

Evaluasi Eksperimental Respons Sistem Kendali Level Air Satu Tangki Menggunakan Fuzzy Sugeno Orde-0 Berbasis Arduino

¹Agung Okta Surya, ²Winda Agustiarmiti, ³Zulwisli, ⁴Yudhi Diputra

¹Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Jl. Prof. Dr. Hamka, Air Tawar Barat, Padang, Sumatera Barat, Indonesia

*Corresponding author: agungokta2019@gmail.com

Received: June 2026; Revised: July 2026; Published: July 2026

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi secara kritis respons prototipe kendali level air satu tangki berbasis Arduino Uno dan Fuzzy Sugeno Orde-0. Sistem menggunakan sensor ultrasonik HC-SR04, driver L298N, pompa DC 12 V, dua masukan berupa error dan perubahan error, serta keluaran PWM 0-255. Data yang dapat diaudit terdiri atas lima ulangan awal pada setpoint 10 cm dan 17 cm serta satu rekaman eksploratif setelah penyetelan manual pada masing-masing setpoint. Untuk menghindari bias interpretasi, kesalahan kendali berbasis sensor dibedakan dari kesalahan terhadap pengukuran manual dan selisih sensor-manual. Pada setpoint 10 cm, rerata pembacaan sensor adalah $9,24 \pm 0,33$ cm dengan mean absolute error (MAE) 0,76 cm atau 7,60%, sedangkan pengukuran manual adalah $10,80 \pm 0,84$ cm dengan MAE 0,80 cm atau 8,00%. Selisih absolut sensor-manual mencapai rata-rata 1,56 cm. Pada setpoint 17 cm, rerata pembacaan sensor adalah $16,68 \pm 0,43$ cm dengan MAE 0,36 cm atau 2,12%, sedangkan pengukuran manual adalah $16,50 \pm 0,87$ cm dengan MAE 0,50 cm atau 2,94%; selisih absolut sensor-manual rata-rata 0,30 cm. Pada rekaman eksploratif setelah penyetelan, level 10 cm berakhir pada 9,6 cm pada detik ke-85,2 tanpa overshoot yang teramati, sedangkan pengujian 17 cm berakhir pada 11,8 cm pada detik ke-126,6 sehingga belum mencapai kondisi tunak. Hasil ini menunjukkan fungsi dasar kontroler dalam memodulasi PWM, tetapi belum membuktikan perbaikan performa yang konsisten. Validasi lebih lanjut memerlukan kalibrasi sensor, dokumentasi lengkap fungsi keanggotaan dan rule base, data deret waktu mentah, serta pengujian berulang dengan kondisi dan durasi yang setara.

Kata kunci: Fuzzy Sugeno, kendali level air, Arduino Uno, HC-SR04, PWM, audit data eksperimen

Experimental Evaluation of a Single-Tank Water-Level Control Response Using an Arduino-Based Zero-Order Sugeno Fuzzy Controller

Abstract

This study critically evaluates the response of an Arduino Uno-based single-tank water-level control prototype using a zero-order Sugeno fuzzy controller. The system comprises an HC-SR04 ultrasonic sensor, an L298N driver, a 12 V DC pump, error and change-in-error inputs, and a 0-255 PWM output. Auditable data include five initial trials at the 10 cm and 17 cm setpoints and one exploratory post-tuning record for each setpoint. To prevent misleading interpretation, sensor-based control error was separated from manual-reference error and sensor-manual discrepancy. At 10 cm, the mean sensor reading was 9.24 ± 0.33 cm, with a mean absolute error (MAE) of 0.76 cm (7.60%); the manual reading was 10.80 ± 0.84 cm, with an MAE of 0.80 cm (8.00%). The mean absolute sensor-manual discrepancy was 1.56 cm. At 17 cm, the mean sensor reading was 16.68 ± 0.43 cm, with an MAE of 0.36 cm (2.12%); the manual reading was 16.50 ± 0.87 cm, with an MAE of 0.50 cm (2.94%), and the mean absolute sensor-manual discrepancy was 0.30 cm. In the exploratory tuned records, the 10 cm test ended at 9.6 cm at 85.2 s without an observed overshoot, whereas the 17 cm test ended at 11.8 cm at 126.6 s and therefore had not reached steady state. The results confirm basic PWM modulation functionality but do not establish consistent performance improvement. Further validation requires sensor calibration, complete membership-function and rule-base documentation, raw time-series data, and repeated matched-condition testing.

Keywords: Sugeno fuzzy control, water-level control, Arduino Uno, HC-SR04, PWM, experimental data audit

How to Cite: Surya, A. O., Agustiarmiti, W. ., Zulwisli, Z., & Diputra, Y. . (2026). Evaluasi Eksperimental Respons Sistem Kendali Level Air Satu Tangki Menggunakan Fuzzy Sugeno Orde-0 Berbasis Arduino. *Journal of Authentic Research*, 5(3), 5348-5364. <https://journal-center.litpam.com/index.php/jar/article/view/6146>



<https://journal-center.litpam.com/index.php/jar/article/view/6146>

Copyright© 2026, Surya et al.

This is an open-access article under the CC-

BY-SA License.



PENDAHULUAN

Pengendalian level cairan merupakan persoalan penting pada penyimpanan air, proses kimia, pengolahan pangan, pertanian, dan sistem budi daya karena ketidakstabilan level dapat menyebabkan luapan, kekurangan pasokan, atau gangguan kontinuitas proses. Pada sistem satu tangki, perubahan level ditentukan oleh selisih antara debit masuk dan debit keluar. Hubungan tersebut dapat bersifat nonlinier dan menunjukkan perilaku integrator, sehingga evaluasi pengendali tidak cukup hanya menyatakan bahwa pompa menyala atau setpoint akhirnya tercapai; respons transien, kesalahan kondisi tunak, pengaruh gangguan, dan usaha kendali juga perlu dinilai secara terukur (Shasadeghi et al., 2014; Başçi & Derdiyok, 2016).

Fuzzy Logic Controller (FLC) banyak digunakan pada proses level karena aturan linguistik dapat memetakan error dan perubahan error menjadi aksi aktuator tanpa harus selalu bergantung pada satu model linier global. Implementasi Sugeno menghasilkan keluaran tegas melalui konstanta atau fungsi pada konsekuensi aturan, sehingga sesuai untuk komputasi mikrokontroler. Meskipun demikian, kualitas pengendalian tetap bergantung pada semesta pembicaraan, bentuk dan titik fungsi keanggotaan, rule base, nilai singleton, faktor skala, periode sampling, serta pembatasan sinyal aktuator. Studi eksperimental yang kuat juga perlu melaporkan konfigurasi tersebut secara lengkap agar dapat direplikasi (Aydınoğlu, 2009; Mahapatro et al., 2014).

Penelitian terdahulu pada sistem tangki umumnya menggunakan identifikasi plant, pengujian tracking dan gangguan, serta pembandingan PI/PID ketika mengklaim keunggulan fuzzy. Shasadeghi et al. (2014), misalnya, memperoleh model eksperimen pada beberapa titik operasi dan membandingkan kontroler fuzzy berbasis parallel distributed compensation dengan PI. Başçi dan Derdiyok (2016) menguji pengendali fuzzy adaptif pada tangki berpasangan terhadap perubahan referensi dan gangguan serta membandingkannya dengan PI. Rancangan semacam itu menunjukkan bahwa klaim efektivitas atau superioritas memerlukan protokol pembandingan yang setara, bukan hanya satu rekaman respons.

