonversi menjadi nilai *crisp* menggunakan metode Centroid (*Center of Gravity*) yang dipilih karena hasilnya paling stabil dan presisi, umum digunakan pada sistem kualitas air, dan mendekati penilaian manusia terhadap kondisi air.

$$\frac{\int Z\mu(z) dz}{\int \mu(z) dz}$$

Rumus dasar defuzzifikasi digunakan untuk mendapatkan nilai z^* , di mana z^* adalah nilai *crisp* output, z adalah nilai variabel output pada domain [0–100], $\mu(z)$ adalah derajat keanggotaan output hasil agregasi pada nilai z , dan integral diambil untuk seluruh domain output. Pada implementasi diskrit menggunakan mikrokontroler, rumus centroid dapat dihitung menggunakan pendekatan numerik dengan persamaan

$$Z^* = \frac{\sum (z_i \cdot \mu(z_i))}{\mu(z_i)} \tag{2}$$

Alur kerja lengkap sistem fuzzy Mamdani digambarkan pada flowchart berikut.



Gambar 8. Flowchart Sistem Fuzzy

Flowchart menunjukkan proses berurutan dari pembacaan sensor, fuzzifikasi, evaluasi rule, agregasi, defuzzifikasi menggunakan metode centroid, hingga output berupa tampilan LCD dan aktivasi solenoid sesuai kategori kelayakan air.

Klasifikasi Akhir

Nilai crisp z^* (0-100) hasil defuzzifikasi dipetakan ke tiga kategori kelayakan air berdasarkan distribusi 27 rules: 9 rules untuk "Reject" (33.3%), 16 rules untuk "Treatment" (59.3%), dan 2 rules untuk "Reuse" (7.4%).

Tabel 1. Pemetaan Kategori Output Sistem Fuzzy

Kategori	Range	Kriteria & Tindakan
Reject	0-40	- Turbidity High (override) - Air tidak layak → WWTP (SV4) - 9 rules (33.3%)
Treatment	30-70	- Kondisi tidak optimal - Perlu pengolahan → SV3 - 16 rules (59.3%)
Reuse	60-100	- pH Netral + TDS Low (wajib) - Layak pakai → Tangki Reuse(SV2) - 2 rules (7.4%)

Hierarki prioritas parameter menetapkan bahwa Turbidity (Dominan) dengan nilai High (≥ 25 NTU) selalu menghasilkan keputusan "Reject" tanpa mempertimbangkan parameter

lain sebagai *rule override*. pH Netral (6.5–8.5) menjadi syarat mutlak untuk kategori "Reuse", dan jika pH Asam atau Basa maka output maksimal adalah "Treatment". TDS Low (≤ 350 ppm) merupakan kondisi optimal untuk reuse air, sedangkan TDS Medium atau High mengarahkan keputusan pada kategori "Treatment". Desain dengan 7.4% rules untuk "Reuse" mencerminkan pendekatan konservatif *safety-first* dalam industri pangan, memastikan hanya air dengan kualitas sangat baik yang direuse langsung, dengan pH Netral sebagai syarat mutlak untuk kategori "Reuse".

Pengujian Sistem

Pengujian untuk memastikan sistem pengambilan keputusan otomatis berbasis fuzzy optimal dan sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan, akan dilakukan serangkaian pengujian sebagai berikut:

1. Pengujian Sensor (*Hardware Testing*)
 Pengujian hardware dilakukan untuk memverifikasi bahwa seluruh komponen dapat beroperasi sesuai spesifikasi. Sensor turbidity, pH dan TDS akan diuji menggunakan larutan standar dengan nilai referensi yang telah diketahui untuk menghitung tingkat akurasi dan error
2. Pengujian Logika Fuzzy
 Sistem inferensi fuzzy akan diuji dengan mensimulasikan berbagai kombinasi input untuk memverifikasi output keputusan sesuai rule fuzzy yang telah ditetapkan. Pengujian meliputi skenario air bersih optimal yang diharapkan menghasilkan output "Reuse", air kotor sedang menghasilkan "Treatment", serta air sangat kotor menghasilkan "Reject"
2. Pengujian Sistem Keseluruhan
 Sistem diuji menggunakan sampel air drain mesin retort dan diuji secara *realtime*. Latar belakang pengembangan sistem ini adalah tingginya konsumsi air pada proses sterilisasi retort yang mencapai ratusan liter per *batch*, sementara tidak semua air drain memiliki tingkat kontaminasi yang sama. Pengujian bertujuan mengukur persentase air drain yang layak reuse, memerlukan treatment, atau harus dibuang, sehingga dapat menghitung potensi penghematan air dan biaya operasional.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental terapan dengan pendekatan *Research and Development* (R&D) untuk merancang, mengembangkan, dan menguji sistem pengambilan keputusan otomatis berbasis *fuzzy logic* untuk kelayakan reuse air drain mesin retort. Penelitian ini mengumpulkan data numerik dari tiga sensor yaitu pH, TDS (*Total Dissolved Solids*), dan *turbidity* yang kemudian diolah menggunakan algoritma *fuzzy logic* Mamdani. Proses pengambilan keputusan dilakukan melalui tahap fuzzifikasi dengan pendefinisian fungsi keanggotaan, pembentukan *rule base* berdasarkan standar kualitas air *food-grade*, inferensi metode *min-max*, dan defuzzifikasi metode *centroid* untuk menghasilkan keputusan "Reuse", "Treatment", atau "Reject". Pengambilan data menggunakan sampel air drain dari mesin retort perusahaan makanan dan minuman di Jawa Timur dengan variasi kontaminasi. Minimal 30 sampel diuji menggunakan *sensor turbidity*, TDS, dan pH yang dikalibrasi. Sistem *fuzzy* mengklasifikasikan setiap sampel ke kategori *Reuse*, *Treatment*, atau *Reject* untuk analisis distribusi kelayakan dan evaluasi performa sistem.

Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur, perancangan sistem, kalibrasi sensor, pengujian sistem, pengambilan data, analisis hasil, dan penarikan kesimpulan. Penelitian ini menggunakan beberapa alat dan perangkat lunak, yaitu laptop, *software* Arduino IDE, kabel *connector micro* USB, multimeter digital, kabel jumper, serta peralatan pendukung berupa solder dan timah solder. Bahan yang digunakan terdiri dari ESP32 Devkit sebagai mikrokontroler utama, sensor pH beserta modulnya, sensor TDS beserta modulnya, sensor *turbidity* beserta modulnya, IC ADS1115 sebagai ADC 16-bit, modul relay 4 channel 5V, modul *step down* 12V-5V, serta *solenoid valve* 12V sebagai aktuator dalam sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Sensor

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor *Turbidity*

No	Jenis Sampel Air	Uji Coba 1	Uji Coba 2	Uji Coba 3	Rata-rata
1	1 NTU	3.85 2 V	3.85 3 V	3.85 3 V	3.85 3 V
2	25 NTU	3.83 7 V	3.83 6 V	3.83 7 V	3.83 7 V
3	50 NTU	3.82 1 V	3.82 1 V	3.82 1 V	3.82 1 V

Berdasarkan hasil pengujian kalibrasi sensor *turbidity* pada Tabel 2, sensor menunjukkan konsistensi pembacaan yang sangat baik dengan standar deviasi minimal antar uji coba. Pada larutan standar 1 NTU, sensor menghasilkan output tegangan rata-rata 3.853 V dengan variasi maksimal hanya 0.001 V. Untuk larutan 25 NTU diperoleh tegangan 3.837 V, sedangkan pada 50 NTU menghasilkan 3.821 V.

Hasil kalibrasi menunjukkan hubungan linier antara nilai *turbidity* dan tegangan output sensor, dimana peningkatan kekeruhan air diikuti dengan penurunan tegangan. Kondisi ini sesuai dengan prinsip kerja sensor *turbidity* berbasis metode *nephelometric*, dimana intensitas cahaya yang tersebar oleh partikel tersuspensi berbanding lurus dengan tingkat kekeruhan (Utari *et al.*, 2023).

Memastikan akurasi pembacaan, dilakukan perhitungan persamaan regresi linier dari data kalibrasi. Perubahan tegangan dari 1 NTU ke 25 NTU sebesar 0.016 V dan dari 25 NTU ke 50 NTU juga sebesar 0.016 V, sehingga diperoleh nilai slope sebesar -0.000667 V/NTU. Konsistensi slope menunjukkan linearitas sensor yang baik pada rentang operasi 0-50 NTU. Nilai *repeatability* yang tinggi dengan variasi kurang dari 0.3% mengindikasikan sensor memiliki stabilitas yang memadai untuk aplikasi monitoring *real-time*.

Tabel 3. Pengujian dan Kalibrasi Sensor pH

No	Buffer Standar	Uji Coba 1	Uji Coba 2	Uji Coba 3	Rata-rata
1	Buffer 4.01	3.636 V	3.632 V	3.640 V	3.636 V
2	Buffer 6.86	3.205 V	3.206 V	3.214 V	3.208 V
3	Buffer 9.18	2.853 V	2.854 V	2.855 V	2.854 V

Hasil pengujian sensor pH menggunakan larutan buffer standar, menunjukkan karakteristik pembacaan yang stabil. Pada buffer pH 4.01, sensor menghasilkan tegangan rata-rata 3.636 V, buffer pH 6.86 sebesar 3.208 V, dan buffer pH 9.18 sebesar 2.854 V. Data menunjukkan hubungan linier negatif antara nilai pH dan tegangan output, sesuai dengan karakteristik elektroda pH berbasis probe kaca (Pratama *et al.*, 2022). Persamaan kalibrasi ditentukan dari tiga titik kalibrasi.

