

Unjuk Kerja FLC (*Fuzzy Logic Controller*) pada Pengendalian Suhu Inkubator Ayam

Performance of FLC (*Fuzzy Logic Controller*) in Controlling Chicken Incubator Temperature

Bayu Hendra Pratama¹, Arif Johar Taufiq²

^{1,2} Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Sains,
Universitas Muhammadiyah Purwokerto

^{1,2} Jl. KH Ahmad Dahlan, Kembaran 53182, Indonesia

email: ^{*1} bayuhendrapratama4@gmail.com, ² arifjt@ump.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 12 Januari 2026

Diterima, 8 Juni 2026

Diterbitkan, 19 Juni 2026

Kata Kunci :

Fuzzy logic controller,
inkubator ayam, pengendalian suhu, FLC-like PID, Ziegler-Nichols, Arduino Uno, IAE, ITAE, brooding

Keyword :

Fuzzy logic controller, chicken incubator, temperature control, FLC-like PID, Ziegler-Nichols, Arduino Uno, IAE, ITAE, brooding

ABSTRAK

Pengendalian suhu yang akurat dan stabil merupakan faktor kritis dalam keberhasilan pemeliharaan anak ayam pada fase brooding. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian suhu inkubator ayam berbasis *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dengan pendekatan FLC-like PID, di mana rentang fungsi keanggotaan diturunkan secara setara dengan penyetelan gain PID menggunakan metode Ziegler-Nichols. Sistem dibangun menggunakan mikrokontroler Arduino Uno, sensor DHT22, lampu halogen sebagai pemanas, dan motor BLDC sebagai pendingin. Empat konfigurasi fungsi keanggotaan dirancang dan diuji pada tiga skenario: tanpa gangguan siang hari, tanpa gangguan malam hari, dan dengan gangguan eksternal berupa pembukaan pintu inkubator. Evaluasi dilakukan terhadap sepuluh parameter unjuk kerja meliputi *rise time*, *settling time*, *overshoot*, *steady-state error*, IAE, ITAE, RMSE, dan stabilitas (σ). Hasil pengujian menunjukkan bahwa keempat kombinasi mampu mempertahankan suhu pada setpoint 35°C dengan maximum *overshoot* di bawah 2%. Pada kondisi malam hari tanpa gangguan, Kombinasi 1 menghasilkan unjuk kerja terbaik secara menyeluruh dengan *overshoot* 0,75%, *rise time* 136 detik, *steady-state error* -0,070°C, IAE 787,27, ITAE 186.650, dan RMSE 0,0808. Pada kondisi siang hari, Kombinasi 4 unggul dalam kecepatan respons dengan *rise time* 61 detik dan *settling time* 109 detik. Sistem FLC juga terbukti robust terhadap gangguan eksternal, baik sesaat maupun berkepanjangan. Pendekatan FLC-like PID berbasis Ziegler-Nichols memberikan prosedur penyetelan yang terstruktur dan dapat direplikasi sebagai alternatif yang lebih sistematis dibanding *trial and error* pada aplikasi inkubator berbasis mikrokontroler berbiaya rendah.

ABSTRACT

Accurate and stable temperature control is a critical factor in the successful rearing of chicks during the brooding phase. This study aims to design and implement a temperature control system for a chicken incubator based on a Fuzzy Logic Controller (FLC) using an FLC-like PID approach, in which the membership function ranges are derived equivalently to PID gain tuning via the Ziegler-Nichols method. The system was built using an Arduino Uno microcontroller, a DHT22 sensor, a halogen lamp as the heating element, and a BLDC motor as the cooling element. Four membership function configurations (Combinations 1–4) were designed and tested under three scenarios: undisturbed daytime conditions, undisturbed nighttime conditions, and with external disturbances simulated by opening the incubator door. Performance evaluation was conducted across ten metrics including rise time, settling time, overshoot, steady-state error, IAE, ITAE, RMSE, and stability (σ). Results show that all four combinations successfully maintained temperature at a 35°C setpoint with maximum overshoot below 2%. Under undisturbed nighttime conditions, Combination 1 delivered the best overall performance with an overshoot of 0.75%, rise time of 136 s, steady-state error of -0.070°C, IAE of 787.27, ITAE of 186,650, and RMSE of 0.0808.