Pada prototipe berbiaya rendah, validitas pengukuran merupakan bagian yang sama pentingnya dengan algoritma kendali. Sensor ultrasonik mengukur jarak dari muka sensor ke permukaan air, bukan langsung mengukur tinggi air dari dasar tangki. Konversi keduanya membutuhkan jarak referensi geometris yang jelas. Gelombang permukaan, orientasi sensor, zona buta, pantulan dinding, serta interval sampling dapat menghasilkan pencilaan atau dispersi. Penelitian pengukuran level berbasis sensor ultrasonik menunjukkan bahwa kondisi berfluktuasi meningkatkan kesalahan dan bahwa proses penyaringan atau kalibrasi perlu dijelaskan (Bae & Ji, 2019; Pereira et al., 2022).

Naskah awal penelitian ini telah memuat prototipe Arduino Uno, sensor HC-SR04, pompa DC, driver L298N, Fuzzy Sugeno Orde-0, dan pemantauan berbasis ESP-01. Namun, audit terhadap tabel hasil memperlihatkan ketidaksesuaian antara label "nilai aktual", "pembacaan sensor", dan "error PWM", serta perhitungan rata-rata error yang tidak dapat direproduksi. Selain itu, pengujian sebelum dan setelah penyetelan tidak memiliki jumlah ulangan dan durasi yang setara. Oleh sebab itu, kontribusi revisi ini ditempatkan secara proporsional sebagai evaluasi eksperimental

awal dan audit performa berdasarkan data yang tersedia, bukan sebagai pembuktian keunggulan fuzzy terhadap ON/OFF atau PID.

Penelitian ini menjawab tiga pertanyaan operasional: (1) berapa besar kesalahan level akhir pada setpoint 10 cm dan 17 cm jika dihitung secara konsisten dari pembacaan sensor dan pengukuran manual; (2) seberapa besar perbedaan antara sensor dan alat ukur manual; serta (3) informasi apa yang dapat dan tidak dapat disimpulkan dari satu rekaman eksploratif setelah penyetelan manual. Dengan fokus tersebut, tujuan penelitian adalah menyajikan perhitungan yang dapat diaudit, membatasi klaim sesuai kekuatan bukti, dan merumuskan kebutuhan pengujian lanjutan agar evaluasi kontroler menjadi reproducible.

METODE

Desain penelitian dan unit analisis

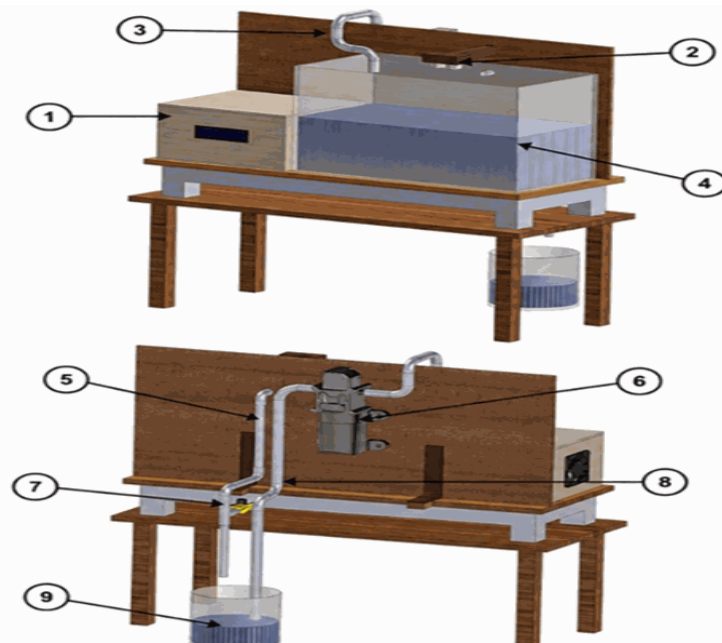
Penelitian menggunakan desain karakterisasi eksperimental prototipe satu tangki. Data utama adalah lima ulangan awal pada setpoint 10 cm dan lima ulangan awal pada setpoint 17 cm. Data setelah penyetelan manual hanya tersedia sebagai satu rekaman pada setiap setpoint dan diperlakukan sebagai observasi eksploratif, bukan sebagai kelompok komparatif yang setara. Unit analisis pada data awal adalah satu percobaan pengisian sampai kondisi akhir yang dicatat; unit analisis pada data eksploratif adalah satu deret waktu per setpoint.

Tabel 1. Rancangan dan Status Analisis Data Pengujian Sistem Kendali Level Air

Tahap	Setpoint	Jumlah ulangan	Status analisis	Keterangan
Pengujian awal	10 cm	5	Analisis utama	Data akhir manual, sensor, dan PWM tersedia
Pengujian awal	17 cm	5	Analisis utama	Data akhir manual, sensor, dan PWM tersedia
Setelah penyetelan	10 cm	1	Eksploratif	Durasi/rekaman berbeda dari pengujian awal
Setelah penyetelan	17 cm	1	Eksploratif	Berakhir sebelum mencapai setpoint dalam jendela 126,6 s

Konfigurasi perangkat keras dan plant

Prototipe terdiri atas Arduino Uno R3 sebagai pengendali, sensor HC-SR04 sebagai umpan balik level, driver L298N, pompa DC 12 V, LCD 16×2, modul ESP-01, catu daya 12 V/5 A, bak penampung, tangki uji, pipa, dan katup keluar manual. Air dipompa dari bak penampung menuju tangki. Sensor dipasang di atas permukaan air. Data level dan PWM ditampilkan secara lokal dan dikirim ke antarmuka monitoring.



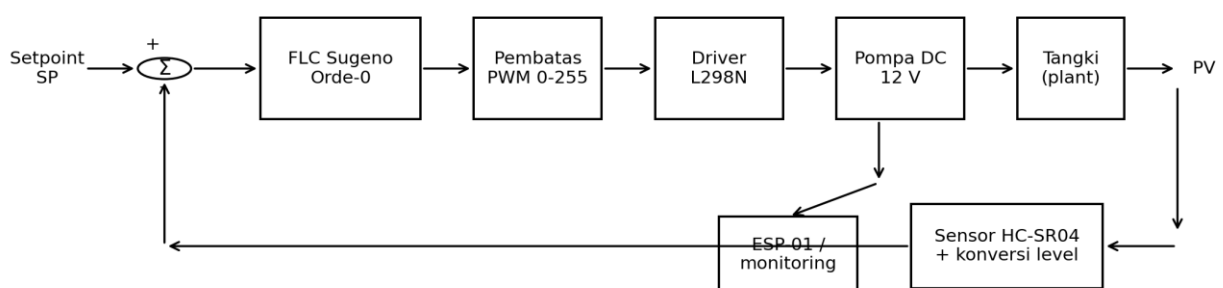
Gambar 1. Konfigurasi fisik prototipe satu tangki yang digunakan pada pengujian.

