

# Perancangan Sistem *Backwash* Otomatis pada Filter Air Berbasis Kendali Logika Fuzzy

## Design of an Automatic Backwash System for a Water Filter Based on Fuzzy Logic Control

Sarmayanta Sembiring<sup>\*.1</sup>, Kemahyanto Exaudi<sup>2</sup>, Abdurahman<sup>3</sup>, Jorena<sup>4</sup>

<sup>1,2</sup>*Program Studi Teknik Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya  
Jl. Srijaya Negara Bukit Besar Palembang*

<sup>3</sup>*Jurusan Sistem Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Sriwijaya  
Jalan Palembang-Prabumulih KM 32 Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan*

<sup>4</sup>*Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya  
Jalan Palembang-Prabumulih KM 32 Indralaya, Kabupaten Ogan Ilir, Sumatera Selatan*

<sup>\*.1</sup>Corresponding author: [yanta@unsri.ac.id](mailto:yanta@unsri.ac.id)

[kemahyanto@ilkom.unsri.ac.id](mailto:kemahyanto@ilkom.unsri.ac.id), [abdurahmanfaqod@gmail.com](mailto:abdurahmanfaqod@gmail.com), [jorena@mipa.unsri.ac.id](mailto:jorena@mipa.unsri.ac.id)

Received on 07-12-2025, accepted on 22-04-2026, published on 31-07-2026

### Abstrak

Kualitas air permukaan terus menurun akibat meningkatnya polutan antropogenik, sehingga diperlukan sistem filtrasi yang andal dan efisien. Sistem filtrasi granular umumnya mengalami penurunan kinerja akibat akumulasi padatan yang meningkatkan tekanan diferensial, sehingga proses *backwash* menjadi kebutuhan operasional penting. Namun, *backwash* manual cenderung tidak optimal, boros air, dan tidak adaptif terhadap fluktuasi kondisi hidrolik, khususnya tekanan *inlet*. Penelitian ini merancang sistem filtrasi granular dengan mekanisme *backwash* otomatis berbasis tekanan diferensial dan debit aliran, yang dilengkapi dengan normalisasi data untuk mereduksi pengaruh fluktuasi tekanan *inlet* akibat operasi pompa serta kendali logika fuzzy untuk memprediksi volume air *backwash* secara adaptif. Sistem diuji menggunakan dua sensor tekanan Gravity SEN0257 dan satu sensor debit YF-S201, dengan *error* rata-rata masing-masing sebesar 1,43% dan 0,92% untuk sensor tekanan serta 1,22% untuk sensor debit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa normalisasi data menurunkan variabilitas tekanan diferensial dan debit, sehingga parameter ternormalisasi lebih representatif dalam mendeteksi *fouling*. Secara keseluruhan, sistem mampu mendeteksi kondisi filter kotor dengan tingkat keberhasilan 84,62%, dan perhitungan volume air *backwash* berbasis logika fuzzy menghasilkan *error* sebesar 0,04% dibandingkan perhitungan manual. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem *backwash* otomatis yang diusulkan efektif, adaptif, dan lebih efisien dalam penggunaan air.

**Kata kunci:** Backwash otomatis, tekanan diferensial, debit aliran, sensor tekanan Gravity SEN0257, sensor debit YF-S201

### Abstract

Surface water quality continues to decline due to increasing anthropogenic pollutants, requiring a reliable and efficient filtration system. Granular filtration systems generally experience a decline in performance due to the accumulation of solids that increase differential pressure, making the backwash process an important operational requirement. However, manual backwashing tends to be suboptimal, wasteful of water, and not adaptive to fluctuations in hydraulic conditions, particularly inlet pressure. This study designed a granular filtration system with an automatic backwash mechanism based on differential pressure and flow rate, equipped with data normalization to reduce the effect of inlet pressure fluctuations caused by pump operation, as well as fuzzy logic control to adaptively predict the backwash water volume. The system was tested using two Gravity

SEN0257 pressure sensors and one YF-S201 flow sensor, with average errors of 1.43% and 0.92% for the pressure sensors and 1.22% for the flow sensor. Test results show that data normalization reduces the variability of differential pressure and flow rate, making the normalized parameters more representative in detecting fouling. Overall, the system is able to detect dirty filter conditions with a success rate of 84.62%, and the fuzzy logic-based backwash water volume calculation produces an error of 0.04% compared to manual calculations. These results indicate that the proposed automatic backwash system is effective, adaptive, and more efficient in water usage.

**Keywords:** Automatic backwash, differential pressure, flow rate, pressure sensor SEN0257, YF-S201 flow rate sensor

## I. PENDAHULUAN

Urbanisasi dan aktivitas antropogenik di daerah tangkapan air meningkatkan masuknya berbagai polutan, seperti kontaminan kimia, kontaminan mikroba, penanda aktivitas manusia, patogen bakteri, dan mikroplastik, ke dalam badan sungai sehingga menurunkan kualitas lingkungan perairan dan berpotensi menimbulkan risiko kesehatan masyarakat [1],[2]. Partikel padat tersuspensi merupakan kontaminan umum yang menurunkan kualitas air dan memiliki karakteristik yang bervariasi, termasuk ukuran, sifat, serta muatan permukaan [3]. Filtrasi menjadi metode yang efektif untuk menghilangkan partikel tersebut. Pada instalasi pengolahan air, sistem filtrasi granular, baik lapisan tunggal, ganda, maupun multilapis, menggunakan media seperti pasir silika, antrasit, dan karbon aktif granular untuk menyisihkan kekeruhan serta bahan organik alami melalui mekanisme fisik dan biologis [4]. Akumulasi partikel padat pada media filtrasi menyebabkan penurunan kinerja filter, yang ditunjukkan oleh peningkatan tekanan diferensial (*head loss*) selama proses operasi [5],[6].

Dalam sistem filtrasi granular, tabung atau kolom berfungsi sebagai wadah media dan dapat dibuat dari berbagai material sesuai kebutuhan operasional. Pada unit bertekanan, produsen filter menyatakan bahwa tabung umumnya menggunakan material stainless steel, FRP, atau mild steel [7]. Untuk skala laboratorium, kolom filtrasi lebih banyak menggunakan pipa PVC karena sifatnya yang ringan, kuat, tahan lama, mudah dipasang, dan ekonomis [8]. Konfigurasi filtrasi dengan aliran *downflow* maupun *upflow* telah diterapkan secara luas pada unit pengolahan berskala kecil. Meskipun demikian, kedua pendekatan tersebut masih memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut guna meningkatkan kinerjanya [9]. Studi menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan kedua sistem relatif serupa, namun filter *down flow* cenderung mengalami peningkatan *head loss* lebih cepat sehingga waktu operasi lebih pendek [10]. Sebaliknya, konfigurasi *upflow* diketahui dapat mengurangi bio-clogging dan menurunkan kebutuhan pemeliharaan [11]. Pada proses pembersihan media, efektivitas *backwash* menjadi faktor penting, meskipun informasi mengenai distribusi efisiensi penghilangan padatan sepanjang kedalaman media masih terbatas [12]. Untuk menjaga efisiensi penyaringan, proses *backwash* dilakukan dengan mengalirkan air secara terbalik untuk memfluidisasi media dan melepaskan partikel yang menumpuk [5]. Efektivitas pembersihan sangat dipengaruhi oleh kondisi hidrodinamika, termasuk distribusi padatan pada berbagai kedalaman media. Selain itu, operasi pada kecepatan *backwash* yang lebih tinggi dapat meningkatkan gaya hidrodinamis yang membantu melepaskan partikel dari media [12].