Under daytime conditions, Combination 4 achieved superior response speed with a rise time of 61s and settling time of 109s. The FLC system also demonstrated robustness against both brief and prolonged external disturbances. The Ziegler-Nichols-based FLC-like PID approach provides a structured and reproducible tuning procedure as a more systematic alternative to trial-and-error in low-cost microcontroller-based incubator applications. The experimental results indicate that all tested FLC configurations successfully controlled the incubator temperature. Under undisturbed conditions, Combination 1 at a setpoint of 35 °C exhibited a rise time of 136 seconds and a peak time of 259 seconds, with a maximum overshoot of 0.75% and a steady-state error of -0.70 °C. During disturbance tests, the FLC was able to effectively compensate for temperature deviations and restore the temperature to the setpoint despite significant thermal disturbances. Based on the experimental analysis, it can be concluded that the Fuzzy Logic Controller is effective in maintaining temperature stability in a chicken egg incubator, minimizing control errors, and providing adaptive responses to environmental changes

1. PENDAHULUAN

Pengendalian suhu merupakan faktor kritis dalam keberhasilan pemeliharaan anak ayam pada fase awal kehidupan. Anak ayam yang baru menetas belum memiliki kemampuan termoregulasi mandiri sehingga sangat bergantung pada kondisi lingkungan sekitar. Ketidaksiharian suhu pada fase *brooding*, yang idealnya berkisar antara 32°C- 35°C [1], [2], [3], dapat menyebabkan stres termal, penurunan imunitas, bahkan kematian. Oleh karena itu, inkubator dengan sistem pengendalian suhu yang andal menjadi kebutuhan mendasar dalam industri peternakan unggas modern.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk pengendalian suhu inkubator. Kontroler PID (*Proportional-Integral-Derivative*) merupakan solusi yang paling umum karena kesederhanaan dan kompatibilitasnya [4], [5], [6], [7]. Namun, penyetelan parameter K_p , K_i , dan K_d pada PID konvensional umumnya bergantung pada metode *trial and error*, yang membutuhkan waktu, keahlian teknis, dan rentan terhadap gangguan lingkungan yang tidak terduga [8], [9], [10]. Keterbatasan ini mendorong eksplorasi pendekatan kontroler yang lebih adaptif dan toleran terhadap ketidakpastian.

Fuzzy Logic Controller (FLC) telah menunjukkan kemampuan yang baik dalam menangani ketidakpastian dan nonlinieritas sistem, termasuk pada aplikasi pengendalian suhu inkubator [11], [12], [13], [14], [15]. Eltaleb mengimplementasikan FLC pada mikrokontroler ATMega32 dan memperoleh *steady-state error* sebesar 2,3% dengan *settling time* mencapai 27,30 menit [16]. Penelitian lain yang mempertimbangkan suhu dan kelembaban secara bersamaan dengan metode Mamdani dan Sugeno menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi pada 27 dari 30 sampel data [17]. Meski demikian, sejumlah aspek belum sepenuhnya dikaji dalam literatur yang ada.

Kesenjangan penelitian yang diidentifikasi mencakup tiga aspek. Pertama, sebagian besar studi mengkaji FLC dan PID secara terpisah, sehingga potensi pendekatan FLC *like* PID di mana rentang fungsi keanggotaan FLC diturunkan secara setara dengan penyetelan gain PID melalui metode Ziegler-Nichols belum banyak dieksplorasi pada aplikasi inkubator ayam. Kedua, evaluasi performa sistem masih terbatas pada kondisi *steady-state* tanpa analisis mendalam terhadap respons transien pada kondisi gangguan. Ketiga, penggunaan sensor DHT22 yang memiliki akurasi tinggi $\pm 0,5^\circ\text{C}$ dikombinasikan dengan pendekatan FLC berbasis Ziegler-Nichols belum banyak dilaporkan.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengusulkan implementasi FLC dengan pendekatan FLC-*like* PID untuk pengendalian suhu inkubator ayam menggunakan sensor DHT22 dan mikrokontroler Arduino Uno. Penyetelan rentang fungsi keanggotaan masukan fuzzy dilakukan setara dengan pengaturan gain PID melalui metode Ziegler-Nichols, sehingga diharapkan menghasilkan respons yang lebih cepat dan stabil. Empat konfigurasi fungsi keanggotaan diuji dan dibandingkan secara sistematis.

Tujuan penelitian ini adalah: merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian suhu inkubator ayam berbasis FLC dengan pendekatan FLC-*like* PID; membandingkan unjuk kerja empat konfigurasi fungsi keanggotaan melalui sepuluh parameter performa kuantitatif; serta mengevaluasi ketahanan sistem terhadap gangguan eksternal berupa pembukaan pintu inkubator.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Perancangan Perangkat Keras

Sistem inkubator ayam dibangun dalam wadah berukuran 25cm x 25cm x 25cm. Komponen perangkat keras yang digunakan dirangkum pada Tabel 1.