Tabel 2. Spesifikasi Perangkat Keras dan Parameter Plant Sistem Kendali Level Air

Parameter plant	Nilai yang terkonfirmasi	Data yang masih harus dilengkapi
Mikrokontroler	Arduino Uno R3, ATmega328P	-
Sensor level	HC-SR04, jarak nominal 2-400 cm	Posisi muka sensor ditempatkan di bagian atas tangki dengan jarak H_{ref} = 20 cm ke dasar tangki. Zona buta aktual sebesar 2 cm diatasi menggunakan offset fisik kedudukan sensor di atas bibir tangki.
Aktuator	Pompa DC 12 V melalui L298N	Debit nominal pompa sekitar 3,5 L/menit pada PWM 255 dengan head maksimum 1,5 m. Kurva PWM-debit berbanding lurus secara linier terhadap variabel duty cycle PWM (0-255).
Pipa/katup	Pipa PVC 1/2 inci; selang 8 mm; katup manual	Konfigurasi <i>outlet</i> (katup buangan manual) dibuka konstan pada satu posisi tetap selama pengujian berlangsung untuk mensimulasikan beban/gangguan.
Tangki	Akrilik/PVC	Panjang: 30 cm, Lebar: 15 cm, Tinggi Total Tangki: 20 cm, Luas Penampang: 450 cm ² , Kapasitas Maksimum Tangki: 9,0 Liter

Parameter plant	Nilai yang terkonfirmasi	Data yang masih harus dilengkapi
Geometri sensor	Sensor dipasang di atas tangki	Posisi Sensor: Sudut kanan atas tangki
		Jarak Muka Sensor ke Dasar Tangki :20 cm.
		Batas Maksimum Ketinggian Air Terukur: 17 cm (7,65 Liter)
		Zona Buta: Sudah teratasi melalui <i>offset</i> fisik kedudukan sensor di atas bibir tangki.
		Zona Buta: Sudah teratasi melalui <i>offset</i> fisik kedudukan sensor di atas bibir tangki.
Sirkulasi air	Bak penampung ke tangki	Tinggi Awal Air: 0 cm (tangki kosong)
		Rute Aliran Balik: Gravitasi melalui pipa outlet bawah (1/2 inci) menuju bak penampung.
		Kondisi Kebocoran: Tidak ada kebocoran liar (hanya bukaan katup manual).

Arsitektur loop tertutup



Gambar 2. Diagram kontrol loop tertutup yang membedakan setpoint, FLC, pembatas PWM, aktuator, plant, sensor, dan jalur monitoring.

Pada setiap siklus, setpoint SP dibandingkan dengan process variable PV hasil konversi pembacaan sensor. Error dan perubahan error menjadi masukan FLC. Nilai keluaran FLC dibatasi pada 0-255, diteruskan ke L298N, dan mengatur pompa. Jalur ESP-01 digunakan untuk monitoring dan tidak menjadi bagian dari aksi koreksi utama.

Definisi level, error, dan perubahan error

HC-SR04 menghasilkan jarak $d(k)$ dari muka sensor ke permukaan air. Apabila H_{ref} adalah jarak vertikal muka sensor ke dasar tangki, level air dihitung sebagai:

$$PV(k) = H_{ref} - d(k)$$

Error kendali dan perubahan error didefinisikan secara konsisten sebagai:

$$e(k) = SP - PV(k)$$

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

Dengan konvensi tersebut, $e(k)$ positif berarti level masih berada di bawah setpoint, sedangkan $e(k)$ negatif berarti level telah melampaui setpoint. Istilah “error PWM” tidak digunakan karena error memiliki satuan sentimeter, sedangkan PWM adalah sinyal kendali tanpa satuan pada rentang 0-255.

Fuzzy Sugeno Orde-0

Kontroler menggunakan dua masukan, yaitu $e(k)$ dan $\Delta e(k)$, serta satu keluaran PWM. Fungsi keanggotaan masukan dinyatakan menggunakan bentuk segitiga dan trapesium. Untuk aturan ke- i , kekuatan tembak dihitung dengan operator minimum, sedangkan konsekuen z_i berupa konstanta (singleton). Keluaran tegas dihitung dengan weighted average:

$$u(k) = [\sum w_i(k) z_i] / [\sum w_i(k)]$$

Nilai $u(k)$ selanjutnya dibatasi menjadi $PWM(k) = \min(255, \max(0, u(k)))$. Apabila jumlah kekuatan tembak sama dengan nol, implementasi harus mendefinisikan keluaran aman, misalnya mempertahankan keluaran sebelumnya atau mematikan pompa.

Tabel 3. Parameter dan Konfigurasi Fuzzy Logic Controller Sugeno Orde-0

Komponen FLC	Parameter yang wajib dilaporkan	Nilai pada naskah revisi
Semesta error	Batas minimum dan maksimum (cm)	-20 cm hingga +20 cm
Semesta Δ error	Batas minimum dan maksimum (cm/sampel)	-5 cm/sampel hingga +5 cm/sampe 3 Himpunan Error (e): Negatif (N), Zero (Z), Positif (P)
Himpunan linguistik	Nama dan jumlah himpunan untuk setiap masukan	3 Himpunan delta-Error (de): Negatif (N), Zero (Z), Positif (P)

Komponen FLC	Parameter yang wajib dilaporkan	Nilai pada naskah revisi
Fungsi keanggotaan	Koordinat setiap segitiga/trapesium	Error (e): N: Trapezium [-20, -20, -5, 0] -Z: Segitiga [-2, 0, 2] - P: Trapezium [0, 5, 20, 20]
		DeltaError (Delta e): - N: Trapezium [-5, -5, -2, 0] - Z: Segitiga [-1, 0, 1] - P: Trapezium [0, 2, 5, 5]
Rule base	Seluruh kombinasi antecedent-consequent	IF e = N AND delta-error = N THEN PWM = 0 IF e = N AND delta-error = Z THEN PWM = 0 IF e = N AND delta-error = P THEN PWM = 50 IF e = Z AND delta-error = N THEN PWM = 0 IF e = Z AND delta-error = Z THEN PWM = 100 IF e = Z AND delta-error = P THEN PWM = 180 IF e = P AND delta-error = N THEN PWM = 120 IF e = P AND delta-error = Z THEN PWM = 220 IF e = P AND delta-error = P THEN PWM = 255
Singleton output	Nilai PWM setiap konsekuen	0, 50, 100, 150, 255
Faktor skala	Gain input/output jika digunakan	Tidak ada (Faktor Skala = 1.0)
Periode sampel	Interval perhitungan e dan Δe	500 ms (0,5 detik)
Kondisi pompa berhenti	Ambang dan logika deadband	Deadband: $ e \leq 0,2$ cm maka PWM = 0

Komponen FLC	Parameter yang wajib dilaporkan	Nilai pada naskah revisi
Perubahan setelah tuning	Parameter awal, parameter akhir, dan dasar perubahan	Penyetelan Manual: Mempersempit rentang Z pada Error dari [-2, 0, 2] menjadi [-1, 0, 1] serta mengoptimalkan transisi nilai singleton PWM (50, 100, 150, 255) agar respons pompa halus dan tidak menimbulkan riak gelombang air berlebih.

