

**SISTEM PENGAMBILAN KEPUTUSAN OTOMATIS BERBASIS FUZZY UNTUK
KELAYAKAN *REUSE* AIR DRAIN MESIN RETORT**

Mohamad Muchtarul Hadist¹, Indah Sulistiyowati¹, Syamsudduha Syahrerini¹,
Agus Hayatal Falah¹

¹*Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo,
Sidoarjo, Indonesia*

*Email: muchtarul2293@gmail.com, indah_sulistiyowati@umsida.ac.id,
syahrerini@umsida.ac.id, agushf@umsida.ac.id*

ABSTRAK

Tingginya konsumsi air pada proses sterilisasi mesin retort dan pembuangan air drain yang masih berpotensi dimanfaatkan kembali mendorong perlunya sistem penilaian kelayakan reuse air yang objektif dan otomatis. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengambilan keputusan otomatis berbasis *fuzzy logic Mamdani* untuk menentukan kelayakan reuse air drain mesin retort berdasarkan parameter *turbidity*, *pH*, dan *Total Dissolved Solids (TDS)*. Lingkup penelitian meliputi perancangan prototipe sistem monitoring multi-parameter, implementasi sistem inferensi fuzzy berbasis standar *food-grade*, serta integrasi keputusan dengan kontrol valve otomatis. Metode penelitian menggunakan pendekatan *research and development* dengan pengolahan data sensor secara *real-time* menggunakan *fuzzy inference system Mamdani* yang terdiri dari 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 yang baik pada rentang operasional. Pengujian logika fuzzy menghasilkan akurasi keputusan sebesar 100% dibandingkan perhitungan manual. Dari 30 sampel air drain retort, sistem mengklasifikasikan 26,67% sebagai *reuse*, 66,67% sebagai *treatment*, dan 6,67% sebagai *reject*, dengan potensi penghematan air sebesar 93,33%. Sistem yang dikembangkan terbukti mampu meningkatkan efisiensi penggunaan air, mengurangi biaya operasional, serta mendukung penerapan praktik industri pangan yang 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 with reuse potential highlight the need for an objective and automated water reuse feasibility assessment system. This study aims to develop an automated decision-making system based on Mamdani fuzzy logic to evaluate the reuse feasibility of retort drain water using turbidity, pH, and Total Dissolved Solids (TDS) parameters. The scope of this research includes the design of a multi-parameter monitoring prototype, the implementation of a food-grade-based fuzzy inference system, and the integration of decision results with automated valve control. The study adopts a research and development approach, in which sensor data are processed in real-time using a Mamdani fuzzy inference system consisting of 27 rule bases with a turbidity-based rule override mechanism. Experimental results indicate that all sensors achieve accuracy below 1%, repeatability under 0.3%, and good linearity within their operational ranges. Fuzzy logic evaluation demonstrates a decision accuracy of 100% compared to manual calculations. Testing on 30 retort drain water samples shows that 26.67% are classified as reuse, 66.67% as treatment, and 6.67% as reject, resulting in a water-saving potential of 93.33%. The proposed system effectively improves water-use efficiency, reduces operational costs, and supports 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 (Bailone *et al.*, 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).

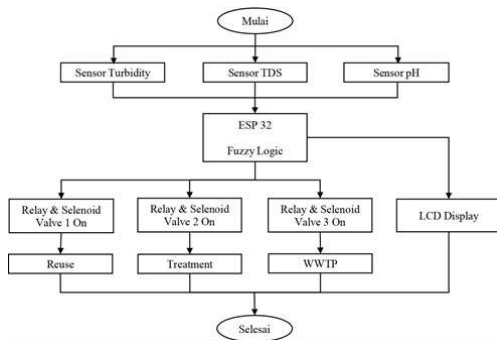
Mayoritas penelitian tersebut masih berfokus pada sistem monitoring atau pemberian rekomendasi tanpa menyediakan mekanisme pengambilan keputusan yang terstruktur dan konsisten (Al-Mutairi & Al-Aubidy, 2023). Penelitian terdahulu juga belum mengarahkan implementasinya pada industri makanan, khususnya 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).