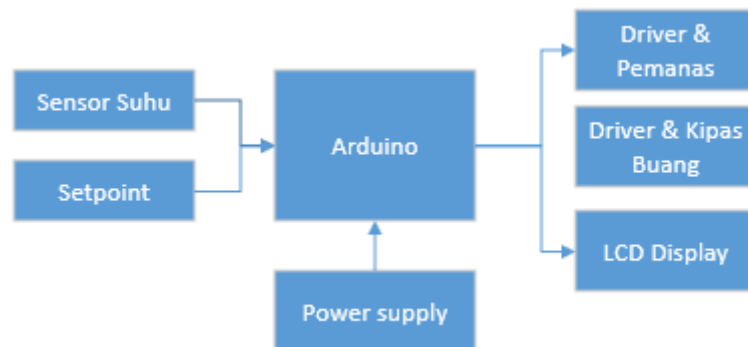
Tabel 1. Komponen Perangkat Keras Sistem Inkubator

No.	Komponen	Fungsi
1	Arduino Uno	Mikrokontroler utama; menjalankan algoritma FLC dan mengatur aktuator
2	DHT22	Sensor suhu dan kelembaban ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$; resolusi $0,1^{\circ}\text{C}$)
3	Lampu Halogen	Elemen pemanas (<i>heater</i>) inkubator
4	Kipas BLDC	Elemen pendingin (<i>fan</i>) dan sirkulasi udara
5	LCD I2C (16x2)	Tampilan status <i>real-time</i> (setpoint, suhu aktual, status <i>heater/fan</i>)
6	Potensiometer	Penyetelan nilai setpoint suhu secara manual
7	Triac & MOSFET IRF3205	Pengendali daya untuk heater dan fan
8	Modul charger & Power supply USB	Sumber daya sistem
9	PCB & komponen pasif	Papan rangkaian dan resistor pendukung
10	Box inkubator (25x25x25 cm)	Ruang tertutup objek pengujian

2.2. Arsitektur Sistem

Diagram blok sistem ditunjukkan pada Gambar 1. Sensor DHT22 membaca suhu aktual inkubator dan mengirimkan data ke Arduino Uno. Mikrokontroler memproses data tersebut melalui tiga tahap FLC: fuzzifikasi, inferensi, dan defuzzifikasi. Keluaran FLC digunakan untuk mengatur dua aktuator secara komplementer: heater lampu halogen dan kipas motor BLDC. Layar LCD I2C menampilkan status sistem secara *real-time*. Prinsip kerja sistem adalah sebagai berikut:

- Sensor : DHT22 mengukur suhu ruang inkubator dan mengirimkan data digital ke Arduino.
- FLC pada Arduino : Proses fuzzifikasi mengubah nilai error dan delta error menjadi derajat keanggotaan; inferensi fuzzy mengeksekusi basis aturan; defuzzifikasi mengkonversi output fuzzy menjadi sinyal kendali.
- Heater : Diaktifkan saat suhu di bawah *setpoint*; intensitas dikontrol oleh output FLC.
- Kipas : Diaktifkan saat suhu melebihi *setpoint*; berfungsi sebagai pendingin dan stabilisator.
- Display : LCD menampilkan *setpoint*, suhu aktual, serta status *heater* dan *fan*.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Pengendalian Suhu Inkubator Ayam

2.3. Desain Fuzzy Logic Controller

Variabel masukan dan keluaran. FLC dirancang dengan dua variabel masukan Error dan Delta Error serta dua variabel keluaran, yaitu sinyal kendali heater dan fan. Masing-masing variabel masukan didefinisikan dengan lima himpunan fuzzy: NM, NS, Z, PS, dan PM.

Penyetelan fungsi keanggotaan FLC *like* PID. Rentang fungsi keanggotaan pada variabel masukan diturunkan secara analogi dengan penyetelan gain PID menggunakan metode Ziegler-Nichols. Dari eksperimen osilasi batas pada sistem, diperoleh penguatan kritis K_u dan periode osilasi P_u . Nilai-nilai ini digunakan untuk menentukan rentang *universe of discourse* fungsi keanggotaan pada tiap kombinasi, sehingga perilaku FLC secara fungsional sebanding dengan kontroler PID yang disetel dengan metode yang sama. Empat konfigurasi

(Kombinasi 1–4) dihasilkan dengan menggeser rentang fungsi keanggotaan tersebut, sebagaimana ditabulasikan pada Tabel 2.