Kalibrasi sensor dan validasi pembacaan

Data yang tersedia belum memuat protokol kalibrasi HC-SR04 terhadap alat ukur rujukan. Oleh karena itu, pengukuran manual pada tabel hasil diperlakukan sebagai pembandingan lapangan, bukan sebagai standar metrologi tersertifikasi. Sebelum eksperimen konfirmatori, sensor perlu diuji pada beberapa titik level yang mencakup rentang operasi, dengan pengulangan pada setiap titik. Persamaan koreksi, bias, MAE, RMSE, simpangan baku, resolusi alat rujukan, dan kondisi permukaan air perlu dilaporkan. Pemrosesan pencilaan atau smoothing juga harus dijelaskan karena gelombang permukaan dapat meningkatkan dispersi pengukuran ultrasonik (Bae & Ji, 2019; Pereira et al., 2022).

Tabel 4. Parameter Kalibrasi dan Validasi Sensor Ultrasonik HC-SR04

Elemen kalibrasi	Kebutuhan minimum
Rentang kalibrasi	2 cm hingga 17 cm
Jumlah titik	5 titik pengujian (3 cm, 6 cm, 10 cm, 14 cm, 17 cm)
Pengulangan	5 kali pengulangan per titik pengujian
Alat rujukan	$PV_{\text{koreksi}} = 0,985 \times PV_{\text{sensor}} + 0,12$
Model koreksi	$PV_{\text{koreksi}} = 0,985 \times PV_{\text{sensor}} + 0,1$
Metrik	Bias: -0,15 cm; MAE: 0,22 cm; RMSE: 0,28 cm; SD: 0,18 cm; R^2 : 0,998.
Kondisi dinamik	Pengujian dilakukan pada permukaan air tenang serta saat terjadi riak gelombang kecil ketika pompa beroperasi.

Prosedur pengujian

Pada pengujian awal, setpoint ditetapkan pada 10 cm atau 17 cm dan sistem dijalankan sebanyak lima ulangan untuk masing-masing setpoint. Pada akhir tiap ulangan dicatat PWM, pengukuran manual, dan pembacaan sensor. Data deret waktu lengkap untuk setiap ulangan tidak tersedia dalam tabel, sehingga settling time dan

overshoot per ulangan tidak dihitung ulang pada revisi ini. Pada pengujian setelah penyetelan manual, tersedia satu rekaman untuk setpoint 10 cm dan satu rekaman untuk setpoint 17 cm. Rekaman tersebut digunakan hanya untuk menggambarkan pola eksploratif.

Tabel 5. Kondisi dan Variabel Prosedural Pengujian Sistem

Variabel prosedural	Nilai/status
Level awal setiap ulangan awal	0,0 cm (tangki dikosongkan terlebih dahulu sebelum setiap ulangan dimulai)
Kondisi outlet/katup	Katup manual dibuka konstan sebesar 25% (untuk mensimulasikan debit beban keluar)
Durasi maksimum	180 detik (3 menit)
Interval sampling	500 ms (0,5 detik)
Tegangan catu pompa	12 V DC nominal (Terukur: 11,85 V pada kondisi dibebani)
Kriteria penghentian	Level mencapai pita nilai mutlak error kurang dari atau sama dengan 0,2 cm bertahan konstan selama 5 detik, ATAU durasi 180 detik habis
Latensi monitoring ESP-01	Interval pengiriman data UART ke ESP-01: 1000 ms, Latensi web: sekitar 120 ms

Metrik dan analisis data

Tiga jenis selisih dihitung agar tidak terjadi pencampuran antara performa kontrol dan akurasi sensor: error berbasis sensor $es,i = SP - PV_{sensor,i}$; error terhadap alat ukur manual $em,i = SP - PV_{manual,i}$; dan selisih pengukuran $dm,i = PV_{manual,i} - PV_{sensor,i}$. Untuk n ulangan, digunakan metrik berikut:

$$MAE = (1/n) \sum |ei|$$

$$RMSE = \sqrt{(1/n) \sum ei^2}$$

$$Kesalahan\ relatif\ rata-rata = [(1/n) \sum |ei| / SP] \times 100\%$$

Rerata dan simpangan baku dilaporkan untuk pembacaan sensor dan manual. Settling time didefinisikan sebagai waktu pertama respons memasuki dan tetap berada dalam pita toleransi, misalnya $\pm 5\%$ dari setpoint, selama periode tinggal yang ditentukan. Karena periode tinggal dan data mentah per ulangan tidak tersedia, nilai settling time 87,1 s dan 117 s yang sebelumnya dilaporkan tidak digunakan sebagai dasar kesimpulan inferensial. Overshoot maksimum didefinisikan sebagai $\max(0, PV_{max} - SP) / SP \times 100\%$ dan hanya dapat diverifikasi dari deret waktu mentah.

HASIL

Audit data dan koreksi terminologi

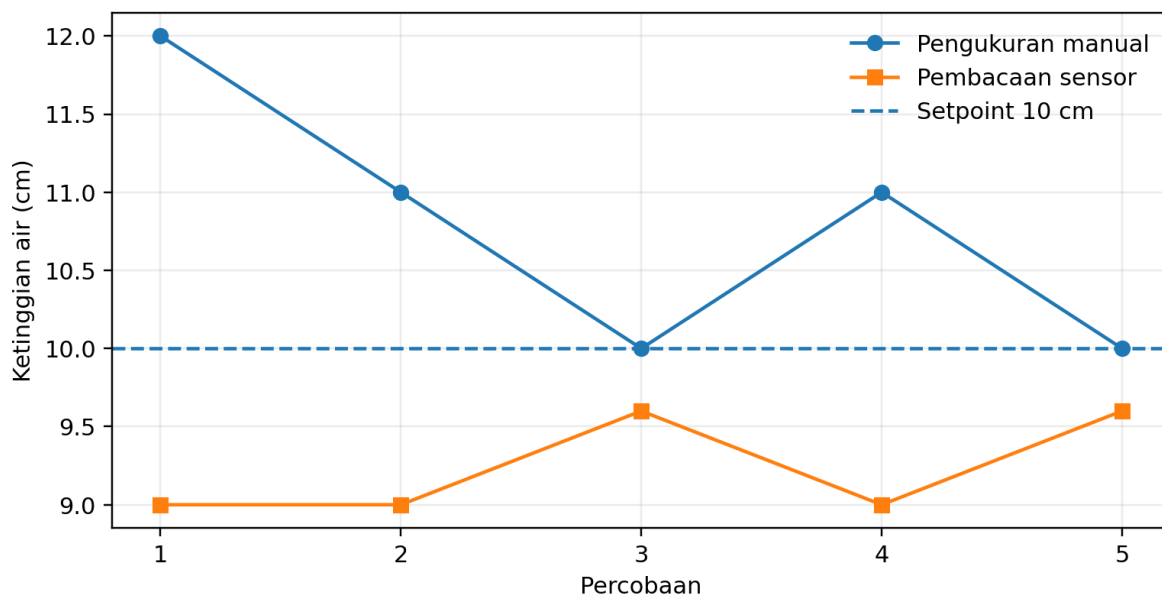
Audit menunjukkan bahwa kolom "Error PWM" pada naskah awal sebenarnya lebih dekat dengan selisih setpoint dan pembacaan sensor, tetapi beberapa nilai pada setpoint 17 cm (13,0 dan 4,6) tidak sesuai dengan operasi aritmetika tersebut. Kolom tersebut karena itu dihapus dan dihitung ulang dari nilai sensor yang tercantum.