Filter air dengan *backwash* manual memiliki sejumlah keterbatasan operasional. *Backwash* yang tidak mencapai laju optimal dapat menyebabkan pencucian media tidak efektif dan memicu peningkatan *head loss* yang sulit dipulihkan [13]. Selain itu, proses *backwash* umumnya menghasilkan volume air buangan yang cukup besar, sehingga dapat menimbulkan pemborosan apabila tidak disertai mekanisme pemanfaatan kembali [14]. Efisiensi penghilangan padatan selama *backwash* juga tidak selalu merata di seluruh kedalaman media, dipengaruhi oleh kecepatan operasi dan karakteristik partikel, yang berpotensi menurunkan kapasitas filtrasi secara bertahap [12]. Ketidakefektifan *backwash* manual, mulai dari laju pencucian yang tidak optimal hingga tingginya air buangan dan ketidakmerataan pembersihan media, menyebabkan kenaikan *head loss* serta penurunan kinerja filtrasi, sehingga mendorong perlunya perancangan sistem *backwash* otomatis pada filter air. Banyak penelitian terdahulu yang membahas terkait permasalahan ini, [15] penentuan waktu pelaksanaan *backwash* pada filter dikendalikan melalui sistem logika fuzzy yang memproses masukan crisp berupa parameter kekeruhan (*turbidity*), *Total Dissolved Solids* (TDS), serta debit aliran. Peneliti [16] merancang suatu sistem filtrasi air dengan mekanisme *backwash* otomatis yang dikendalikan menggunakan mikrokontroler Arduino, di mana proses pembilasan diatur melalui aktuasi katup solenoid dan keseluruhan operasi dipantau serta dikendalikan melalui antarmuka *Human Machine Interface* (HMI) berdasarkan pembacaan sensor level dan sensor kekeruhan. Peneliti [17] Sistem filtrasi air tanah berbasis *Internet of Things* (IoT) diimplementasikan dengan integrasi

mekanisme *backwash* dan *rinsing*. Proses *backwash* dikontrol oleh lima katup solenoid yang dioperasikan melalui mikrokontroler dan diinisiasi ketika terdeteksi peningkatan tekanan pada sisi *inlet* atau penurunan tekanan pada sisi *outlet* sebagai indikator terjadinya penyumbatan media filtrasi. Selain itu, sistem memungkinkan pemicu *backwash* secara remote melalui aplikasi Blynk, sementara sensor tekanan dan sensor kekeruhan menyediakan umpan balik secara *real-time* untuk memverifikasi efektivitas proses pembersihan media filter.

Penelitian [15] dan [17] telah menerapkan *backwash* otomatis, namun belum mempertimbangkan pengaruh variasi tekanan *inlet* serta belum mengakomodasi perhitungan volume air *backwash* yang bersifat adaptif terhadap kondisi hidraulik aktual. Berdasarkan dari keterbatasan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang sistem filtrasi yang mampu melakukan proses *backwash* secara otomatis berdasarkan parameter tekanan diferensial dan debit aliran untuk filter air granular berbahan PVC dengan arah aliran *upflow* saat filtrasi dan *downflow* saat *backwash*. Sistem ini dilengkapi dengan mekanisme normalisasi data untuk mereduksi dampak fluktuasi tekanan *inlet* filter akibat operasi pompa air, sehingga dapat meminimalkan terjadinya *backwash* palsu (*false positive backwash*). Selain itu, penelitian ini juga mengembangkan model prediksi kebutuhan volume air *backwash* menggunakan kendali logika fuzzy dengan *crisp input* tekanan diferensial dan debit aliran. Pendekatan logika fuzzy digunakan karena kemampuannya untuk menangani ketidakpastian dan *non-linearitas* [18] dalam sistem hidraulik, serta untuk menghasilkan pengaturan volume *backwash* yang adaptif dan efisien sesuai dengan kondisi operasional nyata.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian [15] dengan pemanfaatan platform IoT, penelitian ini merancang sebuah sistem filtrasi air otomatis berbasis mikrokontroler (ESP32/NodeMCU) yang terintegrasi dengan sensor kekeruhan, sensor TDS, serta aktuator berupa pompa atau katup solenoid. Sistem ini menerapkan metode logika fuzzy untuk menentukan tingkat kekotoran filter dan memutuskan waktu yang tepat untuk melakukan proses *backwash*, sekaligus mengirimkan parameter kualitas air secara *real-time* ke platform IoT untuk keperluan pemantauan. Pendekatan tersebut bertujuan meningkatkan efisiensi proses filtrasi dan menghasilkan mekanisme *backwash* otomatis yang mampu menampilkan perubahan kondisi air sebelum dan sesudah filtrasi secara akurat pada dashboard IoT. Penelitian [19] mengembangkan sistem pemantauan kualitas air yang memanfaatkan sensor pH, kekeruhan, dan suhu yang dikendalikan oleh mikrokontroler NodeMCU serta terhubung ke platform IoT, di mana metode *fuzzy logic* diterapkan untuk mengotomatisasi proses filtrasi guna meningkatkan ketepatan pemantauan dan efektivitas pengambilan keputusan, sehingga sistem mampu mengidentifikasi kondisi kualitas air secara *real-time* dan menjalankan tindakan kontrol, termasuk pembersihan maupun filtrasi, sesuai parameter yang terdeteksi. Penelitian [16] mengembangkan sistem filtrasi air yang memanfaatkan sensor ultrasonik untuk memonitor ketinggian air pada tandon serta sensor kekeruhan untuk menilai kualitas air, dimana seluruh proses pengendalian pompa dan katup solenoid diintegrasikan melalui antarmuka HMI sehingga filtrasi dan *backwash* dapat berjalan secara otomatis maupun manual, dengan tujuan meningkatkan efisiensi operasional dan menurunkan tingkat kekeruhan air. Penelitian [20] mengembangkan suatu sistem filtrasi air otomatis pada Mesjid Al-Bayaan berbasis mikrokontroler, yang memanfaatkan media filtrasi berupa pasir silika, zeolit, dan karbon aktif serta sensor pH dan sensor kekeruhan yang ditampilkan melalui LCD, menerapkan mekanisme kendali otomatis untuk memastikan kualitas air sumur memenuhi standar yang ditetapkan, dan menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu meminimalkan intervensi manual sekaligus menyediakan keluaran air bersih dengan kualitas yang terukur secara lebih akurat. Penelitian [17] memanfaatkan dua sensor tekanan pada sisi *inlet* dan *outlet*, satu sensor kekeruhan, serta lima katup solenoid yang dikendalikan melalui mikrokontroler NodeMCU ESP32 dan terhubung dengan platform Blynk IoT untuk memungkinkan pemantauan serta pengendalian proses filtrasi, *backwash*, dan *rinsing* secara *real-time*, dengan tujuan mendeteksi indikasi penyumbatan filter secara otomatis dan mempertahankan kualitas air sumur, dan hasil pengujian menunjukkan bahwa proses *backwash* dan *rinsing* teraktivasi ketika tekanan *inlet* meningkat sebesar 24–45% dan tekanan *outlet* menurun 37–72%, sementara tingkat kekeruhan air hasil filtrasi tetap stabil pada rentang rendah 0,14–0,19 NTU. Penelitian [21] berfokus pada pengembangan model prediksi kebutuhan *backwashing* pada screen filter irigasi melalui perancangan sistem hidrolik terintegrasi yang memonitor tekanan *inlet* serta parameter kualitas air secara *real-time* menggunakan sensor pH, kekeruhan, TDS, dan suhu. Proses *backwashing* ditetapkan aktif ketika terjadi peningkatan tekanan sebesar 6 mH<sub>2</sub>O dari kondisi awal pada rentang debit 1.5–3.0 m<sup>3</sup>/jam. Data pengujian selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan *Artificial Neural Network* tipe Multilayer Perceptron (MLP), dan hasil pemodelan menunjukkan bahwa arsitektur 2-4-1 memiliki kemampuan terbaik dalam merepresentasikan kenaikan tekanan dan

memperkirakan waktu *backwashing* secara akurat ( $R^2 > 0.80$ ). Sebaliknya, model yang memasukkan variabel kualitas air menghasilkan performa yang rendah, sehingga penelitian ini menegaskan bahwa parameter tekanan merupakan indikator paling signifikan dalam menentukan kebutuhan *backwash*, sementara parameter kualitas air kurang efektif sebagai prediktor pada konfigurasi filtrasi yang diuji.