Perhitungan sensitivitas sensor pH menunjukkan perubahan tegangan sebesar 0.428 V pada rentang pH 4.01–6.86 dan 0.354 V pada rentang pH 6.86–9.18, sehingga diperoleh sensitivitas masing-masing sebesar 0.150 V/pH unit dan 0.153 V/pH unit. Sensitivitas rata-rata sebesar 0.151 V/pH unit menunjukkan respons sensor yang konsisten pada rentang pH operasional 4–9. Variasi maksimal antar uji coba sebesar 0.008 V pada buffer pH 6.86 mengindikasikan repeatability yang baik dengan error relatif kurang dari 0.25%.

Tabel 4. Pengujian dan Kalibrasi Sensor TDS

No	Buffer Standar	Uji Coba 1	Uji Coba 2	Uji Coba 3	Rata-rata
1	500 ppm	1.601 V	1.606 V	1.608 V	1.605 V
2	1000 ppm	2.366 V	2.368 V	2.369 V	2.367 V

Pengujian sensor TDS menggunakan larutan standar 500 ppm dan 1000 ppm (Tabel 2.5) menghasilkan tegangan rata-rata masing-

masing sebesar 1.605 V dan 2.367 V. Hubungan linier antara konsentrasi TDS dan tegangan output menunjukkan sensor bekerja optimal pada rentang pengukuran 0–2000 ppm.

Perhitungan koefisien TDS menunjukkan perubahan tegangan sebesar 0.762 V untuk selisih konsentrasi 500 ppm, sehingga diperoleh sensitivitas sebesar 0.001524 V/ppm. Nilai linearitas error sebesar 0.296% diperoleh dari perbandingan variasi maksimal 0.007 V terhadap tegangan referensi. Konsistensi pembacaan dengan variasi maksimal 0.007 V menunjukkan sensor TDS memiliki stabilitas yang memadai untuk monitoring kualitas air secara kontinyu. Sensitivitas sebesar 1.524 mV/ppm dinilai cukup tinggi untuk mendeteksi perubahan kandungan mineral terlarut dalam air drain retort (Irawan *et al.*, 2021).

Kesimpulan pengujian hardware menunjukkan bahwa ketiga sensor memiliki performa yang baik, ditinjau dari karakteristik linearitas yang konsisten pada rentang operasional, repeatability dengan variasi antar pengukuran kurang dari 0.3%, stabilitas output tegangan pada setiap uji coba, serta akurasi dengan error kalibrasi kurang dari 1% terhadap nilai referensi.

Tabel 5. Pengujian Logika Fuzzy

No	Turbiditas (NTU)	TDS (ppm)	pH	Output Fuzzy (manual)	Output Sistem	Hasil
1	4.08	260	6.86	Reuse	Reuse	Sesuai
2	16.79	227	7.44	Reuse	Reuse	Sesuai
3	8.83	350	7.14	Treatment	Treatment	Sesuai
4	11.53	554	5.18	Treatment	Treatment	Sesuai
5	68.83	320	5.75	Reject	Reject	Sesuai
6	119.74	301	7.10	Reject	Reject	Sesuai

Pengujian logika fuzzy (Tabel 2.6) dilakukan untuk memverifikasi konsistensi antara output sistem dan perhitungan manual

menggunakan metode Mamdani. Enam skenario pengujian mencakup kondisi reuse, treatment, dan reject.

Pada skenario 1 dan 2, sistem menghasilkan output *Reuse* yang sesuai dengan perhitungan manual. Sampel 1 memiliki turbidity 4.08 NTU, TDS 260 ppm, dan pH 6.86, sedangkan sampel 2 memiliki turbidity 16.79 NTU, TDS 227 ppm, dan pH 7.44. Kedua sampel memenuhi kriteria reuse berupa pH netral dan TDS rendah, sementara turbidity pada sampel 2 masih berada pada kategori medium sehingga tidak memicu *rule override*.

Pada skenario 3 dan 4, sistem mengklasifikasikan sampel sebagai *Treatment* secara sesuai. Sampel 3 berada pada batas ambang TDS 350 ppm dengan pH sedikit di luar rentang optimal, sedangkan sampel 4 memiliki pH asam sebesar 5.18 dan TDS tinggi sebesar 554 ppm, sehingga keduanya memenuhi aturan *treatment* berdasarkan *rule base* yang ditetapkan.