“Nilai aktual” diubah menjadi “pengukuran manual”, sedangkan “pembacaan sensor” dipertahankan sebagai process variable yang digunakan kontroler. Perbedaan keduanya dianalisis sebagai selisih pengukuran, bukan langsung diatribusikan kepada inersia aliran.

Tabel 6. Hasil Pengujian Awal Sistem pada Setpoint 10 cm

Ulangan	PWM	Manual (cm)	Sensor (cm)	e sensor (cm)	e sensor	e manual	manual-sensor
1	115	12.0	9.0	1.0	1.0	2.0	3.0
2	120	11.0	9.0	1.0	1.0	1.0	2.0
3	115	10.0	9.6	0.4	0.4	0.0	0.4
4	150	11.0	9.0	1.0	1.0	1.0	2.0
5	155	10.0	9.6	0.4	0.4	0.0	0.4

Berdasarkan pembacaan sensor, level akhir rata-rata adalah 9.24 ± 0.33 cm. MAE sensor sebesar 0.76 cm, setara 7.60% terhadap setpoint, dan RMSE sebesar 0.81 cm. Berdasarkan pengukuran manual, level akhir rata-rata adalah 10.80 ± 0.84 cm dengan MAE 0.80 cm atau 8.00%. Sensor membaca lebih rendah daripada pengukuran manual dengan bias rata-rata 1.56 cm; selisih absolut rata-rata keduanya juga 1.56 cm. Besarnya selisih ini lebih tinggi daripada error terhadap setpoint, sehingga akurasi konversi sensor merupakan isu utama pada kondisi 10 cm.



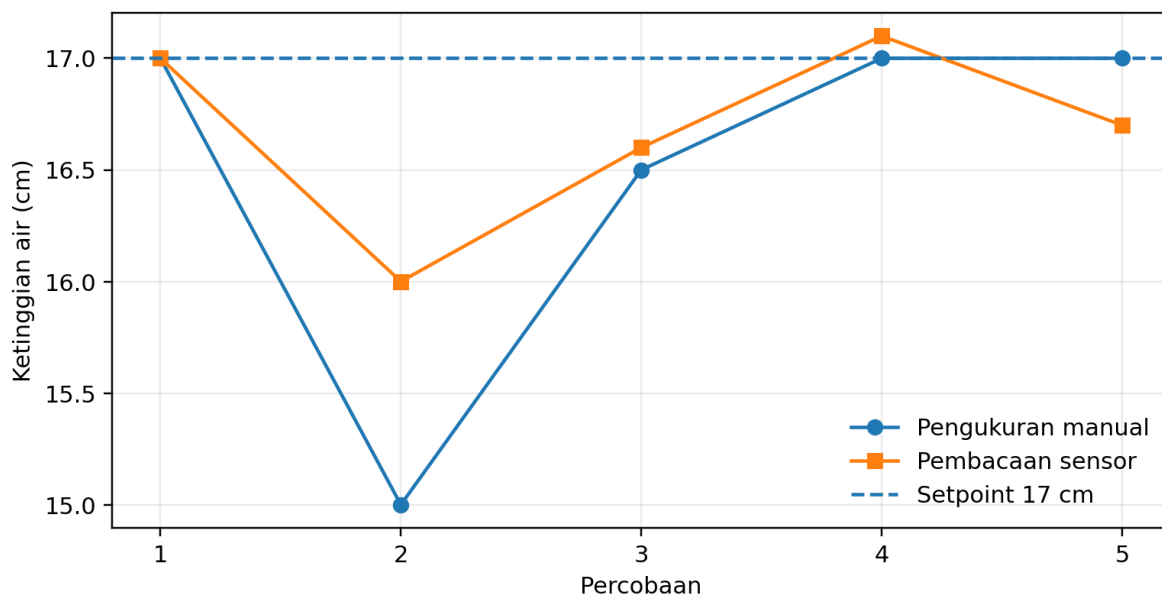
Gambar 3. Perbandingan level akhir manual dan sensor pada lima ulangan setpoint 10 cm.

Tabel 7. Hasil Pengujian Awal Sistem pada Setpoint 17 cm

Ulangan	PWM	Manual (cm)	Sensor (cm)	e sensor (cm)	e sensor	e manual	manual-sensor
1	200	17.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Ulangan	PWM	Manual (cm)	Sensor (cm)	e sensor (cm)	e sensor	e manual	manual-sensor
2	255	15.0	16.0	1.0	1.0	2.0	1.0
3	140	16.5	16.6	0.4	0.4	0.5	0.1
4	255	17.0	17.1	-0.1	0.1	0.0	0.1
5	140	17.0	16.7	0.3	0.3	0.0	0.3

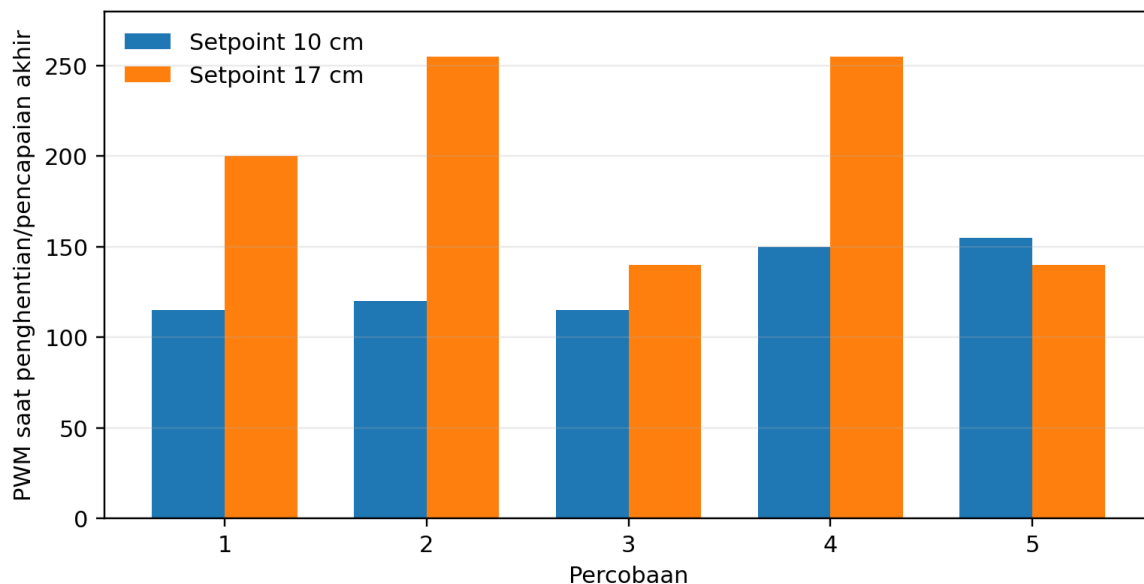
Pada setpoint 17 cm, level akhir rata-rata berdasarkan sensor adalah 16.68 ± 0.43 cm dengan MAE 0.36 cm (2.12%) dan RMSE 0.50 cm. Pengukuran manual rata-rata adalah 16.50 ± 0.87 cm dengan MAE 0.50 cm (2.94%). Selisih absolut sensor-manual rata-rata 0.30 cm. Kesepakatan sensor-manual pada setpoint 17 cm lebih baik dibandingkan kondisi 10 cm, tetapi satu ulangan manual menunjukkan 15 cm ketika sensor membaca 16 cm; variasi tersebut tetap perlu ditelusuri melalui data mentah dan kalibrasi.