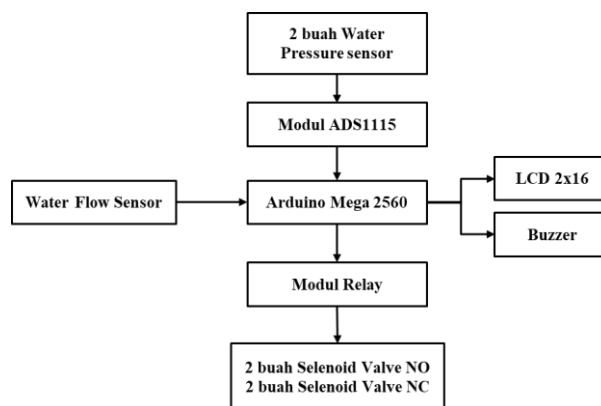
Penelitian [15] dan [17] telah menerapkan system *backwash* otomatis. Pada penelitian [15] saat *backwash* di tentukan oleh kendali logika fuzzy dengan *crisp input* kekeruhan (*turbidity*), *Total Dissolved Solids* (TDS), serta debit aliran. Sedangkan pada penelitian [17] *backwash* di picu berdasarkan peningkatan tekanan pada sisi *inlet* atau penurunan tekanan pada sisi *outlet*. Pada penelitian [16] *backwash* dapat dilakukan melalui antarmuka HMI. Penggunaan nilai tekanan diferensial seperti peneliti [17] untuk mendeteksi keadaan filter juga diterapkan dalam penelitian ini karena berdasarkan penelitian [21] yang menyatakan parameter yang paling signifikan dalam menentukan *backwash* adalah tekanan. Ketika elemen filter tersumbat, perbedaan tekanan terbentuk antara katup *inlet* dan katup *outlet* [22]. Dengan demikian, perbedaan tekanan merupakan parameter yang efektif untuk menentukan kebutuhan pembersihan filter. Ketika diferensial tekanan mencapai nilai ambang yang telah ditetapkan, sistem *backwashing* otomatis akan aktif sehingga proses pembersihan harus dilakukan guna mencegah deformasi, kerusakan, maupun ketidaksempurnaan pembersihan pada elemen screen [23]. Kinerja proses filtrasi dapat dievaluasi dengan memantau secara berkala laju aliran, perkembangan kehilangan tekanan (*head loss*), serta karakteristik kualitas efluen yang dihasilkan [13].

Perbedaan dengan penulis sebelumnya adalah parameter pemicu *backwash* berdasarkan tekanan diferensial dan debit air yang datanya telah di normalisasi. Normalisasi atau standarisasi merupakan proses membandingkan kinerja aktual dengan kinerja acuan dengan memperhitungkan pengaruh parameter operasi yang berubah-ubah. Pada pengujian dengan kondisi operasi yang tidak konstan, langkah normalisasi menjadi esensial untuk mengidentifikasi keberadaan fouling secara tepat serta membedakannya dari kondisi sistem yang masih berada pada keadaan normal [24].

Normalisasi data tekanan dan debit menjadi penting untuk mendapatkan nilai tekanan diferensial yang dapat dibandingkan secara konsisten, karena hubungan antara kehilangan tekanan dan laju aliran fluida bersifat *non linear* pada banyak kondisi operasional. Sebagaimana dijelaskan dalam [25], tekanan diferensial menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap perubahan *superficial velocity*, sehingga tanpa normalisasi, interpretasi performa filtrasi dapat menjadi bias terutama ketika laju aliran berada di luar rentang akurasi model. Selain itu banyaknya volume air yang digunakan untuk *backwash* ditentukan menggunakan kendali logika fuzzy dengan *crisp input* tekanan diferensial dan debit air sehingga system lebih adaptif. Metode inferensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode Takagi-Sugeno-Kang (TSK).

### III. METODE PENELITIAN

Sistem yang dikembangkan pada penelitian ini memanfaatkan dua unit *Gravity Water Pressure Sensor* SKU SEN0257, satu unit *water flow sensor* YF-S201, dua unit solenoid valve 12 V DC tipe *normally closed*, dua unit solenoid valve 12 V DC tipe *normally open*, satu modul relay satu kanal 5 V DC, satu modul *buzzer* 3,3–5 V, satu unit LCD 16 × 2 berbasis I2C, modul ADS1115, dan satu unit mikrokontroler Arduino Mega 2560. Representasi blok sistem secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 1.

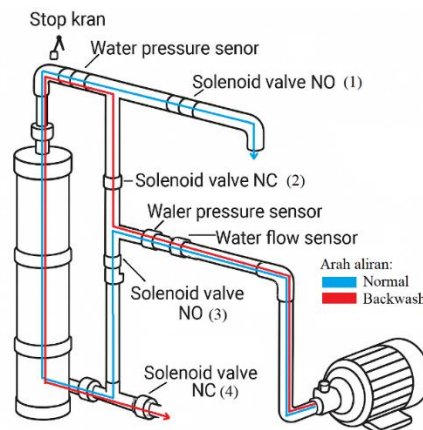


Gambar 1. Blok diagram sistem

Berdasarkan blok diagram Gambar 1 dapat dijelaskan modul ADS1115 berfungsi menerima sinyal tegangan analog yang dihasilkan oleh sensor tekanan air, kemudian mengubahnya menjadi data digital dengan resolusi 16 bit sehingga diperoleh hasil pengukuran tekanan yang lebih presisi. Selanjutnya, data digital tersebut dikirimkan ke Arduino Mega 2560 melalui antarmuka komunikasi I<sup>2</sup>C untuk diproses lebih lanjut menjadi nilai tekanan. Sinyal berupa rangkaian pulsa digital yang di hasilkan Sensor YF-S201 sebagai respons terhadap aliran air yang menyebabkan rotor berputar dan memicu elemen *Hall effect* pada sensor yang terakumulasi dalam suatu interval waktu kemudian diolah oleh sistem untuk dikonversi menjadi nilai debit aliran air. Data sensor berupa tekanan pada sisi *inlet* dan *outlet* serta debit air selanjutnya akan di proses pada mikrokontroler Arduino Mega 2560 sebagai indikator untuk menentukan saat *backwash* dan juga volume air yang dibutuhkan untuk *backwash*. Untuk mengoperasikan mode normal atau *backwash* di atur dengan mengendalikan output 4 buah solenoid *valve* melalui model relay. Selain itu output sistem ini juga menampilkan informasi keadaan filter menggunakan LCD 16x2 dan buzzer sebagai indikator saat proses *backwash* terjadi.

#### A. Perancangan tabung atau kolom filter granular

Kolom filtrasi pada penelitian ini dibuat menggunakan pipa PVC berdiameter 4 inci dengan panjang 70 cm. Media penyaring yang diaplikasikan terdiri atas kerikil, pasir silika, zeolit, mangan, dan karbon aktif dengan perbandingan volume yang sama. Desain kolom filtrasi dapat dilihat pada Gambar 2. Sistem ini dilengkapi dengan empat solenoid *valve* yang terdiri dari dua unit bertipe *normally closed* (solenoid *valve* nomor 2 dan 4) dan dua unit bertipe *normally open* (solenoid *valve* nomor 1 dan 3), di mana seluruh aktuasi *valve* dikendalikan melalui rangkaian relay. Pada saat relay berada dalam kondisi OFF, aliran air bergerak dalam mode operasi normal (digambarkan dengan jalur berwarna biru), sedangkan ketika relay aktif (ON), aliran dialihkan menuju proses *backwash* (digambarkan dengan jalur berwarna merah). Selain itu, keberadaan stop kran pada Gambar 2 berfungsi untuk mensimulasikan kondisi penyumbatan atau penurunan kualitas media filtrasi.