Pada skenario 5 dan 6, sistem menghasilkan output *Reject* yang sesuai. Kedua sampel memiliki nilai turbidity tinggi, masing-masing 68.83 NTU dan 119.74 NTU, yang memicu *rule override* dengan prioritas tertinggi sehingga parameter lain diabaikan dan sistem langsung mengklasifikasikan sebagai *Reject*.

Evaluasi akurasi menunjukkan bahwa seluruh enam skenario pengujian menghasilkan output yang sesuai dengan perhitungan manual, sehingga diperoleh akurasi sistem sebesar 100%. Hasil ini memvalidasi bahwa algoritma fuzzy Mamdani telah terimplementasi dengan benar, *rule override* turbidity berfungsi sesuai desain, fungsi keanggotaan dan *rule base* konsisten, serta proses defuzzifikasi metode centroid menghasilkan nilai crisp yang tepat.

Hasil Pengujian Sistem Keseluruhan Distribusi Sistem Keputusan

Tabel 6. Distribusi Keputusan dan Aktivasi Solenoid

Kategori	Jumlah Sampel	Persentase	Volume Total	Solenoid Aktif
Reuse	8	26.67%	4,800 ml	SV1 (Tangki Reuse)

Kategori	Jumlah Sampel	Persentase	Volume Total	Solenoid Aktif
Treatment	20	66.67%	12,000 ml	SV2 (Tangki Treatment)
Reject	2	6.67%	1,200 ml	SV3 (WWTP)
Total	30	100%	18,000 ml	-

Kategori *Reuse* sebesar 26.67% terdiri dari delapan sampel (4, 5, 7, 10, 13, 14, 26, 28) yang diklasifikasikan layak untuk reuse langsung. Karakteristik sampel menunjukkan pola konsisten dengan turbidity pada rentang 4.19–15.43 NTU (rata-rata 9.64 NTU), pH 6.47–7.40 (rata-rata 6.95), dan TDS 158–343 ppm (rata-rata 277 ppm). Ketiga parameter memenuhi kondisi optimal berupa turbidity rendah hingga sedang, pH netral, dan TDS rendah, sehingga memvalidasi desain *rule base* yang menetapkan pH netral dan TDS rendah sebagai syarat utama kategori *Reuse*.

Kategori *Treatment* mendominasi sebesar 66.67% dengan dua puluh sampel yang memerlukan pengolahan lanjutan. Penyebab utama meliputi pH non-optimal dengan 12 sampel (60%) bersifat asam, TDS medium hingga tinggi pada 8 sampel (40%), serta turbidity medium pada 15 sampel (75%). Dominasi kategori ini mencerminkan kondisi riil air drain retort yang umumnya mengalami kontaminasi ringan hingga sedang akibat kontak dengan produk makanan dalam kemasan. Meskipun tidak layak untuk reuse langsung, air kategori *Treatment* masih memiliki potensi pemanfaatan melalui proses filtrasi sederhana atau penyesuaian pH.

Kategori *Reject* sebesar 6.67% mencakup dua sampel (9 dan 30) dengan nilai turbidity masing-masing 26.18 NTU dan 30.60 NTU, sementara pH dan TDS berada pada kondisi baik. Nilai turbidity yang melebihi 25 NTU memicu *rule override*, sehingga air langsung diklasifikasikan sebagai *Reject*. Hal ini membuktikan bahwa sistem prioritas parameter berfungsi dengan baik, dimana turbidity tinggi yang mengindikasikan kontaminasi partikulat berat mengarahkan air ke WWTP tanpa mempertimbangkan parameter lain.

Analisis Karakteristik Parameter

Tabel 7. Statistik Deskriptif Parameter Kualitas Air

Parameter	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Std. Deviasi
Turbidity (NTU)	4.19	30.60	12.83	5.78
pH	5.18	7.47	6.54	0.69
TDS (ppm)	158	554	318.77	81.42

Nilai turbidity memiliki rata-rata sebesar 12.83 NTU dengan standar deviasi 5.78, yang berada pada kategori *Medium* sesuai fungsi keanggotaan fuzzy (2.5–25 NTU). Standar deviasi tersebut menunjukkan variabilitas sedang dengan tingkat kekeruhan yang relatif konsisten antar sampel. Hanya 6.67% sampel yang melebihi ambang kritis 25 NTU, sehingga 93.33% sampel masih dapat dievaluasi lebih lanjut berdasarkan parameter pH dan TDS tanpa langsung ditolak oleh sistem.