Tabel 2 . Nilai Parameter Fungsi Keanggotaan Keempat Kombinasi FLC

Komb.	Himpunan	Fungsi Keanggotaan Error	Fungsi Keanggotaan Delta Error
1	NM	(-5, -5, -3, -1,5)	(-3, -3, -1,5, -0,8)
	NS	(-3, -1,5, 0)	(-1,5, -0,8, 0)
	Z	(-0,5, 0, 0,5)	(-0,4, 0, 0,4)
	PS	(0, 1,5, 3)	(0, 0,8, 1,5)
	PM	(1,5, 3, 5, 5)	(0,8, 1,5, 3, 3)
2	NM	(-8, -8, -5, -2,5)	(-3, -3, -1,5, -0,8)
	NS	(-5, -2,5, 0)	(-1,5, -0,8, 0)
	Z	(-0,8, 0, 0,8)	(-0,4, 0, 0,4)
	PS	(0, 2,5, 5)	(0, 0,8, 1,5)
	PM	(2,5, 5, 8, 8)	(0,8, 1,5, 3, 3)
3	NM	(-4, -4, -2,5, -1,5)	(-1,5, -1,5, -0,9, -0,4)
	NS	(-2,5, -1,2, 0)	(-0,9, -0,4, 0)
	Z	(-0,3, 0, 0,3)	(-0,2, 0, 0,2)
	PS	(0, 1,2, 2,5)	(0, 0,4, 0,9)
	PM	(1,5, 2,5, 4, 4)	(0,4, 0,9, 1,5, 1,5)
4	NM	(-4, -4, -2,5, -1,5)	(-1,5, -1,5, -0,8, -0,4)
	NS	(-2,5, -1, 0)	(-0,8, -0,3, 0)
	Z	(-0,3, 0, 0,3)	(-0,2, 0, 0,2)
	PS	(0, 1, 2,5)	(0, 0,3, 0,8)
	PM	(1,5, 2,5, 4, 4)	(0,4, 0,8, 1,5, 1,5)

Basis aturan, menggunakan $5 \times 5 = 25$ aturan fuzzy. Karena heater dan fan bekerja secara komplementer, dibuat dua tabel aturan terpisah: Tabel 3 untuk *heater* dan Tabel 4 untuk *fan*. Aturan *heater* bersifat proporsional terhadap magnitude error makin besar *error* negatif, heater semakin aktif, sedangkan aturan *fan* bersifat kebalikannya.

Tabel 3. *Rule Base Heater*

E / ΔE	NM	NS	Z	PS	PM
NM	NM	NM	NM	NS	Z
NS	NM	NS	NS	Z	PS
Z	NM	NS	Z	PS	PM
PS	NS	Z	PS	PS	PM
PM	Z	PS	PM	PM	PM

Tabel 4. *Rule Base Fan*

E / ΔE	NM	NS	Z	PS	PM
NM	PM	PM	PM	PS	Z
NS	PM	PS	PS	Z	NS
Z	PM	PS	Z	NS	NM
PS	PS	Z	NS	NS	NM
PM	Z	NS	NM	NM	NM

2.4. Prosedur Pengujian

Pengujian dilaksanakan dalam tiga skenario untuk memperoleh karakterisasi sistem yang komprehensif:

1. Skenario A Tanpa Gangguan Siang Hari: Durasi 1925 detik. Dilakukan pada siang hari suhu lingkungan lebih tinggi untuk menganalisis respons transien dan kestabilan saat *steady-state* keempat kombinasi FLC.
2. Skenario B Tanpa Gangguan Malam Hari: Durasi 1925 detik. Dilakukan pada malam hari suhu lingkungan lebih rendah untuk membandingkan karakteristik sistem pada kondisi termal yang berbeda.
3. Skenario C Dengan Gangguan: Dua jenis gangguan diuji pada malam hari: gangguan sesaat pintu inkubator dibuka selama 120 detik; gangguan berkepanjangan pintu dibuka selama 1800 detik dari detik ke-1800 hingga akhir pengujian total 3600 detik. Pengujian ini mengevaluasi kemampuan pemulihan (*recovery*) sistem.