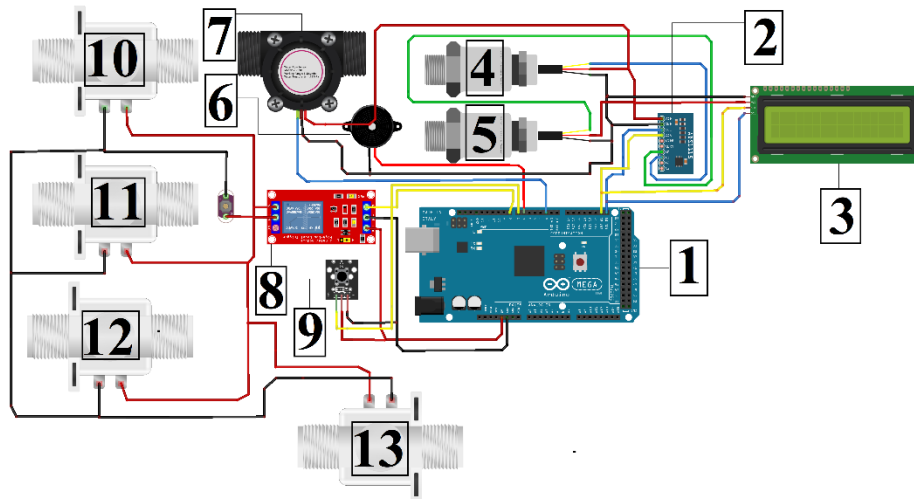
Gambar 2. Perancangan tabung atau kolom filter

#### B. Perancangan rangkaian elektronik

Dalam perancangan sistem ini Arduino Mega 2560 digunakan sebagai pengendali utama. Pemilihan Arduino Mega 2560 didasarkan pada kebutuhan akan jumlah pin input/output yang cukup banyak serta kapabilitasnya dalam menangani perhitungan logika fuzzy secara *real-time*. Selain itu, spesifikasi memorinya yang luas 256 KB flash (termasuk 8 KB untuk bootloader), 8 KB SRAM, dan 4 KB EEPROM memberikan fleksibilitas dalam implementasi algoritma kendali fuzzy dan memungkinkan penambahan fitur sistem tanpa terkendala ruang program.

Dua buah *Gravity Water Pressure Sensor* SKU SEN0257 digunakan untuk mengukur tekanan pada sisi *inlet* dan *outlet* filter, yang selanjutnya diproses melalui modul ADS1115 agar sinyal analog dapat dikonversi menjadi data digital 16-bit dengan tingkat noise rendah sebelum dikirimkan ke Arduino Mega 2560 melalui antarmuka I<sup>2</sup>C. Selain itu, sensor aliran tipe YF-S201 digunakan untuk menghasilkan sinyal pulsa yang dibaca melalui pin interrupt untuk memperoleh estimasi volume air secara akurat selama proses *backwash* dan debit air saat filtrasi sebagai salah satu variabel yang menentukan saat *backwash*. Bagian aktuator terdiri atas empat solenoid *valve* 12 V DC dengan konfigurasi dua *normally open* dan dua

*normally closed*, di mana seluruhnya dikendalikan menggunakan modul relay untuk memungkinkan perpindahan aliran otomatis antara kondisi filtrasi normal dan *backwash*. Sistem juga dilengkapi dengan buzzer sebagai indikator status *backwash* dan LCD 16×2 berbasis I2C untuk menampilkan kondisi operasi secara *real-time*. Integrasi keseluruhan perangkat tersebut memungkinkan sistem menjalankan proses *backwash* secara mandiri berdasarkan kondisi operasional yang terdeteksi serta mendukung penerapan kendali logika fuzzy untuk memutuskan volume air *backwash* secara efektif. Gambar 3 menunjukkan skematik rangkaian keseluruhan.



Gambar 3. Skematik rangkaian keseluruhan

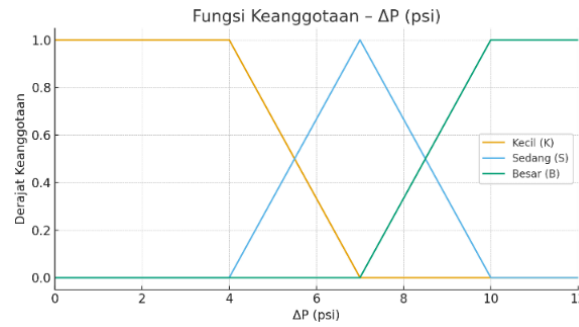
Keterangan Gambar 3:

1. Arduino Mega 2560
2. ADS1115 16 bit I2C ADC 4 Channel
3. LCD Character 16x2
4. Gravity Water Pressure Sensor SKU SEN0257 inlet
5. Gravity Water Pressure Sensor SKU SEN0257 outlet
6. Buzzer module 3,3 V – 5 V
7. Water flow sensor yf-s201
8. Relay modul 1 Channel 5 V DC
9. Push Button
10. Solenoid valve NO (1)
11. Solenoid valve NC (2)
12. Solenoid valve NO (3)
13. solenoid valve NC (4)

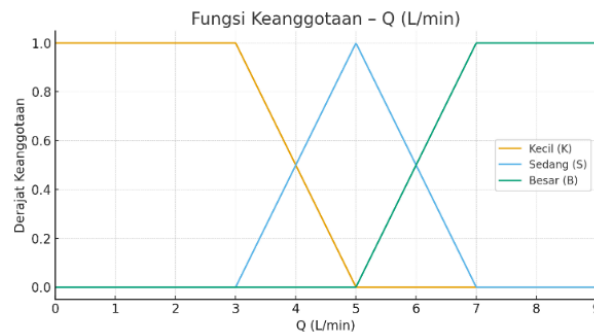
### C. Perancangan sistem kendali logika fuzzy

Kendali logika fuzzy tipe Sugeno orde-nol diterapkan pada penelitian ini untuk menentukan estimasi volume air yang diperlukan dalam satu siklus proses *backwash*. Model fuzzy yang digunakan memanfaatkan dua variabel masukan, yaitu tekanan diferensial ( $\Delta P$ ) dalam satuan psi dan debit aliran air ( $Q$ ) dalam satuan liter per menit (L/min). Sementara itu, variabel keluarannya berupa estimasi volume air yang digunakan sebagai acuan dalam pelaksanaan proses *backwash*.

Variabel  $\Delta P$  dan  $Q$  masing-masing direpresentasikan ke dalam tiga himpunan fuzzy, yaitu Kecil (K), Sedang (S), dan Besar (B). Fungsi keanggotaan yang digunakan terdiri atas bentuk bahu kiri (*left shoulder*), segitiga (*triangular*), dan bahu kanan (*right shoulder*). Grafik fungsi keanggotaan untuk tekanan diferensial ( $\Delta P$ ) ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan grafik fungsi keanggotaan untuk debit aliran air ( $Q$ ) ditampilkan pada Gambar 5.



**Gambar 4.** Grafik fungsi keanggotaan tekanan diferensial ( $\Delta P$ )



**Gambar 5.** Grafik fungsi keanggotaan debit aliran air ( $Q$ )

Basis aturan fuzzy disusun dengan mempertimbangkan keterkaitan antara kondisi tekanan diferensial dan debit aliran air terhadap estimasi volume air yang diperlukan untuk proses *backwash*. Pada penelitian ini, dirumuskan sembilan aturan fuzzy yang ditunjukkan pada Tabel 1. Proses evaluasi setiap aturan dilakukan menggunakan pendekatan inferensi berbasis nilai minimum untuk merepresentasikan hubungan logika AND pada variabel masukan seperti di tunjukkan dalam Persamaan (1). Hasil inferensi tersebut selanjutnya dipetakan ke dalam tiga konsekuen Sugeno orde nol, masing-masing berupa keluaran dengan nilai tetap, yaitu : A = 10.000 mL, B = 15.000 mL, dan C = 20.000 mL.