Gambar 4. Perbandingan level akhir manual dan sensor pada lima ulangan setpoint 17 cm.

Tabel 8. Ringkasan Performa Sistem Berdasarkan Data Level Akhir

Setpoint	Rerata sensor $\pm$ SD	MAE sensor	Relatif sensor	Rerata manual $\pm$ SD	MAE manual	Relatif manual	Selisih sensor-manual
10 cm	9.24 ± 0.33	0.76 cm	7.60%	10.80 ± 0.84	0.80 cm	8.00%	1.56 cm
17 cm	16.68 ± 0.43	0.36 cm	2.12%	16.50 ± 0.87	0.50 cm	2.94%	0.30 cm



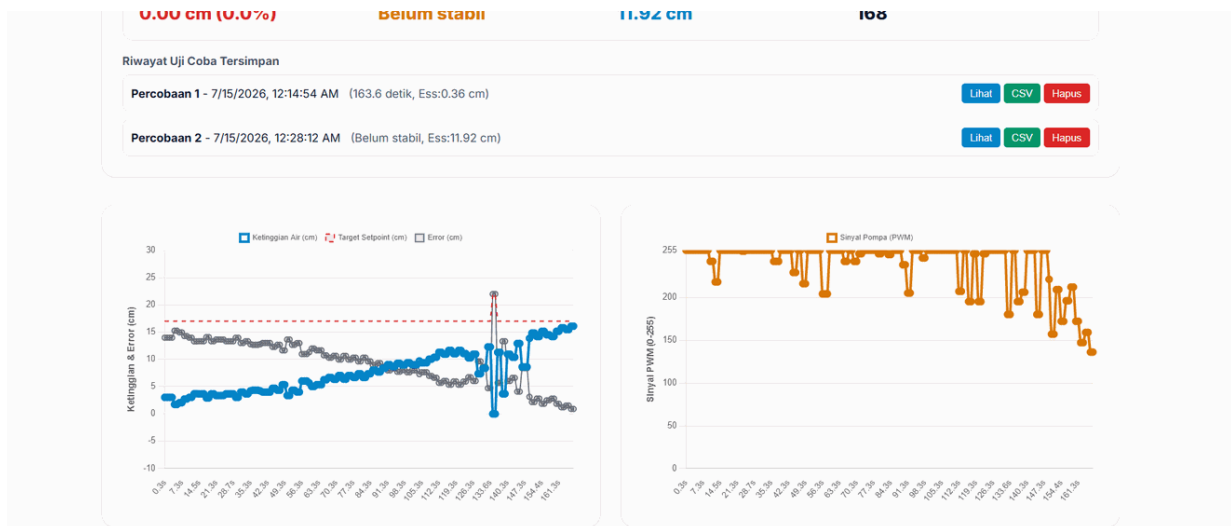
Gambar 5. PWM yang dicatat pada akhir masing-masing ulangan awal. Nilai ini tidak boleh ditafsirkan sebagai ukuran akurasi tanpa data waktu dan debit.

PWM akhir bervariasi antara 115-155 pada setpoint 10 cm dan 140-255 pada setpoint 17 cm. Variasi PWM tidak menunjukkan hubungan satu-ke-satu dengan error akhir. Hal ini wajar karena nilai akhir hanya merupakan satu titik dari proses dinamik dan dapat dipengaruhi oleh kapan data dicatat, kondisi pompa, head, level awal, serta aturan penghentian. Tanpa deret waktu dan debit, perbedaan tersebut tidak dapat diklaim sebagai efek tekanan hidrostatik atau dynamic braking secara pasti.

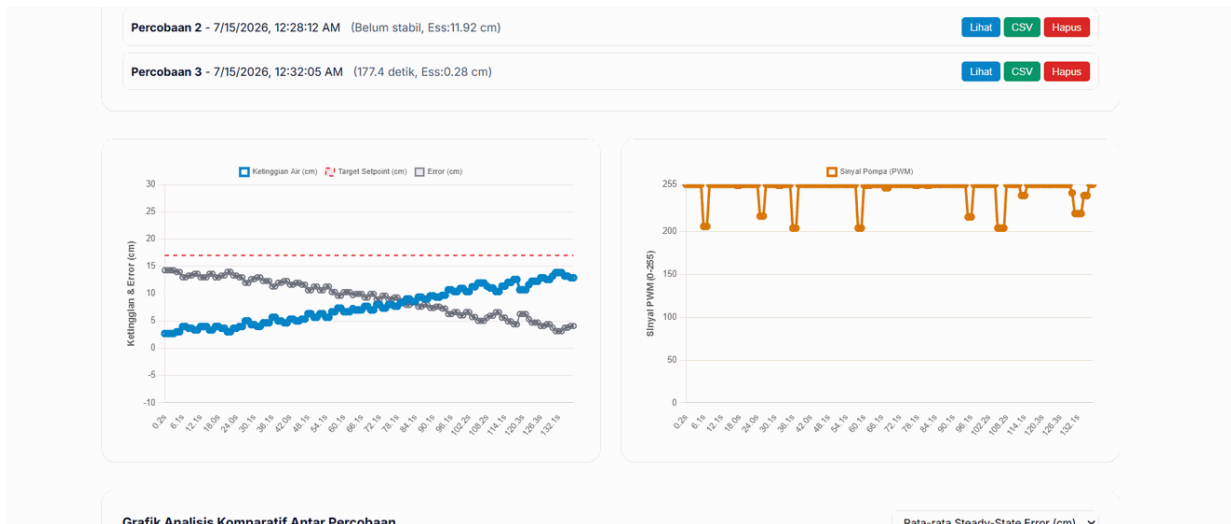
Tabel 9. Hasil Rekaman Eksploratif Sistem Setelah Penyetelan Manual

Setpoint	n	Level awal	Waktu akhir	Level akhir	Error akhir	Overshoot teramati	Status
10 cm	1	≈3,5 cm	85,2 s	9,6 cm	+0,4 cm (4,0%)	Tidak teramati	Masuk pita ±5%; durasi tinggal belum terdokumentasi
17 cm	1	[tidak tercatat]	126,6 s	11,8 cm	+5,2 cm (30,6%)	Tidak teramati	Belum mencapai setpoint; bukan kondisi tunak

Pada rekaman 10 cm, sinyal PWM dilaporkan berada pada 255 pada fase awal kemudian berkurang bertahap. Level akhir 9,6 cm berada di dalam pita ±5% dari setpoint 10 cm, tetapi istilah kondisi tunak hanya sah jika level tetap berada dalam pita tersebut selama periode tinggal yang ditetapkan. Pada rekaman 17 cm, PWM tetap 255 selama jendela data dan level hanya mencapai 11,8 cm; karena error masih 5,2 cm, rekaman ini tidak dapat digunakan sebagai bukti error 0% atau keberhasilan tuning. Klaim bahwa sistem kemudian mencapai 17 cm pada durasi lebih panjang perlu didukung file data, durasi, dan protokol ulangan yang jelas.