Parameter unjuk kerja yang dianalisis mencakup sepuluh indikator: *delay time*, *rise time*, *peak time*, *maximum overshoot*, *settling time*, *steady-state error*, IAE (*Integral Absolute Error*), ITAE (*Integral Time-weighted Absolute Error*), akurasi (RMSE), dan stabilitas (σ).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian Tanpa Gangguan Siang Hari

Pengujian dilakukan selama 1925 detik dengan *setpoint* 35°C. Grafik respons sistem ditunjukkan pada Gambar 2. Data kuantitatif ke empat kombinasi FLC dirangkum pada Tabel 5.



Gambar 2. Respon Suhu Inkubator Siang Hari

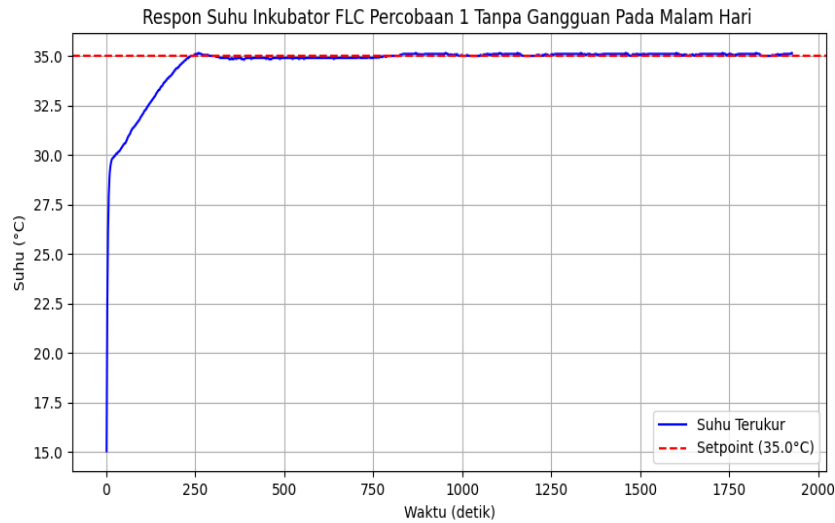
Tabel 5. Hasil Pengujian Inkubator Tanpa Gangguan – Siang Hari

Parameter	K1	K2	K3	K4
Delay time (s)	1	1	1	1
Rise time (s)	115	106	90	61
Peak time (s)	145	221	122	171
Max overshoot (%)	1,65	1,35	1,68	1,49
Settling time (s)	175	156	142	109
Steady-state error (°C)	-0,108	-0,112	-0,103	-0,101
IAE	357,36	630,67	380,37	465,48
ITAE	198.797	215.855	198.478	200.156
RMSE	0,1125	0,1158	0,1053	0,1036
Stabilitas σ	0,0308	0,0308	0,0223	0,0211

Berdasarkan Tabel 5, Kombinasi 4 memiliki *rise time* tercepat 61 detik dan *settling time* terpendek 109 detik, dengan *steady-state error* terkecil -0,101°C dan stabilitas terbaik $\sigma = 0,0211$. Sebaliknya, Kombinasi 2 memiliki nilai IAE tertinggi 630,67 dan *peak time* terlama 221 detik, mengindikasikan respons yang lebih lambat. Kombinasi 3 menghasilkan *overshoot* tertinggi 1,68% namun *peak time* tercepat 122 detik, mencerminkan karakter respons yang agresif. Nilai *maximum overshoot* keempat kombinasi <2% masih berada dalam batas toleransi yang aman untuk ternak unggas muda.

3.2. Pengujian Tanpa Gangguan Malam Hari

Pengujian malam hari dilakukan dalam kondisi suhu lingkungan yang lebih rendah. Hal ini berpengaruh pada karakteristik respons sistem, terutama nilai *overshoot* yang cenderung lebih kecil karena gradien pemanasan lebih terkontrol. Grafik ditunjukkan pada Gambar 3, dan data kuantitatif pada Tabel 6.



Gambar 3. Respons Suhu Inkubator Malam Hari

Tabel 6. Hasil Pengujian Inkubator Tanpa Gangguan Malam Hari

Parameter	K1	K2	K3	K4
Delay time (s)	1	1	1	1
Rise time (s)	136	127	162	90
Peak time (s)	259	238	267	203
Max overshoot (%)	0,75	1,01	0,90	0,99
Settling time (s)	192	184	1925*	143
Steady-state error (°C)	-0,070	-0,087	-0,091	-0,084
IAE	787,27	727,89	926,96	1158,23
ITAE	186.650	200.105	227.126	242.112
RMSE	0,0808	0,0914	0,0964	0,0905
Stabilitas σ	0,0406	0,0290	0,0321	0,0211

*Settling time K3 malam hari tidak tercapai dalam durasi pengujian 1925 detik.