**Tabel 1.** Aturan fuzzy (*rule base*)

| No | tekanan diferensial ( $\Delta P$ ) | debit aliran air ( $Q$ ) | Output |
|----|------------------------------------|--------------------------|--------|
| 1  | K                                  | K                        | C      |
| 2  | K                                  | S                        | C      |
| 3  | K                                  | B                        | B      |
| 4  | S                                  | K                        | C      |
| 5  | S                                  | S                        | B      |
| 6  | S                                  | B                        | A      |
| 7  | B                                  | K                        | B      |
| 8  | B                                  | S                        | B      |
| 9  | B                                  | B                        | A      |

$$\omega_i = \min(\mu_{\Delta p,j}, \mu_{Q,k}) \quad (1)$$

Pengambilan keputusan dilakukan melalui proses defuzzifikasi menggunakan metode rata-rata terbobot sesuai pendekatan Sugeno orde nol seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$v = \frac{\sum_{i=1}^9 (\omega_i \cdot z_i)}{\sum_{i=1}^9 \omega_i} \quad (2)$$

Dengan  $z_i$  adalah konstanta keluaran (A,B,C).

#### D. Perancangan perangkat lunak

Perangkat lunak pada sistem *backwash* otomatis dirancang untuk memantau kondisi filter air secara *real-time* berdasarkan variabel tekanan diferensial ( $\Delta P$ ) dan debit aliran air ( $Q$ ). Proses pengolahan dimulai dari pembacaan sinyal keluaran dua buah *Gravity Water Pressure Sensor* SKU SEN0257 pada sisi *inlet* dan *outlet*, serta sensor aliran YF-S201. Sinyal tegangan kedua sensor tekanan diakuisisi menggunakan modul ADS1115 dengan resolusi ADC 16-bit sehingga diperoleh tegangan terukur masing-masing V1 dan V2. Tegangan tersebut dikoreksi menggunakan nilai offset yang tersimpan dalam EEPROM (Voffset1 dan Voffset2) untuk menghasilkan nilai tekanan *inlet* (P2) dan *outlet* (P1). Persamaan konversi tegangan ke tekanan ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$P = \frac{V - V_{Offset}}{V_{max} - V_{Offset}} \times P_{max} \quad (3)$$

Dimana  $P_{max}$  *Gravity Water Pressure Sensor* SKU SEN0257 adalah 1,6 MPA (232,06 psi) dan  $P_{max} = 4,5$  volt, sehingga perangkat lunak mampu mengubah sinyal tegangan ke dalam domain tekanan fisik. Sedangkan debit air dihitung dari jumlah pulsa sensor YF-S201 dalam selang waktu satu detik. Nilai debit sesaat ini disimpan sebagai variabel flowrate ( $Q$ ), kemudian dibatasi dengan nilai maksimum FlowCap, sehingga sistem tetap beroperasi dalam rentang desain. Untuk meningkatkan akurasi perhitungan, perangkat lunak tidak langsung menggunakan nilai sesaat, tetapi terlebih dahulu melakukan perataan (*averaging*). Variabel rata-rata  $\Delta P$  (sumP1 dan sumP2), dan nilai flowrate ( $Q$ ) dijumlahkan secara berkala, kemudian dihitung nilai rata-rata setiap 10 detik (sumFlow). Nilai rata-rata tersebut digunakan sebagai parameter input fuzzy, berupa selisih tekanan ( $\Delta P$ ) dan debit air ( $Q$ ) untuk memprediksi volume air yang paling efisien saat *backwash*. Persamaan  $\Delta P$  ditunjukkan pada Persamaan (4).

$$\Delta P = P_{inlet} - P_{outlet} \quad (4)$$

Tahap berikutnya adalah melakukan normalisasi nilai ( $\Delta P$ ) dan ( $Q$ ) terhadap ( $P_2$ ) sebagai nilai dasar operasi sistem. Normalisasi dilakukan untuk mengurangi pengaruh fluktuasi tekanan yang di hasilkan pompa air pada sisi ( $P_2$ ) filter. Formulasi normalisasi ditunjukkan pada Persamaan (5) dan (6).

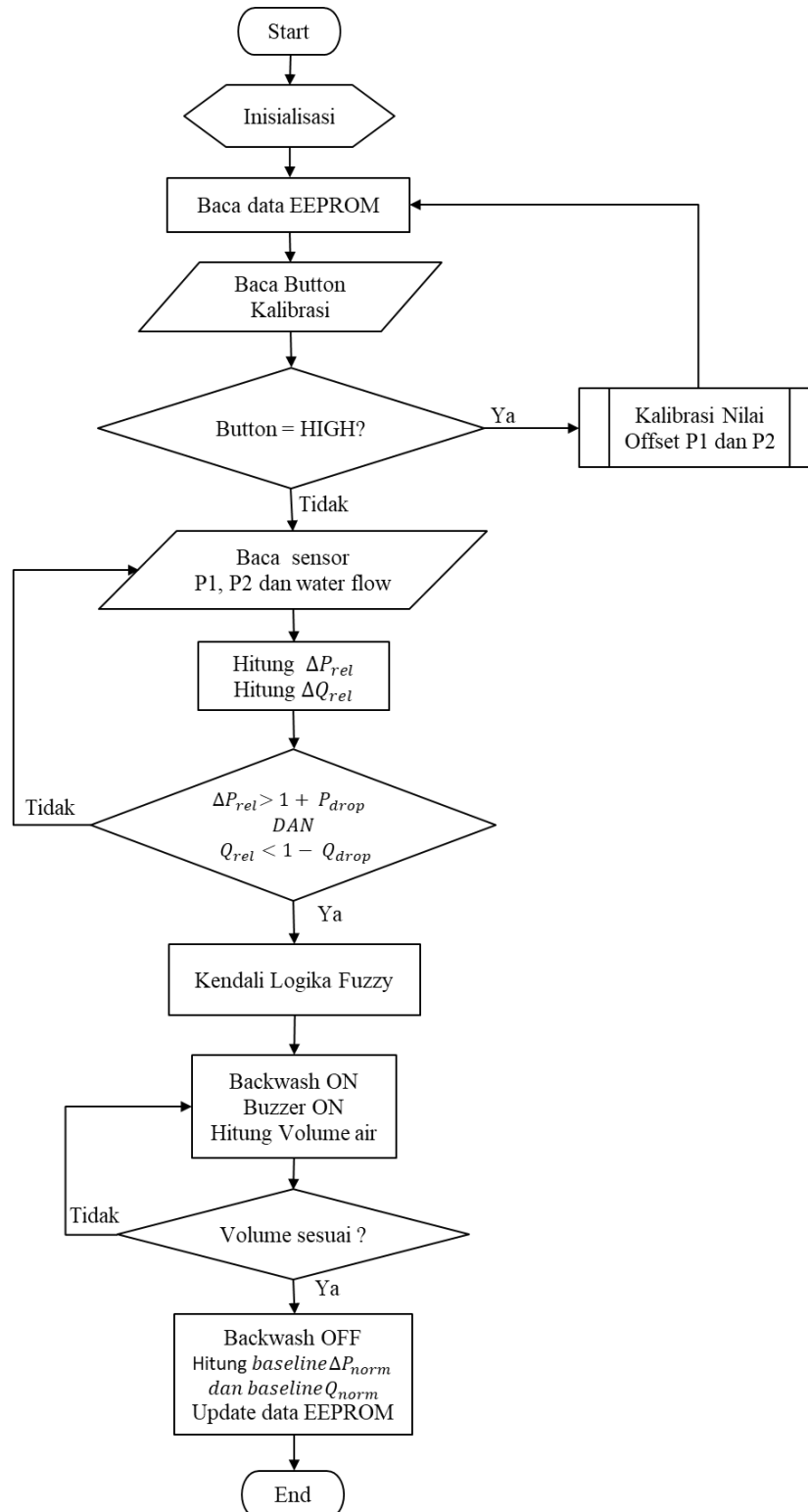
$$\Delta P_{norm} = \frac{\Delta P}{P_{inlet}} \quad (5)$$