Nilai pH rata-rata sebesar 6.54 dengan standar deviasi 0.69 berada sedikit di bawah rentang netral optimal dan menunjukkan kecenderungan asam. Variasi pH relatif kecil, mencerminkan konsistensi karakteristik air drain retort. Sebanyak 60% sampel berada pada rentang pH netral, sementara 40% bersifat asam, tanpa adanya sampel basa. Dominasi pH asam diduga dipengaruhi oleh reaksi kimia selama proses retort atau kontaminasi dari produk makanan, yang menjelaskan tingginya klasifikasi *Treatment* meskipun turbidity dan TDS masih dalam batas toleransi.

Parameter TDS memiliki nilai rata-rata sebesar 318.77 ppm dengan standar deviasi 81.42 ppm dan berada pada kategori *Low* sesuai SNI 3553:2015. Sebagian besar sampel (80%) memiliki TDS rendah, sementara sisanya berada pada kategori medium hingga tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa kandungan mineral terlarut dalam air drain retort relatif rendah dan bukan menjadi faktor pembatas utama dalam penentuan potensi reuse.

Evaluasi Performa Sistem Kontrol Responsivitas Sistem

Sistem menunjukkan respons yang cepat dan konsisten dalam mengaktifkan solenoid valve berdasarkan keputusan fuzzy. SV1 (*Reuse*) teraktivasi sebanyak 8 kali untuk

sampel dengan kualitas optimal, SV2 (*Treatment*) sebanyak 20 kali untuk sampel dengan kualitas suboptimal, dan SV3 (*Reject*) sebanyak 2 kali untuk sampel dengan nilai turbidity di atas 25 NTU. SV4 (*Flow Control*) teraktivasi sebanyak 30 kali sebagai gerbang aliran awal. Selama 30 kali pengujian tidak ditemukan keterlambatan maupun kesalahan aktivasi valve, yang membuktikan integrasi antara algoritma fuzzy logic dan sistem kontrol hardware berjalan dengan baik.

Verifikasi LCD Display

Setiap keputusan sistem ditampilkan secara real-time pada LCD sesuai format yang ditetapkan.



Gambar 9. Tampilan LCD Display

Display berfungsi dengan baik pada seluruh skenario pengujian dan memberikan transparansi proses pengambilan keputusan kepada operator.

Potensi Penghematan Air dan Implikasi Ekonomis

Berdasarkan hasil pengujian 30 sampel dengan total volume 18,000 ml:

Kategori	Volume	Persentase	Potensi Pemanfaatan
Reuse Langsung	4,800 ml	26.67%	Dapat digunakan langsung untuk proses retort berikutnya
Treatment	12,000 ml	66.67%	Dapat direcovery melalui filtrasi sederhana dan pH adjustment

Kategori	Volume	Persentase	Potensi Pemanfaatan
Reject	1,200 ml	6.67%	Harus dibuang ke WWTP
Total Recoverable	16,800 ml	93.33%	Potensi penghematan air tinggi

Proyeksi Skala Industri

Mesin retort beroperasi dengan konsumsi air sebesar 700 liter per batch dan 6 batch per hari sehingga total konsumsi air harian mencapai 4.200 liter. Berdasarkan distribusi hasil pengujian, potensi reuse langsung sebesar 1.120 liter per hari (26,67%) dan potensi recovery setelah treatment sebesar 2.800 liter per hari (66,67%), sehingga total potensi penghematan mencapai 3.920 liter per hari atau 93,33% dari total konsumsi air.

Satu bulan operasional dengan 25 hari kerja, penghematan air yang dapat dicapai sebesar 98 m³, sedangkan proyeksi penghematan tahunan mencapai 1.176 m³. Nilai tersebut menunjukkan potensi penghematan yang signifikan di tengah keterbatasan sumber daya air serta meningkatnya biaya air industri dan pengolahan limbah.

Implementasi sistem ini memberikan manfaat ekonomis melalui pengurangan biaya operasional air dan pengolahan limbah sekaligus mendukung prinsip keberlanjutan melalui kontribusi terhadap tujuan pembangunan berkelanjutan, khususnya penyediaan air bersih dan konsumsi yang bertanggung jawab. Penerapan sistem juga berpotensi meningkatkan reputasi perusahaan dalam praktik industri ramah lingkungan serta memperkuat aspek tanggung jawab sosial perusahaan dan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan.