Pada kondisi malam hari, Kombinasi 1 unggul secara keseluruhan: *maximum overshoot* terendah 0,75%, *steady-state error* terkecil -0,070°C, IAE terendah 787,27, ITAE terendah 186.650, dan RMSE terbaik 0,0808. Ini menunjukkan bahwa Kombinasi 1 paling konsisten menjaga suhu mendekati *setpoint* dengan akumulasi error yang minimum, yang secara biologis paling aman bagi anak ayam. Perlu dicatat bahwa Kombinasi 3 tidak mencapai *settling time* selama durasi pengujian, mengindikasikan ketidakstabilan relatif pada kondisi ini. Kombinasi 4 memiliki *rise time* tercepat 90 detik namun IAE dan ITAE tertinggi, menunjukkan agresivitas respons yang berpotensi menimbulkan osilasi lebih besar.

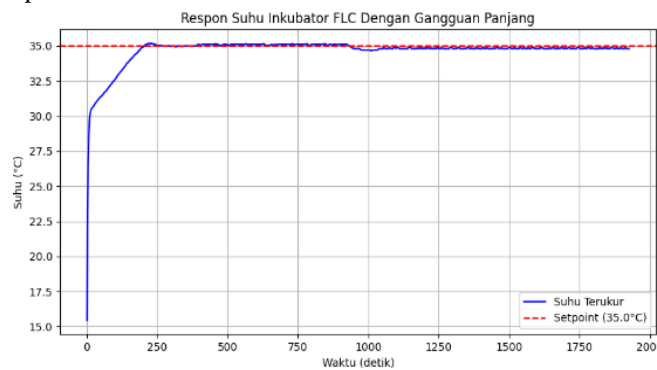
Perbandingan antara siang dan malam hari memperlihatkan pola yang konsisten: nilai *overshoot* pada malam hari secara umum lebih rendah rata-rata 0,91% dibandingkan siang hari rata-rata 1,54%. Hal ini disebabkan oleh gradien suhu awal yang lebih besar pada malam hari, sehingga sistem membutuhkan waktu lebih lama untuk mencapai *setpoint* tetapi dengan momentum termal yang lebih terkontrol.

3.3. Pengujian dengan Gangguan Eksternal

Pengujian ketahanan sistem dilakukan dengan dua jenis gangguan berupa pembukaan pintu inkubator, yang dianalisis secara kualitatif berdasarkan grafik respons Gambar 4 dan Gambar 5.

3.3.1 Gangguan Berkepanjangan

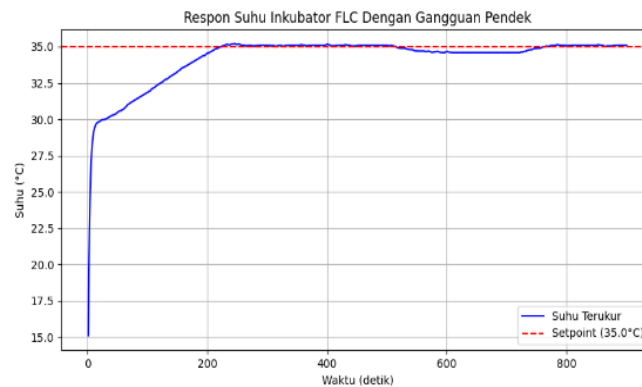
Pengujian berlangsung selama 3600 detik. Pada fase 0–1800 detik, inkubator beroperasi normal dan suhu terjaga stabil di sekitar setpoint. Pada detik ke-1800, pintu inkubator dibuka sepenuhnya selama 1800 detik. Grafik menunjukkan penurunan suhu yang signifikan segera setelah gangguan diberikan, akibat pertukaran kalor antara ruang inkubator dan lingkungan luar yang bersuhu lebih rendah. Meskipun demikian, sistem FLC terbukti merespons gangguan tersebut dengan mengaktifkan heater secara maksimal untuk mengejar kembali nilai setpoint. Kemampuan pemulihan ini menunjukkan robustness sistem terhadap gangguan termal bersifat persisten.