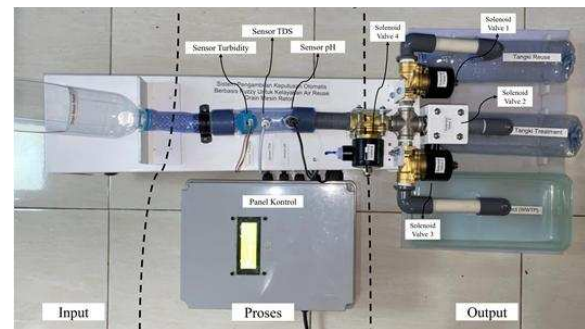
Gambar 1. Blok Diagram Sistem

Gambar 1 menunjukkan blok diagram sistem pengambilan keputusan otomatis untuk kelayakan *reuse* air drain mesin retort. Sistem mengintegrasikan sensor *turbidity*, *pH*, dan *Total Dissolved Solids (TDS)* dengan mikrokontroler ESP32 untuk memproses data kualitas air menggunakan metode *fuzzy logic Mamdani*. Hasil keputusan digunakan untuk mengendalikan sistem valve otomatis yang mengarahkan aliran air ke jalur *reuse*, *treatment*, atau *wastewater treatment plant (WWTP)*.

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 fuzzifikasi, evaluasi *rule base*, inferensi, dan defuzzifikasi untuk menghasilkan keputusan yang lebih akurat dibandingkan metode *threshold* tunggal (Żywiec *et al.*, 2024).

Prototipe Sistem

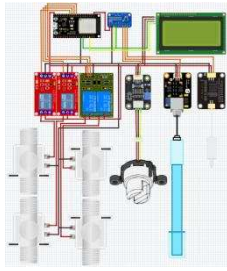


Gambar 2. Prototipe Sistem

Gambar 2 memperlihatkan *prototype* fisik sistem pengambilan keputusan otomatis yang dikembangkan. *Prototype* ini terdiri dari unit sensor kualitas air, panel kontrol berbasis ESP32, dan sistem *solenoid valve* pada bagian output. Sistem dirancang untuk merepresentasikan implementasi nyata pengambilan keputusan otomatis berbasis sensor dan *fuzzy logic*.

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

Gambar 3 menunjukkan konfigurasi rangkaian perangkat keras sistem yang terdiri dari mikrokontroler ESP32, modul ADC ADS1115, sensor *turbidity*, *pH*, dan *TDS*, serta modul relay untuk mengendalikan *solenoid valve*. Rangkaian ini memungkinkan akuisisi data multi-sensor secara *real-time* dan eksekusi keputusan otomatis berdasarkan hasil pengolahan *fuzzy logic*.

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 multi-sensor gas dan suhu serta aplikasi kontrol otomatis menggunakan ESP32-CAM, dimana ESP32 menunjukkan stabilitas tinggi dalam menangani pembacaan multi-sensor dan pemrosesan *real-time* (Moumni & Massour el Aoud, 2022;Febrian *et al.*, 2025; Rifandi *et al.*, 2025), 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).

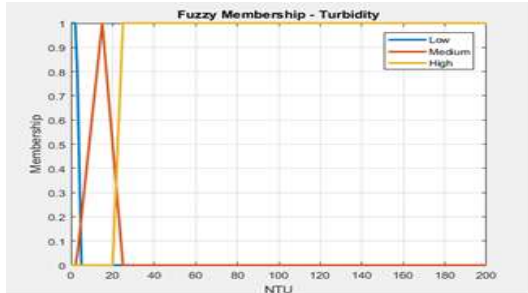
Perancangan Logic Fuzzy Mamdani

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

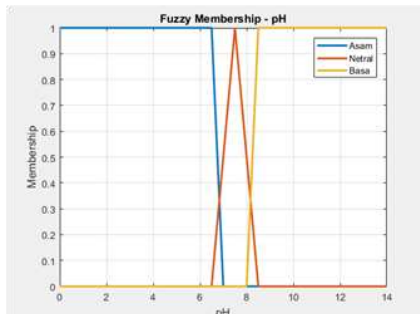
parameter memiliki fungsi keanggotaan dengan kategori linguistik.



Gambar 4. Fungsi Keanggotaan Turbidity

Gambar 4 menampilkan fungsi keanggotaan *fuzzy* untuk parameter *turbidity* yang dibagi ke dalam tiga kategori, yaitu *Low*, *Medium*, dan *High*. Klasifikasi ini digunakan untuk merepresentasikan tingkat kekeruhan air sebagai parameter utama dalam penentuan kelayakan *reuse* air.

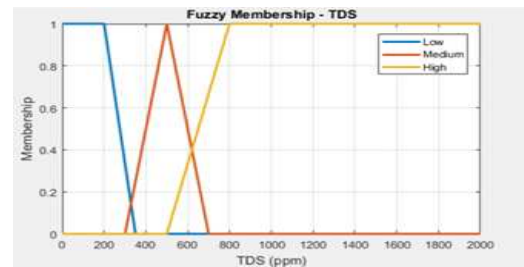
Variabel *turbidity* digunakan tiga kategori yaitu *Low* dengan bentuk trapezoid [0, 0, 2.5, 5], *Medium* dengan bentuk triangular [2.5, 15, 25], dan *High* dengan bentuk trapezoid [20, 25, 200, 200].