$$Q_{norm} = \frac{Q}{P_{inlet}} \quad (6)$$

Nilai dasar baseline ( $baseline\Delta P_{norm}$  dan  $baselineQ_{norm}$ ) yang disimpan dalam EEPROM dihitung menggunakan Persamaan (5) dan (6) saat filter dalam keadaan bersih. Selanjutnya proses *backwash* dilakukan saat kondisi Persamaan (7) terpenuhi :

$$\Delta P_{rel} > 1 + P_{drop} \text{ DAN } Q_{rel} < 1 - Q_{drop} \quad (7)$$

dengan  $\Delta P_{rel}$  dan  $Q_{rel}$  merupakan nilai relative yang di definisikan sebagai rasio  $\Delta P_{norm}$  dan  $Q_{norm}$  terhadap nilai baseline ( $baseline\Delta P_{norm}$  dan  $baselineQ_{norm}$ ).  $P_{drop}$  dan  $Q_{drop}$  merupakan nilai set point yang diberikan. Saat kondisi persamaan (7) terpenuhi system kendali fuzzy akan memprediksi volume air yang efisien digunakan dalam *backwash*, dan setelah proses *backwash* selesai dilakukan maka system akan melakukan update nilai  $baseline\Delta P_{norm}$  dan  $baselineQ_{norm}$  pada EEPROM. Flowchart keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 6.



**Gambar 6.** Flowchart keseluruhan

#### IV. HASIL DAN ANALISIS

Telah dirancang sistem *backwash* otomatis pada filter air berbahan PVC berbasis kendali logika fuzzy. Hasil Implementasi mulai dari perancangan tabung/kolom dengan bahan PVC, rangkaian elektronik, perancangan kendali logika fuzzy dan perancangan perangkat lunak ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7.** Filter air dengan system *backwash* otomatis

Untuk memastikan sensor dapat mendeteksi tekanan dan debit aliran dengan baik, maka dilakukan pengujian *Gravity Water Pressure Sensor* SKU SEN0257 dengan membandingkan hasil yang diperoleh sensor dengan *pressure gauge*. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Pengujian sensor tekanan

| No        | Pressure gauge (psi) | Sensor 1 (psi) | Sensor 2 (psi) | Error sensor 1 (%) | Error sensor 2 (%) |
|-----------|----------------------|----------------|----------------|--------------------|--------------------|
| 1         | 15,5                 | 15,836         | 15,443         | 2,17%              | 0,37%              |
| 2         | 10                   | 9,925          | 9,851          | 0,75%              | 1,49%              |
| 3         | 17,5                 | 17,731         | 17,44          | 1,32%              | 0,34%              |
| 4         | 25                   | 25,494         | 25,213         | 1,98%              | 0,85%              |
| 5         | 32,5                 | 32,791         | 32,349         | 0,90%              | 0,46%              |
| 6         | 8                    | 8,268          | 8,21           | 3,35%              | 2,63%              |
| 7         | 14,5                 | 14,656         | 14,515         | 1,08%              | 0,10%              |
| 8         | 18,5                 | 18,424         | 18,207         | 0,41%              | 1,58%              |
| 9         | 23                   | 23,404         | 23,151         | 1,76%              | 0,66%              |
| 10        | 31,5                 | 31,676         | 31,27          | 0,56%              | 0,73%              |
| Rata-rata |                      |                |                | 1,43%              | 0,92%              |

Hasil pengujian yang ditunjukkan pada Tabel 2 kedua sensor tekanan dibandingkan dengan *pressure gauge* menunjukkan sensor telah berjalan dengan baik dengan *error* rata-rata 1,43% untuk sensor 1 dan 0,92% untuk sensor ke 2.

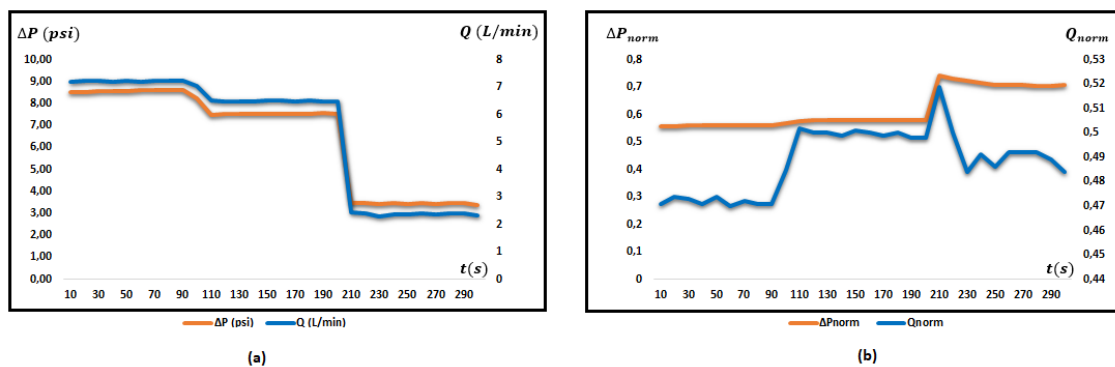
Untuk memastikan *water flow sensor* yf-s201 dapat mendeteksi debit dengan akurat, maka dilakukan pengujian untuk memastikan nilai *calibration factor* yang digunakan sudah tepat. Pengujian dilakukan dengan cara menghitung jumlah pulsa untuk 1 liter air yang di alirkan lalu mengkonversinya menjadi volume. Nilai *calibration factor* yang digunakan adalah 492 dan hasil pengujian 12 kali volume air 1 liter (telah di ukur dengan gelas ukur) di dapat hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil *Water Flow sensor*

| No              | Sensor (mL) | Error (%) |
|-----------------|-------------|-----------|
| 1               | 1004        | 0,40%     |
| 2               | 988         | 1,20%     |
| 3               | 1002        | 0,20%     |
| 4               | 984         | 1,60%     |
| 5               | 984         | 1,60%     |
| 6               | 976         | 2,40%     |
| 7               | 970         | 3,00%     |
| 8               | 1008        | 0,80%     |
| 9               | 992         | 0,80%     |
| 10              | 996         | 0,40%     |
| 11              | 1008        | 0,80%     |
| 12              | 1014        | 1,40%     |
| Error rata-rata |             | 1,22%     |

Hasil pengujian *water flow sensor* yf-s201 pada Tabel 3 menunjukkan sensor dapat bekerja dengan baik dengan *error* rata-rata sebesar 1,22%.

Untuk memastikan bahwa proses normalisasi terhadap data tekanan diferensial dan debit aliran telah berjalan dengan baik, dilakukan pengujian menggunakan variasi tekanan *inlet* pompa pada kondisi filter yang sama, dengan nilai  $baseline\Delta P_{norm} = 0,538$  dan  $baselineQ_{norm} = 0,362$ . Pengambilan data dilakukan selama 300 detik, dengan skenario pengaturan stop-kran pada *inlet* pompa berupa 100 detik kondisi terbuka penuh, 100 detik tertutup sebagian, dan 100 detik tertutup lebih banyak. Dari pengujian tersebut diperoleh grafik hubungan antara  $\Delta P$  terhadap debit ( $Q$ ) serta grafik hubungan  $\Delta P_{norm}$  terhadap  $Q_{norm}$ , seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Selanjutnya, data pengujian dianalisis menggunakan analisis statistik terhadap variabilitas parameter operasional sebelum dan sesudah normalisasi, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.



**Gambar 8.** Hasil pengujian hubungan tekanan diferensial dan debit aliran  
(a) sebelum normalisasi dan (b) setelah normalisasi.