Gambar 4. Respons Suhu Inkubator dengan Gangguan panjang

3.3.2 Gangguan Sesaat

Pada kondisi ini, inkubator diuji setelah sistem mencapai *steady-state*. Pintu inkubator kemudian dibuka selama 120 detik. Grafik respons memperlihatkan penurunan suhu yang cukup signifikan selama periode gangguan, diikuti pemulihan bertahap oleh sistem FLC menuju setpoint setelah pintu ditutup kembali. Karakteristik pemulihan ini membuktikan bahwa FLC mampu beradaptasi terhadap perubahan kondisi transien yang bersifat sementara, dan kembali ke kondisi stabil dalam waktu yang wajar.



Gambar 5. Respons Suhu Inkubator dengan Gangguan sesaat

3.4. Diskusi: Novelty dan Kontribusi Penelitian

Penelitian ini memberikan tiga kontribusi ilmiah yang membedakannya dari studi-studi sebelumnya. **Pertama**, pendekatan FLC-like PID dengan penyetulan fungsi keanggotaan berbasis Ziegler-Nichols menyediakan prosedur yang *reproducible* dan terstruktur, berbeda dari pendekatan *trial and error* yang dominan dalam literatur. **Kedua**, evaluasi sepuluh parameter unjuk kerja secara simultan mencakup domain transien (*rise time*, *overshoot*, *settling time*), akumulasi error (IAE, ITAE), dan akurasi/stabilitas (RMSE, σ) memberikan profil karakteristik sistem yang lebih komprehensif dibandingkan studi sebelumnya yang umumnya hanya melaporkan *steady-state error*. **Ketiga**, pengujian pada dua kondisi lingkungan siang dan malam hari serta dua jenis gangguan eksternal menghasilkan pemahaman tentang sensitivitas sistem terhadap perubahan kondisi operasi, yang merupakan aspek penting untuk aplikasi lapangan di peternakan.

Kombinasi 1 pada penelitian ini menghasilkan *steady-state error* sebesar 0,20% atau $-0,070^{\circ}\text{C}$ dari setpoint 35°C dengan *settling time* 3,20 menit menunjukkan peningkatan performa yang signifikan, meskipun perbandingan langsung perlu mempertimbangkan perbedaan platform perangkat keras dan ukuran ruang inkubator. Kelebihan Arduino Uno sebagai platform terbuka dan berbiaya rendah dibandingkan PLC yang digunakan oleh Eltaieb & Çelik [18] juga memperluas aksesibilitas solusi ini bagi peternak skala kecil.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem pengendalian suhu inkubator ayam berbasis FLC dengan pendekatan FLC-like PID menggunakan penyetelan Ziegler-Nichols pada platform Arduino Uno. Berdasarkan pengujian terhadap empat konfigurasi fungsi keanggotaan dan analisis sepuluh parameter unjuk kerja, dapat disimpulkan sebagai berikut: Keempat kombinasi FLC mampu mengendalikan suhu inkubator menuju setpoint 35°C dengan nilai maximum overshoot di bawah 2%, yang merupakan batas toleransi aman untuk pemeliharaan anak ayam fase brooding. Pada kondisi tanpa gangguan malam hari, Kombinasi 1 menghasilkan unjuk kerja terbaik secara menyeluruh: maximum overshoot 0,75%, rise time 136s, *steady state error* $-0,070^{\circ}\text{C}$; IAE 787,27; ITAE 186.650, dan RMSE 0,0808. Kombinasi 1 direkomendasikan untuk aplikasi operasional.

Pada kondisi tanpa gangguan siang hari, Kombinasi 4 unggul dalam hal kecepatan respons *rise time* 61s, *settling time* 109s dan akurasi RMSE 0,1036, namun dengan nilai IAE yang lebih besar, sehingga cocok untuk skenario yang mengutamakan kecepatan. Sistem FLC terbukti *robust* terhadap gangguan eksternal. Pada gangguan sesaat 120s maupun gangguan berkepanjangan 1800s, sistem berhasil memulihkan suhu menuju *setpoint*, membuktikan kemampuan adaptif FLC terhadap perubahan kondisi termal.

Pendekatan FLC-like PID berbasis Ziegler-Nichols memberikan prosedur penyetelan yang terstruktur dan dapat direplikasi, menjadi kontribusi metodologis yang membedakan penelitian ini dari pendekatan *trial and error* yang umum. Untuk penelitian lanjutan, disarankan mengintegrasikan pengendalian kelembaban, mengujikan kendali adaptif berbasis penguatan jadwal (*gain scheduling*), serta memperluas *platform* ke sistem terdistribusi untuk pemantauan jarak jauh.