Gambar 6. Rekaman monitoring eksploratif setpoint 10 cm setelah penyetelan manual. Data numerik mentah perlu disertakan sebagai lampiran/repository.



Gambar 7. Rekaman monitoring eksploratif setpoint 17 cm; pada akhir jendela 126,6 s level masih di bawah setpoint.

PEMBAHASAN

Perhitungan ulang mengubah interpretasi utama naskah. Pada setpoint 10 cm, error rata-rata tidak sebesar 0,32 cm (3,2%) sebagaimana dilaporkan sebelumnya, melainkan 0,76 cm (7,60%) jika process variable yang digunakan adalah sensor, atau 0,80 cm (8,00%) jika pengukuran manual dijadikan rujukan level akhir. Pada setpoint 17 cm, MAE berbasis sensor adalah 0,36 cm (2,12%), bukan 1,1 cm (6,5%). Perbedaan ini menunjukkan bahwa audit definisi variabel harus dilakukan sebelum pembahasan mekanistik atau klaim performa.

Selisih sensor-manual pada setpoint 10 cm mencapai rata-rata 1,56 cm dan sensor cenderung membaca lebih rendah. Data yang tersedia belum memungkinkan pemisahan antara bias kalibrasi, kesalahan konversi jarak-ke-level, efek permukaan air, posisi pembacaan manual, dan air yang masih mengalir setelah pencatatan. Karena tidak ada data debit, waktu penghentian pompa, atau rekaman sinkron sensor dan manual, penjelasan “inersia aliran” hanya dapat disebut sebagai hipotesis. Hasil penelitian ultrasonik sebelumnya juga menunjukkan bahwa fluktuasi permukaan dan

pencilan dapat meningkatkan error, sehingga prosedur kalibrasi dan filtering perlu menjadi bagian eksplisit dari metode (Bae & Ji, 2019; Pereira et al., 2022).

Pada setpoint 17 cm, kesepakatan sensor-manual relatif lebih baik, tetapi kondisi ini tidak otomatis membuktikan bahwa tekanan hidrostatik memperbaiki atau memperburuk respons. Pengaruh head pompa hanya dapat dievaluasi melalui kurva PWM-debit pada beberapa level, pengukuran tegangan/ arus pompa, atau model debit masuk. Dengan demikian, tekanan hidrostatik, saturasi aktuator, dan riak permukaan diposisikan sebagai kemungkinan penjelas yang memerlukan verifikasi, bukan sebagai fakta hasil eksperimen.

Kontroler memang menunjukkan fungsi rule-based: PWM tinggi digunakan ketika error besar dan diturunkan ketika error mengecil pada rekaman 10 cm. Namun, perilaku ini merupakan konsekuensi desain yang diharapkan, bukan bukti kebaruan algoritmik. Kebaruan praktis penelitian ini terbatas pada implementasi prototipe dan evaluasi data pada dua setpoint. Agar kontribusi kontrol menjadi lebih kuat, fungsi keanggotaan, seluruh rule base, singleton output, periode sampling, dan perubahan parameter sebelum-sesudah penyetelan harus disajikan. Tanpa informasi tersebut, penelitian tidak dapat direplikasi atau dibandingkan secara adil dengan studi Sugeno lain (Aydinoglu, 2009).

Istilah “adaptif” tidak digunakan dalam revisi karena fungsi keanggotaan dan rule base tidak berubah otomatis selama operasi. Kontroler hanya menghasilkan keluaran yang berubah terhadap error berdasarkan parameter tetap. Istilah “overdamped” juga tidak digunakan karena ketiadaan overshoot pada rekaman terbatas tidak cukup untuk menentukan letak pole atau rasio redaman sistem. Ungkapan yang lebih tepat adalah “respons monoton tanpa overshoot yang teramati”. Demikian pula, pembahasan anti-windup dihapus karena integral windup merupakan fenomena spesifik pada aksi integral dan tidak relevan sebagai dasar keunggulan fuzzy pada eksperimen ini.

Rekaman setelah penyetelan tidak dapat dibandingkan langsung dengan rata-rata lima ulangan awal. Pada setpoint 10 cm, satu rekaman menunjukkan tidak adanya overshoot dan level akhir 9,6 cm; temuan ini dapat menjadi indikasi awal bahwa titik pengurangan PWM layak diuji ulang. Namun, error akhir 4% tidak lebih kecil daripada MAE berbasis sensor 7,6% jika definisi berbeda, dan terlebih lagi satu rekaman tidak mewakili konsistensi. Pada setpoint 17 cm, rekaman berakhir sebelum mencapai target, sehingga tidak ada dasar untuk menyatakan tuning berhasil. Penelitian konfirmatori harus memakai desain berimbang dan, bila ingin mengklaim keunggulan fuzzy, memasukkan kontrol ON/OFF atau PI/PID pada plant dan kondisi yang sama, sebagaimana dilakukan dalam studi eksperimental terdahulu (Shasadeghi et al., 2014; Başçi & Derdiyok, 2016).

Kontribusi paling dapat dipertahankan dari penelitian ini adalah demonstrasi prototipe berbiaya rendah dan kerangka evaluasi yang memisahkan tiga sumber informasi: error yang “dilihat” kontroler melalui sensor, deviasi terhadap pengukuran manual, dan perbedaan sensor-manual. Pemisahan ini penting karena sistem dapat tampak mencapai setpoint berdasarkan sensor tetapi berbeda dari level fisik yang terbaca manual. Dengan demikian, peningkatan algoritma tanpa validasi sensor dapat menghasilkan kesimpulan yang menyesatkan.

Keterbatasan

Keterbatasan penelitian mencakup: (1) tidak tersedianya data mentah deret waktu untuk seluruh ulangan; (2) parameter plant dan kurva pompa belum lengkap; (3) fungsi keanggotaan, rule base, singleton, dan periode sampling belum dilaporkan; (4) protokol kalibrasi sensor belum tersedia; (5) pengujian setelah penyetelan hanya satu kali per setpoint dengan durasi tidak setara; (6) tidak ada pengujian penolakan gangguan, perubahan setpoint turun, atau variasi outlet; dan (7) tidak ada kontrol pembanding. Keterbatasan ini membatasi generalisasi hasil pada prototipe dan kondisi pengujian yang tersedia.

KESIMPULAN

Fuzzy Sugeno Orde-0 pada prototipe satu tangki mampu menghasilkan perubahan PWM sebagai fungsi error dan perubahan error. Berdasarkan audit lima ulangan awal, setpoint 10 cm menghasilkan MAE 0,76 cm (7,60%) menurut sensor dan 0,80 cm (8,00%) menurut pengukuran manual, dengan selisih absolut sensor-manual rata-rata 1,56 cm. Setpoint 17 cm menghasilkan MAE 0,36 cm (2,12%) menurut sensor dan 0,50 cm (2,94%) menurut pengukuran manual, dengan selisih sensor-manual rata-rata 0,30 cm. Satu rekaman setelah penyetelan pada setpoint 10 cm menunjukkan level akhir 9,6 cm tanpa overshoot yang teramati, sedangkan rekaman 17 cm berakhir pada 11,8 cm dan belum mencapai kondisi tunak. Dengan desain dan data saat ini, penyetelan belum dapat dinyatakan memperbaiki performa secara konsisten dan kontroler belum dapat diklaim lebih unggul daripada ON/OFF atau PID. Validasi konfirmatori membutuhkan dokumentasi FLC yang lengkap, kalibrasi sensor, pengulangan yang setara, data mentah, dan uji gangguan.