**Tabel 4.** Ringkasan Parameter Statistik  $\Delta P$ ,  $Q$ ,  $\Delta P_{norm}$ , dan  $Q_{norm}$

| Parameter         | Mean  | Variance | Std Dev | CV%     | Min   | Max   | Range |
|-------------------|-------|----------|---------|---------|-------|-------|-------|
| $\Delta P$        | 6,506 | 5,034    | 2,244   | 34,485% | 3,390 | 8,630 | 5,240 |
| $Q$               | 5,358 | 4,703    | 2,169   | 40,470% | 2,300 | 7,250 | 4,950 |
| $\Delta P_{norm}$ | 0,619 | 0,005    | 0,071   | 11,420% | 0,558 | 0,743 | 0,185 |
| $Q_{norm}$        | 0,489 | 0,000    | 0,013   | 2,669%  | 0,470 | 0,519 | 0,049 |

Berdasarkan analisis statistic Tabel 4, parameter asli  $\Delta P$  dan  $Q$  menunjukkan tingkat variabilitas yang tinggi, masing-masing dengan nilai koefisien variasi (CV) sebesar 34,485% dan 40,470%, yang mengindikasikan bahwa kondisi operasi sistem mengalami fluktuasi signifikan selama pengujian. Rentang nilai yang luas pada kedua parameter tersebut memperkuat adanya ketidakstabilan hidrolis yang dipengaruhi oleh perubahan beban dan karakteristik aliran. Namun, setelah penerapan normalisasi, variabilitas menurun drastis, ditunjukkan oleh penurunan CV  $\Delta P_{norm}$  menjadi 11,420% dan  $Q_{norm}$  menjadi hanya 2,669%. Reduksi variabilitas ini menegaskan bahwa proses normalisasi efektif dalam menghilangkan pengaruh perubahan kondisi operasi, sehingga menghasilkan parameter yang lebih stabil dan reliabel untuk evaluasi performa sistem. Dengan demikian,  $\Delta P_{norm}$  dan terutama  $Q_{norm}$  dapat dianggap sebagai indikator yang lebih representatif dalam mendeteksi perubahan kondisi seperti fouling atau penurunan performa filtrasi.

Pengujian keseluruhan dilakukan untuk memastikan bahwa sistem berfungsi dengan baik dan mampu mendeteksi kondisi filter apakah masih bersih atau sudah mengalami *fouling*, meskipun terjadi perubahan pada tekanan *inlet*. Skenario pengujian diawali dengan membuka kran *inlet* pompa sepenuhnya, kemudian mengatur stop-kran pada Gambar 2 hingga tercapai kondisi *backwash*. Selanjutnya, pengujian diulang pada kondisi yang sama dengan menutup kran *inlet* pompa secara bertahap. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5.

**Tabel 5.** Pengujian system keseluruhan.

| No                              | $P_{inlet}$ | $P_{outlet}$ | $\Delta P$ | $Q$   | Kondisi | Volume (L) | Perhitungan (L) | Error (%) |
|---------------------------------|-------------|--------------|------------|-------|---------|------------|-----------------|-----------|
| 1                               | 16,800      | 2,500        | 14,300     | 5,800 | A       | 13,000     | 13,000          | 0,000     |
| 2                               | 16,060      | 2,410        | 13,650     | 5,590 | A       | 13,520     | 13,525          | 0,000     |
| 3                               | 15,670      | 2,370        | 13,300     | 5,510 | A       | 13,740     | 13,725          | 0,001     |
| 4                               | 12,930      | 1,850        | 11,080     | 4,680 | A       | 15,000     | 15,000          | 0,000     |
| 5                               | 13,210      | 1,920        | 11,290     | 4,610 | A       | 15,000     | 15,000          | 0,000     |
| 6                               | 9,770       | 1,600        | 8,170      | 3,290 | A       | 17,370     | 17,364          | 0,000     |
| 7                               | 7,850       | 1,520        | 6,330      | 2,360 | A       | 20,000     | 20,000          | 0,000     |
| 8                               | 6,010       | 1,450        | 4,560      | 1,480 | A       | 0,000      | 0,000           | 0,000     |
| 9                               | 15,730      | 3,030        | 12,700     | 6,110 | B       | 12,210     | 12,225          | 0,001     |
| 10                              | 15,120      | 2,860        | 12,260     | 5,850 | B       | 12,870     | 12,875          | 0,000     |
| 11                              | 13,750      | 2,530        | 11,220     | 5,460 | B       | 13,840     | 13,850          | 0,001     |
| 12                              | 11,960      | 2,150        | 9,810      | 4,860 | B       | 15,290     | 15,281          | 0,001     |
| 13                              | 7,320       | 1,610        | 5,710      | 4,000 | B       | 0,000      | 0,000           | 0,000     |
| Rata-rata error volume backwash |             |              |            |       |         |            |                 | 0,04%     |

Keterangan :

Kondisi A =  $baseline\Delta P_{norm} = 0,710$  dan  $baselineQ_{norm} = 0,940$

Kondisi B =  $baseline\Delta P_{norm} = 0,640$  dan  $baselineQ_{norm} = 0,490$

$P_{drop} = 0,1$  (10%) dan  $Q_{drop} = 0,1$  (10%)

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, sistem berhasil mendeteksi 11 kondisi filter kotor meskipun terjadi variasi tekanan *inlet*. Namun, pada percobaan nomor 8 dan 13, sistem tidak mendeteksi kondisi kotor dan tidak melakukan *backwash*, ditunjukkan oleh volume *backwash* yang bernilai 0.

Pada percobaan nomor 8, diperoleh  $\Delta P_{rel} = 1,066$  dan  $Q_{rel} = 0,262$  Berdasarkan Persamaan (7), syarat  $\Delta P_{rel} > 1 + P_{drop}$  tidak terpenuhi, sementara  $Q_{rel} < 1 - Q_{drop}$  terpenuhi. Karena sistem menggunakan logika AND, kondisi ini diklasifikasikan sebagai normal.

Pada percobaan nomor 13, nilai  $\Delta P_{rel} = 1,219$  terpenuhi terhadap batas kenaikan tekanan tetapi  $Q_{rel} = 1,115$  tidak memenuhi syarat penurunan debit. Dengan logika AND, kondisi ini juga dianggap normal sehingga *backwash* tidak terjadi.

## V. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang sistem filter air granular berbahan PVC berdiameter 4 inci dengan mekanisme *backwash* otomatis. Sistem melakukan *backwash* secara otomatis ketika kondisi pada Persamaan (7) terpenuhi, dan volume air *backwash* ditentukan melalui kendali logika fuzzy dengan masukan berupa tekanan diferensial dan debit aliran. Pendekatan ini membuat sistem lebih adaptif dalam menentukan volume *backwash* sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan air. Parameter penentu *backwash* dan masukan fuzzy diperoleh dari sensor, yaitu dua buah *Gravity Water Pressure Sensor* SKU SEN0257 dan satu buah *water flow sensor* YF-S201. Hasil pengujian menunjukkan bahwa *Gravity Water Pressure Sensor* memiliki *error* rata-rata sebesar 1,43% dan 0,92% dibandingkan *pressure gauge*, yang mengindikasikan bahwa akurasi cukup baik, sementara YF-S201 menunjukkan *error* rata-rata 1,22%. Untuk mengatasi fluktuasi tekanan *inlet* yang dihasilkan pompa, dilakukan normalisasi terhadap nilai tekanan diferensial ( $\Delta P$ ) dan debit ( $Q$ ) yang dibaca sensor. Analisis statistik menunjukkan bahwa proses normalisasi mampu menurunkan variabilitas  $\Delta P$  dan  $Q$  secara signifikan, sehingga menghasilkan parameter yang lebih stabil dan andal. Dengan demikian,  $\Delta P_{\text{norm}}$  dan terutama  $Q_{\text{norm}}$  dapat digunakan sebagai indikator yang lebih representatif dalam mendeteksi fouling dan penurunan kinerja filtrasi. Hasil pengujian keseluruhan menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kondisi filter kotor pada berbagai variasi tekanan *inlet* dengan tingkat keberhasilan 84,62%, dan perhitungan volume air *backwash* menggunakan kendali logika fuzzy memiliki *error* hanya 0,04% dibandingkan perhitungan manual.