Validasi terhadap Standar Food Grade

Sistem fuzzy yang dikembangkan telah mengintegrasikan standar kualitas air food-grade dalam rule base-nya:

Parameter	Standar Referensi	Threshold Sistem	Validasi
Turbidity	<25 NTU (Permenkes 32/2017)	High ≥ 25 NTU Reject	Sesuai
pH	6.5-8.5 (WHO, 2007)	Netral=6.5-8.5 untuk Reuse	Sesuai
TDS	<500 ppm (SNI 3553:2015)	Low <350, Medium <700	Sesuai

Analisis Konservatisme Sistem

Sistem menerapkan pendekatan konservatif dengan ambang batas yang lebih ketat dibandingkan standar minimum. Parameter TDS ditetapkan pada kategori rendah di bawah 350 ppm, lebih ketat dari standar 500 ppm, sehingga memberikan *safety margin* sebesar 30%. Penerapan *rule override* pada turbidity ≥ 25 NTU memastikan kepatuhan penuh terhadap batas maksimal kekeruhan. Penetapan pH netral sebagai syarat mutlak kategori *Reuse* menjamin kondisi air yang aman bagi peralatan dan proses lanjutan. **7**

Pendekatan ini sejalan dengan prinsip HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point*) dalam industri pangan, yang menempatkan aspek keselamatan dan *quality assurance* sebagai prioritas utama.

Evaluasi Sistem dan Rekomendasi Pengembangan

Sistem yang dikembangkan memiliki keunggulan pada aspek *automated decision-making*, dimana sistem tidak hanya memonitor parameter kualitas air tetapi juga secara langsung mengambil keputusan dan mengeksekusi *routing* aliran air melalui kontrol valve secara otomatis. Sistem dilengkapi *rule override mechanism* yang memprioritaskan parameter turbidity untuk mencegah air berkualitas buruk masuk ke jalur reuse. Penyesuaian sistem dengan standar *food-grade* dan regulasi industri pangan di Indonesia menghasilkan solusi *end-to-end* mulai dari pembacaan sensor, pengambilan keputusan, hingga kontrol valve dengan tampilan real-time.

Sistem masih memiliki keterbatasan dari aspek teknis dan operasional. Parameter yang dimonitor terbatas pada turbidity, pH, dan TDS, sementara parameter mikrobiologis seperti total coliform dan *E. coli* yang kritis untuk aplikasi

food-grade belum terakomodasi. Pengembangan lanjutan perlu mempertimbangkan penambahan sensor mikrobiologi atau sensor indikator seperti BOD dan COD untuk memperoleh evaluasi kualitas air yang lebih komprehensif. Skala pengujian yang masih menggunakan volume sampel terbatas belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi aliran kontinyu industri, sehingga faktor *pressure drop*, turbulensi pencampuran, dan *residence time* berpotensi mempengaruhi akurasi pembacaan sensor dan perlu divalidasi melalui pengujian skala *pilot plant*.

Sistem menunjukkan kelebihan signifikan dalam objektivitas pengambilan keputusan karena eliminasi subjektivitas dan potensi *human error* melalui pemanfaatan data real-time dan *rule base* yang konsisten. Transparansi dan *traceability* sistem memungkinkan setiap keputusan ditelusuri berdasarkan aturan yang teraktivasi. Tampilan LCD memberikan visibilitas penuh kepada operator mengenai nilai parameter dan dasar keputusan sistem, sehingga memudahkan proses audit serta mendukung kepatuhan terhadap regulasi *food safety*.

Pengembangan lanjutandirekomendasikan melalui implementasi sistem pada skala industri dengan pengujian *pilot plant* menggunakan laju alir 50–100 liter per menit selama periode 1–3 bulan untuk memvalidasi performa pada kondisi operasional riil. Variasi jenis produk perlu diuji untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik air drain dan kebutuhan penyesuaian *rule base*. Integrasi sistem dengan teknologi IoT dan *cloud storage* memungkinkan *remote monitoring* dan penyimpanan data historis secara otomatis. Platform seperti *ThingSpeak*, *Blynk*, dan *Ubidots* dapat dimanfaatkan untuk analisis data dan *predictive maintenance*. Data historis berpotensi digunakan untuk optimasi *rule base* melalui pendekatan *machine learning* atau pengembangan sistem fuzzy adaptif guna meningkatkan akurasi dan adaptabilitas jangka panjang.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan prototipe sistem monitoring multi-parameter berbasis fuzzy logic Mamdani untuk menilai kelayakan reuse air drain mesin retort. Sistem monitoring mengintegrasikan sensor turbidity,

pH, dan TDS dengan mikrokontroler ESP32 untuk pembacaan kualitas air secara real-time. Hasil pengujian hardware menunjukkan performa sensor yang baik dengan tingkat akurasi kurang dari 1%, repeatability di bawah 0.3%, serta linearitas tinggi pada rentang operasional masing-masing sensor.

Implementasi algoritma fuzzy logic Mamdani dengan 27 rule base yang disesuaikan dengan standar *food-grade* berhasil dilakukan. Sistem menerapkan mekanisme prioritas dimana turbidity ≥ 25 NTU langsung mengklasifikasikan air sebagai *Reject* tanpa mempertimbangkan parameter lainnya. Pengujian logika fuzzy menunjukkan akurasi 100% dengan seluruh skenario pengujian menghasilkan output yang sesuai dengan perhitungan manual, sehingga memvalidasi proses fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi.