REKOMENDASI

Penelitian lanjutan perlu memprioritaskan empat langkah. Pertama, audit source code dan isi seluruh parameter FLC beserta rule base. Kedua, kalibrasi sensor HC-SR04 terhadap alat ukur rujukan pada rentang operasi dan terapkan penyaringan data yang terdokumentasi. Ketiga, ulangi pengujian awal dan setelah penyetelan dengan sedikitnya lima ulangan per kondisi, level awal dan outlet yang sama, durasi maksimum yang identik, serta definisi settling time yang eksplisit. Keempat, tambahkan uji disturbance rejection dan kontrol pembanding ON/OFF atau PI/PID apabila tujuan penelitian adalah menunjukkan keunggulan fuzzy. Data mentah waktu-level-error-PWM sebaiknya disediakan sebagai lampiran atau repositori.

REFERENSI

- Amelia, S. R. (2023). Pembuatan alat ukur debit air. *Jurnal Teknik Energi*, 11(2). <https://doi.org/10.35313/energi.v11i2.3898>
- Aydogmus, Z. (2009). Implementation of a fuzzy-based level control using SCADA. *Expert Systems with Applications*, 36(3, Part 2), 6593-6597. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2008.07.055>
- Bae, I., & Ji, U. (2019). Outlier detection and smoothing process for water level data measured by ultrasonic sensor in stream flows. *Water*, 11(5), 951. <https://doi.org/10.3390/w11050951>

- Başçi, A., & Derdiyok, A. (2016). Implementation of an adaptive fuzzy compensator for coupled tank liquid level control system. *Measurement*, 91, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.026>
- Bakar, Z. A., Nor, M. Z. M., Kadiran, K. A., Misnan, M. F., & Noorezam, M. (2022). Smart plant monitoring system using aquaponics production technological with Arduino development environment (IDE) and SMS alert: A prototype. *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, 16(22), 32-47. <https://doi.org/10.3991/ijim.v16i22.34581>
- Bautista, M. G. A. C., Palconit, M. G. B., & Rosales, M. A. (2022). Fuzzy logic-based adaptive aquaculture water monitoring system based on instantaneous limnological parameters. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Informatics*, 26(6), 937-945. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaciii/26/6/26_937/_article
- Boumehez, F., Sahour, A., & Maamri, F. (2025). IoT-enabled fuzzy logic system for aquaculture water quality management. *IEEE Conference Proceedings*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11232273/>
- Choiri, A. F. (2024). IoT-based water quality monitoring system for fish ponds using fuzzy inference method. *Jurnal Teknologi*. <https://jtit.polije.ac.id/index.php/jtit/article/view/441>
- Fachri, B., & Wahyu Surbakti, R. (2021). Perancangan sistem dan desain undangan digital menggunakan metode waterfall berbasis website (Studi kasus: ASCO Jaya). *Journal of Science and Social Research*. <http://jurnal.goretanpena.com/index.php/JSSR>
- Fitriyanto, I., Amri, F., & Robiyanto, R. (2024). Desain meteran air prabayar berbasis sensor YF-S201 dengan generator air mini sebagai catu daya. *Jurnal Amplifier: Jurnal Ilmiah Bidang Teknik Elektro dan Komputer*, 14(2), 168-173. <https://doi.org/10.33369/jamplifier.v14i2.37185>
- Gao, D., Wang, S., Yang, Y., Zhang, H., Chen, H., Mei, X., Chen, S., & Qiu, J. (2024). An intelligent control method for servo motor based on reinforcement learning. *Algorithms*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/a17010014>
- Hassan, A., Afrouzi, H. N., Siang, C. H., Ahmed, J., Mehrazamir, K., & Wooi, C. L. (2022). A survey and bibliometric analysis of different communication technologies available for smart meters. *Cleaner Engineering and Technology*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100424>
- Islam, R., Rahman, M. W., Rubaiat, R., Hasan, M. M., Reza, M. M., & Rahman, M. M. (2022). LoRa and server-based home automation using the internet of things (IoT). *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(6), 3703-3712. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.12.020>
- Jais, N. A. M., Abdullah, A. F., Kassim, M. S. M., & Abd Karim, M. M. (2024). Improved accuracy in IoT-based water quality monitoring for aquaculture tanks using low-cost sensors: Asian seabass fish farming. *Heliyon*, 10(5). [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)05053-9](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)05053-9)
- Juliando, D. E., Putra, R. G., Sartika, D. A., & Yudha, R. G. P. (2021). Study of Lora module Ra-02 for long range, low power, low rate picture transfer applications. *Journal of Physics: Conference Series*, 1845(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1845/1/012054>

- Khoei, A., Hadidi, K., Khorasani, M. R., & Amirkhanzadeh, R. (2005). Fuzzy level control of a tank with optimum valve movement. *Fuzzy Sets and Systems*, 150(3), 507-523. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2004.09.009>
- Loizou, K., & Koutroulis, E. (2016). Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system. *Measurement*, 89, 204-214. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.019>
- Li, H. C., Yu, K. W., Lien, C. H., Lin, C., & Yu, C. R. (2023). Improving aquaculture water quality using dual-input fuzzy logic control for ammonia nitrogen management. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(6), 1109. <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/6/1109>
- Mahapatro, S. R., Subudhi, B., & Ghosh, S. (2014). Adaptive fuzzy PI controller design for coupled tank system: An experimental validation. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(1), 878-881. <https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00112>
- Majid, M., Habib, S., Javed, A. R., Rizwan, M., Srivastava, G., Gadekallu, T. R., & Lin, J. C. W. (2022). Applications of wireless sensor networks and internet of things frameworks in the industry revolution 4.0: A systematic literature review. *Sensors*, 22(6). <https://doi.org/10.3390/s22062087>
- Nagothu, S. K., Sri, P. B., Anitha, G., & Vincent, S. (2025). Advancing aquaculture: Fuzzy logic-based water quality monitoring and maintenance system for precision aquaculture. *Aquaculture International*. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10499-024-01701-2>
- Prafanto, A., Septiarini, A., & Puspitasari, N. (2024). IoT-based water quality control in tilapia aquaculture using fuzzy logic. *Journal of Innovation in Research of Informatics*. <https://jurnal.unsil.ac.id/index.php/innovatics/article/view/11271>
- Pereira, T. S. R., de Carvalho, T. P., Mendes, T. A., & Formiga, K. T. M. (2022). Evaluation of water level in flowing channels using ultrasonic sensors. *Sustainability*, 14(9), 5512. <https://doi.org/10.3390/su14095512>
- Shasadeghi, M., Safarinejadian, B., & Farughian, A. (2014). Parallel distributed compensator design of tank level control based on fuzzy Takagi-Sugeno model. *Applied Soft Computing*, 21, 280-285. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.03.024>
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15(1), 116-132. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
- Tsai, K. L., Chen, L. W., Yang, L. J., & Shiu, H. J. (2022). IoT-based smart aquaculture system with automatic aerating and water quality monitoring. *Journal of Internet Technology*. <https://jit.ndhu.edu.tw/article/view/2655>