Gambar 5. Fungsi Keanggotaan pH

Gambar 5 menunjukkan fungsi keanggotaan *fuzzy* untuk parameter *pH* yang diklasifikasikan menjadi *Asam*, *Netral*, dan *Basa*. Parameter ini digunakan untuk memastikan kondisi keasaman air berada dalam rentang yang aman sesuai standar industri pangan.

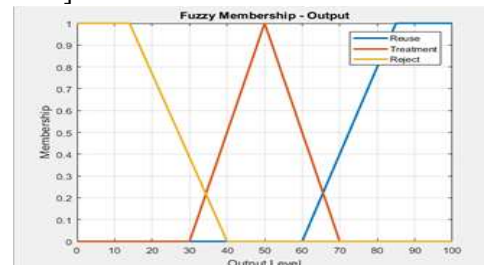
Variabel *pH* digunakan tiga kategori fungsi keanggotaan, yaitu *Asam* dengan bentuk trapezoid [0, 0, 6.0, 7.0], *Netral* dengan bentuk triangular [6.5, 7.0, 8.5], dan *Basa* dengan bentuk trapezoid [8.0, 8.5, 14, 14].



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan TDS

Gambar 6 memperlihatkan fungsi keanggotaan *fuzzy* untuk parameter *Total Dissolved Solids (TDS)* yang dibagi menjadi kategori *Low*, *Medium*, dan *High*. Parameter *TDS* digunakan untuk menilai tingkat kandungan mineral terlarut yang mempengaruhi kelayakan *reuse* air.

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

Gambar 7 menunjukkan fungsi keanggotaan *fuzzy* untuk variabel output sistem yang terdiri dari kategori *Reject*, *Treatment*, dan *Reuse*. Variabel output ini merepresentasikan hasil akhir keputusan sistem berdasarkan kombinasi seluruh parameter input.

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 α -rule = $\min(\mu_{Turbidity}, \mu_{TDS}, \mu_{pH})$. Contoh evaluasinya yaitu Rule 11: IF *Turbidity* = *Medium* AND TDS = *Low* AND pH = *Netral* → *Reuse*, dengan $\alpha_{11} = \min(0.8, 0.6, 0.9) = 0.6$; dan Rule 1: IF *Turbidity* = *High* → *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*).

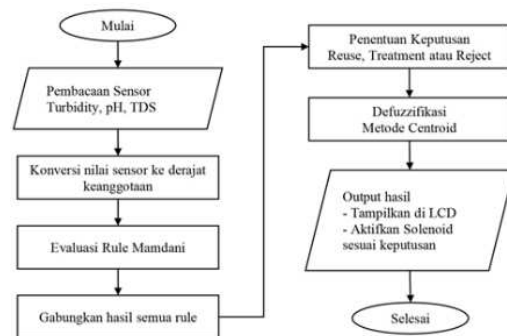
Output fuzzy kemudian dikonversi menjadi nilai *crisp* menggunakan metode Centroid (*Center of Gravity*) yang dipilih karena hasilnya paling stabil dan presisi, umum digunakan pada sistem kualitas air, dan mendekati penilaian manusia terhadap kondisi air.

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

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

Gambar 8 menggambarkan flowchart sistem fuzzy logic Mamdani secara keseluruhan, mulai dari pembacaan sensor, proses fuzzification, evaluasi aturan, hingga defuzzification. Diagram ini menunjukkan tahapan pengambilan keputusan otomatis yang diterapkan pada sistem.

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%)

Tabel 1 menunjukkan pemetaan kategori output sistem fuzzy logic yang terdiri dari Reject, Treatment, dan Reuse beserta rentang nilai keluaran dan tindakan sistem. Tabel ini menjadi acuan utama dalam klasifikasi kelayakan air dan pengendalian solenoid valve secara otomatis.

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.

Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengklasifikasikan kelayakan air drain mesin retort serta menilai potensi efisiensi pemanfaatan air berdasarkan hasil pengujian operasional sistem secara realtime.

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 menyajikan hasil pengujian dan kalibrasi sensor *turbidity* menggunakan larutan standar pada beberapa tingkat kekeruhan. Data pada tabel ini digunakan untuk mengevaluasi

konsistensi, linearitas, dan stabilitas pembacaan sensor

Tabel 2. Hasil Pengujian *Sensor Turbidity*

N o	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

Tabel 3 menampilkan hasil pengujian sensor *pH* menggunakan larutan buffer standar pada beberapa titik referensi. Tabel ini digunakan untuk menentukan karakteristik respons sensor serta tingkat *repeatability* pembacaan.