## ACKNOWLEDGMENT

Penulis mengucapkan terimakasih kepada LPPM Universitas Sriwijaya yang telah membantu mendanai penelitian ini dalam Skema Penelitian Dosen Pemula (PDP) Universitas Sriwijaya dengan Nomor Kontrak : 0107.166/UN9/SB3.LPPM.PT/2025

## REFERENCES

- [1] T. Yuan *et al.*, "Urbanization impacts the physicochemical characteristics and abundance of fecal markers and bacterial pathogens in surface water," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 10, pp. 1–19, 2019, doi: 10.3390/ijerph16101739.
- [2] T. Dalu, T. Banda, T. Mutshekwa, L. F. Munyai, and R. N. Cuthbert, "Effects of urbanisation and a wastewater treatment plant on microplastic densities along a subtropical river system," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 28, no. 27, pp. 36102–36111, 2021, doi: 10.1007/s11356-021-13185-1.
- [3] Š. Zezulka, B. Maršálek, E. Maršálová, K. Odehnalová, M. Pavlíková, and A. Lamaczová, "Suspended Particles in Water and Energetically Sustainable Solutions of Their Removal—A Review," *Processes*, vol. 12, no. 12, 2024, doi: 10.3390/pr12122627.
- [4] B. K. Noredinwand, A. Takdastan, R. J. Yengejeh, and F. Ghanbari, "The Efficiency of Multi-Media Filtration in Drinking Water Treatment Plants for the Removal of Natural Organic Matter," *J. Adv. Environ. Heal. Res.*, vol. 9, no. 2, pp. 117–128, 2021, doi: 10.22102/jaehr.2021.277080.1215.
- [5] M. Turan, "Backwashing of granular media filters and membranes for water treatment: a review," *Aqua Water Infrastructure, Ecosyst. Soc.*, vol. 72, no. 3, pp. 274–298, 2023, doi: 10.2166/aqua.2023.207.
- [6] W. Zhang, J. Cai, G. Zhai, L. Song, and M. Lv, "Experimental Study on the Filtration Characteristics and Sediment Distribution Influencing Factors of Sand Media Filters," *Water*, vol. 15, no. 24, p. 4303, Dec. 2023, doi: 10.3390/w15244303.
- [7] PT Delta Puro Indonesia, "Multimedia Filter Air." Accessed: Nov. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.deltapuro.com/2019/11/multimedia-filter-air.html>
- [8] G. Abukhanafer, A. H. Al-Fatlawi, H. H. Joni, and H. M. Salman, "A Laboratory Investigation To Remove The Responsible For Clogging In Filtration Process," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 21, p. 101345, 2021, doi: 10.1016/j.eti.2020.101345.
- [9] Y. Adriati, M. S. Pallu, M. Selintung, and B. Bakri, "Raw water treatment model with combined system of downflow - Upflow filter," *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 69, no. 8, pp. 237–242, 2021, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V69I8P229.
- [10] Á. L. de S. Pereira, C. C. S. Brandão, Y. P. Ginoris, and C. P. P. Alves, "Upflow Direct Filtration and Downflow Direct Filtration: A Comparison with Emphasis on the Removal of Aerobic Spore-Forming Bacteria and Fluorescent Microspheres as Surrogates for Cryptosporidium Oocyst Removal," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 22, 2023, doi: 10.3390/w15224012.
- [11] F. A. Lahin, R. Sarbatly, and C. C. Ken, "Spatial and Temporal Development of Microorganisms and the Effect of Clogging in Up-Flow Sand Filter," *Int. J. Technol.*, vol. 15, no. 4, pp. 870–879, 2024, doi: 10.14716/ijtech.v15i4.6357.
- [12] M. Duran-Ros *et al.*, "Efficiency of Backwashing in Removing Solids from Sand Media Filters for Drip Irrigation Systems," *Agric.*, vol. 14, no. 9, pp. 1–14, 2024, doi: 10.3390/agriculture14091570.
- [13] A. Cescon and J. Q. Jiang, "Filtration process and alternative filter media material in water treatment," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 12, pp. 1–20, 2020, doi: 10.3390/w12123377.
- [14] M. Wolska and H. Urbańska-Kozłowska, "Assessing the Possibilities of Backwash Water Reuse Filters in the Water Treatment System—Case Analysis," *Water (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, 2023, doi: 10.3390/w15132452.
- [15] L. M. Silalahi, A. D. Rochendi, and I. U. V. Simanjuntak, "Perancangan Kendali Filter Air Tanah Berbasis Logika Fuzzy

- dan Pemantauan Kondisinya Menggunakan Platform IoT,” *JTERA (Jurnal Teknol. Rekayasa)*, vol. 8, no. 2, p. 199, 2024, doi: 10.31544/jtera.v8.i2.2023.199-208.
- [16] S. Sarifudin, A. Sumardiono, and G. M. Aji, “Kontrol Dan Monitoring Proses Filtrasi Air Menggunakan HMI,” *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, 2023, [Online]. Available: <https://jurnal.unsil.ac.id/index.php/jeee/article/view/8492/2986>
  - [17] P. A. E-mail, “IoT-Based Real-Time Monitoring and Control of Well Water Filtration,” *Circuit J. Ilm. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 179–187, 2025, doi: <https://doi.org/10.22373/dqdhmc22>.
  - [18] F. Alsaket, M. Kchaw, and A. Al-shammari, “Robust fuzzy control for non-linear systems with uncertainties: A TakagiSugeno model approach,” *Int. J. Adv. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 5, pp. 32–36, 2022, [Online]. Available: <https://www.science-gate.com/IJAAS/Articles/2022/2022-9-5/1021833ijaas202205004.pdf>
  - [19] A. T. Chafa, G. P. Chirinda, and S. Matope, “Design of a real-time water quality monitoring and control system using Internet of Things (IoT),” *Cogent Eng.*, vol. 9, no. 1, p. 2143054, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2143054>.
  - [20] J. Jamaluddin and R. Rusli, “Rancang Bangun Proses Filterisasi Air Otomatis Pada Mesjid Al-Bayaan Berbasis Mikrokontroler,” *J. TEKTRÖ*, vol. 8, no. 2, pp. 164–169, 2024.
  - [21] M. L. V. Passos, A. B. O. de Sousa, A. dos S. Teixeira, and C. W. Oliveira, “Artificial neural networks for predicting backwashing in screen filters for irrigation,” *Rev. Ciência Agronômica*, vol. 55, pp. 1–9, 2024, doi: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20240035>.
  - [22] L. C. Supriya, S. Gayathri, and H. M. Gayitri, “Automatic Back-Wash Filtering System,” *Int. J. Recent Res. Asp.*, 2018.
  - [23] Q. Zong, Z. Liu, H. Liu, and H. Yang, “Backwashing performance of self-cleaning screen filters in drip irrigation systems,” *PLoS One*, vol. 14, no. 12, pp. 1–18, 2019, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226354>.
  - [24] M. Kim, B. Park, Y.-J. Lee, J.-L. Lim, S. Lee, and S. Kim, “Corrected normalized permeate flux for a statistics-based fouling detection method in seawater reverse osmosis process,” *Desalin. Water Treat.*, vol. 57, no. 51, pp. 24574–24582, 2016, doi: 10.1080/19443994.2016.1152646.
  - [25] J. Graciano-Urbe, T. Pujol, J. Puig-Bargués, M. Duran-Ros, G. Arbat, and F. Ramírez de Cartagena, “Assessment of different pressure drop-flow rate equations in a pressurized porous media filter for irrigation systems,” *Water*, vol. 13, no. 16, p. 2179, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/w13162179>.