Integrasi keputusan fuzzy dengan kontrol otomatis valve berhasil mengarahkan aliran air secara real-time ke jalur *Reuse*, *Treatment*, atau *Reject*. Dari 30 sampel air drain retort, sistem mengklasifikasikan 26.67% sebagai *Reuse*, 66.67% sebagai *Treatment*, dan 6.67% sebagai *Reject* tanpa kesalahan aktivasi valve selama pengujian.

Hasil penelitian menunjukkan potensi penghematan air sebesar 93.33% dari total air drain retort. Proyeksi skala industri menunjukkan potensi penghematan hingga 1.176 m³ per tahun, yang memberikan manfaat ekonomis melalui pengurangan biaya air dan pengolahan limbah serta mendukung efisiensi sumber daya, penerapan industri ramah lingkungan, dan kepatuhan terhadap regulasi keberlanjutan.

Pengembangan lanjutan perlu dilakukan dengan menambahkan parameter monitoring seperti BOD, COD, atau UV254 untuk memperoleh evaluasi kualitas air yang lebih komprehensif, khususnya pada aspek mikrobiologis yang kritis bagi aplikasi *food-grade*. Pengujian skala industri dengan aliran kontinyu 50–100 liter per menit selama 1–3 bulan diperlukan untuk memvalidasi performa sistem pada kondisi operasional riil dengan variasi produk.

Integrasi teknologi IoT dan *machine learning* direkomendasikan untuk *remote monitoring*, penyimpanan data historis berbasis *cloud*, serta pengembangan *adaptive fuzzy system* menggunakan ANFIS guna meningkatkan akurasi dan fleksibilitas sistem.

Penambahan fitur *self-cleaning* sensor dan *auto-calibration* diperlukan untuk meningkatkan keandalan serta mengurangi kebutuhan perawatan manual.