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

Tabel 4 menunjukkan hasil pengujian sensor *Total Dissolved Solids (TDS)* menggunakan larutan standar dengan konsentrasi berbeda. Data ini digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas dan linearitas sensor dalam mengukur kandungan mineral terlarut.

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 kontinu. 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	Turbidity (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

Tabel 5 menyajikan perbandingan antara output sistem *fuzzy logic* dan hasil perhitungan manual pada beberapa skenario pengujian. Tabel ini digunakan untuk memverifikasi konsistensi dan akurasi implementasi algoritma *fuzzy Mamdani*.

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)
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	-

Tabel 6 menunjukkan distribusi hasil keputusan sistem terhadap sejumlah sampel air drain retort beserta aktivasi *solenoid valve* yang terkait. Tabel ini menggambarkan performa sistem dalam mengarahkan aliran air sesuai kategori kelayakan.

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

Tabel 7 menyajikan statistik deskriptif parameter kualitas air yang meliputi *turbidity*, *pH*, dan *TDS* dari seluruh sampel pengujian. Data ini digunakan untuk menggambarkan karakteristik umum air drain retort yang dianalisis oleh sistem.

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 bahwa integrasi algoritma fuzzy logic dengan sistem kontrol hardware berfungsi dengan baik dan memvalidasi keandalan platform ESP32 untuk kontrol real-time sebagaimana implementasi serupa pada sistem otomasi industri (Phalah et al., 2025).

Verifikasi LCD Display

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



Gambar 9. Tampilan LCD Display

Gambar 9 memperlihatkan tampilan LCD sebagai antarmuka sistem. LCD menampilkan nilai parameter kualitas air dan hasil keputusan sistem secara *real-time* untuk memudahkan proses monitoring oleh operator.

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:

Tabel 8. Distribusi Volume dan Potensi Pemanfaatan Air

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

Tabel 8 menunjukkan distribusi volume air berdasarkan kategori keputusan sistem serta potensi pemanfaatannya. Tabel ini digunakan untuk mengevaluasi potensi penghematan air dan pemanfaatan kembali air drain retort.

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:

Tabel 9. Validasi Sistem terhadap Standar Food-Grade

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

Tabel 9 menyajikan perbandingan antara standar kualitas air *food-grade* dengan ambang

batas yang diterapkan pada sistem. Tabel ini digunakan untuk memvalidasi kesesuaian desain sistem *fuzzy* terhadap regulasi dan standar industri pangan.

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.

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 mengevaluasi kinerja sistem pengambilan keputusan otomatis dalam mengklasifikasikan kelayakan *reuse* air drain mesin retort berdasarkan parameter turbidity, pH, dan *Total Dissolved Solids (TDS)*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengelompokkan air drain secara konsisten ke dalam kategori *reuse*, *treatment*, dan *reject* sesuai kondisi kualitas air yang terukur.

Penerapan sistem ini mendukung efisiensi pemanfaatan air pada proses sterilisasi retort serta berpotensi menurunkan volume air limbah dan biaya operasional. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat menjadi solusi pendukung pengambilan keputusan operasional yang objektif dan efisien pada industri pengolahan pangan berbasis retort.

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>
- Bailone, R. L., Borra, R. C., Fukushima, H. C. S., & Aguiar, L. K. (2022). Water reuse in the food industry. *Discover Food*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44187-021-00002-4>
- 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>
- Febrian, D. E. P., Wisaksono, A., Anshory, I., & Jamaaluddin, J. (2025). SISTEM MONITORING GAS DAN SUHU PADA BIOGAS DIGESTER UNTUK MENINGKATKAN KINERJA KOMPOR. *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, 13(2), 122–129.
- 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.foodeng.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>
- Phalah, S. M., Wisaksono, A., Saputra, D. H. R., & Falah, A. H. (2025). RANCANG BANGUN SISTEM KUNCI MOBIL DAN MONITORING MENGGUNAKAN ESP8266. *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, 13(2), 116–121.
- 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>
- Rifandi, A., Sulistiyowati, I., Ahfas, A., & Jamaaluddin, J. (2025). CORN SEED DRYER UTILISING HEATING ELEMENT AND COLOUR DETECTION WITH ESP32-CAM. *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, 13(2), 108–115.
- 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. https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-200217.pdf?%0Ahttp://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-200217.pdf
- WHO. (2007). pH in drinking-water. *Guidelines for drinking water quality*, 2(2), 1–7. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/chemicals/ph_revised_2007_clean_version.pdf
- 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>