Validasi sistem oleh BPOM atau lembaga sertifikasi *food safety* diperlukan untuk memastikan kepatuhan regulasi. Analisis kelayakan ekonomi dan *life cycle assessment* disarankan untuk memperkuat aspek bisnis, dampak lingkungan, dan penerapan prinsip *circular economy* pada industri pengolahan pangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuzairi, T., Irfan, A., & Basari. (2021). COVENT-Tester: A low-cost, open source ventilator tester. *HardwareX*, 9, e00196. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00196>
- Adjovu, G., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems. *Remote Sensing*, 15(14), 1–43.
- Al-Mutairi, A. W., & Al-Aubidy, K. M. (2023). IoT-based smart monitoring and management system for fish farming. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 12(3), 1435–1446. <https://doi.org/10.11591/eei.v12i3.3365>
- Barzegar, Y., Gorelova, I., Bellini, F., & D'Ascenzo, F. (2023). Drinking Water Quality Assessment Using a Fuzzy Inference System Method: A Case Study of Rome (Italy). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(15). <https://doi.org/10.3390/ijerph20156522>
- Bellini, F., Barzegar, Y., Barzegar, A., Marrone, S., Verde, L., & Pisani, P. (2025). Sustainable Water Quality Evaluation Based on Cohesive Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference System in Tivoli (Italy). *Sustainability (Switzerland)*, 17(2). <https://doi.org/10.3390/su17020579>
- Benjakul, S., Chantakun, K., & Karnjanapratum, S. (2018). Impact of retort process on characteristics and bioactivities of herbal soup based on hydrolyzed collagen from seabass skin. *Journal of Food Science and Technology*, 55(9), 3779–3791. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3310-z>
- Efendi, M. T. N., Sulistiyowati, I., Syahririni, S., & Anshory, I. (2024). Designing a Monitoring System and Optimizing Water Quality in Tilapia Farming Ponds in Pohkecik Hamlet Using Ubidots. *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, 6(1), 34–44. <https://doi.org/10.12928/biste.v6i1.10090>
- Fernandez Alvarez, V., Granada Salazar, D., Figueroa, C., Corrales, J. C., & Casanova, J. F. (2023). *Estimation of Water Turbidity in Drinking Water Treatment Plants Using Machine Learning Based on Water and Meteorological Data*. 89. <https://doi.org/10.3390/ecws-7-14326>
- Garnier, C., Guiga, W., Lameloise, M.-L., & Fargues, C. (2023). Water reuse in the food processing industries: A review on pressure-driven membrane processes as reconditioning treatments. *Journal of Food Engineering*, 344, 111397. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111397>
- Golshan, M., Dastoorpour, M., & Birgani, Y. T. (2020). Fuzzy environmental monitoring for the quality assessment: Detailed feasibility study for the Karun River basin, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100324. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100324>
- Irawan, Y., Febriani, A., Wahyuni, R., & Devis, Y. (2021). Water quality measurement and filtering tools using Arduino Uno, PH sensor and TDS meter sensor. *Journal of Robotics and Control (JRC)*, 2(5), 357–362. <https://doi.org/10.18196/jrc.25107>
- Jimenez, P. S., Bangar, S. P., Suffern, M., & Whiteside, W. S. (2024). Understanding retort processing: A review. *Food Science and Nutrition*, 12(3), 1545–1563. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3912>
- Kirby, R. M., Bartram, J., & Carr, R. (2003). Water in food production and processing: quantity and quality concerns. *Food Control*, 14(5), 283–299. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0956-7135\(02\)00090-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0956-7135(02)00090-7)
- Moumni, M., & Massour el Aoud, M. (2022). Fuzzy logic control of a brackish water reverse osmosis desalination process. *Computers & Chemical Engineering*, 167, 108026.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108026>
- Papa, P., Zampetti, E., Molinari, F. N., De Cesare, F., Di Natale, C., Tranfo, G., & Macagnano, A. (2024). A Polyvinylpyrrolidone Nanofibrous Sensor Doubly Decorated with Mesoporous Graphene to Selectively Detect Acetic Acid Vapors. *Sensors*, *24*(7). <https://doi.org/10.3390/s24072174>
- Plappally, A. K., & Lienhard V, J. H. (2013). Costs for water supply, treatment, end-use and reclamation. *Desalination and Water Treatment*, *51*(1–3), 200–232. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.708996>
- Pratama, I. P. Y., pramesia, Wibawa, K. S., & Suarjaya, I. M. A. D. (2022). Perancangan PH Meter Dengan Sensor PH Air Berbasis Arduino. *JITTER : Jurnal Ilmiah Teknologi Dan Komputer*, *3*(2), 1034. <https://doi.org/10.24843/jtrti.2022.v03.i02.p02>
- R. L. Bailone, R. C. Borra, H. C. S. Fukushima, dan L. K. A. (2022). Water reuse in the food industry. *Discov Food*, *2*(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-021-00002-4>.
- Rosmasari, Nur Rahmad, D., Prafanto, A., Khoirunnita, A., & Jamil, M. (2025). Sugeno Fuzzy Logic for IoT-based Chicken Farm Drinking Water Quality Monitoring. *Indonesian Journal of Data and Science*, *6*(1), 134–144. <https://doi.org/10.56705/ijodas.v6i1.229>
- Utari, P., Aisuwarya, R., & Rahayu, R. (2023). *Journal on Computer Hardware , Signal Processing , Embedded System and Networking* MIKROKONTROLER. *04*(02), 141–155.
- Vadiati, M., Asghari-Moghaddam, A., Nakhaei, M., Adamowski, J., & Akbarzadeh, A. H. (2016). A fuzzy-logic based decision-making approach for identification of groundwater quality based on groundwater quality indices. *Journal of Environmental Management*, *184*(Pt 2), 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.082>
- WHO/UNICEF. (2017). WATER QUALITY AND HEALTH - REVIEW OF TURBIDITY: Information for regulators and water suppliers. *Who/Fwc/Wsh/17.01*, 10.
- WHO. (2007). pH in drinking-water. *Guidelines for Drinking Water Quality*, *2*(2), 1–7.
- Żywiec, J., Tchórzewska-Cieślak, B., & Sokolan, K. (2024). Assessment of Human Errors in the Operation of the Water Treatment Plant. *Water (Switzerland)*, *16*(17), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w16172399>

TEMPLATE ARTIKEL AL ULUM Muchtarul Hadist new.pdf

ORIGINALITY REPORT

6%

SIMILARITY INDEX

6%

INTERNET SOURCES

5%

PUBLICATIONS

4%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	ejournal3.undip.ac.id Internet Source	4%
2	repository.dinamika.ac.id Internet Source	1%
3	ejournal.upbatam.ac.id Internet Source	<1%
4	Submitted to UM Surabaya Student Paper	<1%
5	Submitted to Institut Teknologi Kalimantan Student Paper	<1%
6	eprints.umsida.ac.id Internet Source	<1%
7	lab_srk.ub.ac.id Internet Source	<1%
8	link.springer.com Internet Source	<1%
9	Soufiane Haddout, Tonni Agustiono Kurniawan. "Handbook of Artificial Intelligence in Water Management - Towards Net Zero Emissions", CRC Press, 2026 Publication	<1%
10	digilib.unila.ac.id Internet Source	<1%
11	files01.core.ac.uk Internet Source	<1%

<1%

12

research.unipg.it
Internet Source

<1%

Exclude quotes On

Exclude matches Off

Exclude bibliography On