DAFTAR PUSAKA

- [1] R. Fatmaningsih and K. Nova, "PERFORMA AYAM PEDAGING PADA SISTEM BROODING KONVENSIONAL DAN THERMOS," *Jurnal Ilmiah Peternakan Terpadu*, vol. 4, no. 3, pp. 222–229, Sep. 2016, Accessed: Jun. 08, 2026. [Online]. Available: <https://jurnal.fp.unila.ac.id/index.php/JIPT/article/view/1281/1178>
- [2] A. Donkoh, "Ambient temperature: a factor affecting performance and physiological response of broiler chickens," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 33, no. 4, pp. 259–265, 1989, doi: 10.1007/BF01051087.
- [3] D. D. Bell and W. D. Weaver, "Commercial Chicken Meat and Egg Production: 5th Edition," *Journal of Applied Poultry Research*, vol. 11, no. 2, pp. 224–225, Jul. 2002, doi: 10.1093/japr/11.2.224.
- [4] F. Fattahi, I. Lahlouh, A. Elakkary, and N. Sefiani, "Grey Wolf Optimizer Based PID/Multi-Loop Controller for the Egg Incubator System," *International Review of Automatic Control (IREACO)*, vol. 14, no. 4, p. 233, Jul. 2021, doi: 10.15866/ireaco.v14i4.20675.
- [5] M. Shamsuzzoha, *PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes*. IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.100749.
- [6] S. Shafiudin and N. Kholis, "Sistem Monitoring dan Pengontrolan Temperatur Pada Inkubator Penetas Telur Berbasis PID," *Jurusan Teknik Elektro*, vol. 6, no. 3, pp. 175–184, 2017, Accessed: Jun. 08, 2026. [Online]. Available: <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jurnal-teknik-elektro/article/view/19932/18237>
- [7] M. S. Hadi, S. Ubaidilah, R. A. P. Sari, and D. P. Fatmala, "Sistem kendali otomatis mesin penetas telur menggunakan kontroler PID," *TEKNO*, vol. 27, no. 2, p. 116, Jul. 2019, doi: 10.17977/um034v27i2p116-124.
- [8] F. Fattahi, I. Lahlouh, A. Elakkary, and N. Sefiani, "Grey Wolf Optimizer Based PID/Multi-Loop Controller for the Egg Incubator System," *International Review of Automatic Control (IREACO)*, vol. 14, no. 4, p. 233, Jul. 2021, doi: 10.15866/ireaco.v14i4.20675.
- [9] A. J. Taufiq, "Kontrol PID Pengaturan Temperatur Inkubator Sebagai Sarana Belajar Kontroler PID Digital," Isfanari, Ed., Mataram: FGTD PTM VIII, Oct. 2017, p. 8. Accessed: Feb. 12, 2025. [Online]. Available: <https://drive.google.com/file/d/12TXCyBbCOIZ9ajEvuppoYHtMjt-NucMr/view>
- [10] N. Hu, "The Limitations of Traditional PID Controllers and Modern Optimization Methods," *Applied and Computational Engineering*, vol. 147, no. 1, pp. 238–244, May 2025, doi: 10.54254/2755-2721/2025.22912.
- [11] H. H. Tang and N. S. Ahmad, "Fuzzy logic approach for controlling uncertain and nonlinear systems: a comprehensive review of applications and advances," *Systems Science & Control Engineering*, vol. 12, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1080/21642583.2024.2394429.

- [12] A. Pramudito and P. W. Rusimamto, "Analisis dan Simulasi Sistem Kontrol Suhu Otomatis Berbasis Fuzzy Logic," *JURNAL TEKNIK ELEKTRO*, vol. 14, no. 1, pp. 43–47, Jul. 2024, doi: 10.26740/jte.v14n1.p43-47.
- [13] M. Kharrat and P. Mercorelli, "A Comprehensive Review of Adaptive Control for Nonlinear Systems with Nonlinearities and Faults Using Fuzzy Logic and Neural Network Techniques," *Mathematics*, vol. 14, no. 8, p. 1256, Apr. 2026, doi: 10.3390/math14081256.
- [14] D. Bao, X. Liang, S. S. Ge, Z. Hao, and B. Hou, "A framework of adaptive fuzzy control and optimization for nonlinear systems with output constraints," *Inf. Sci. (N. Y.)*, vol. 616, pp. 411–426, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.ins.2022.10.118.
- [15] T. Zhang, S. S. Ge, and C. C. Hang, "Adaptive neural network control for strict-feedback nonlinear systems using backstepping design," *Automatica*, vol. 36, no. 12, pp. 1835–1846, Dec. 2000, doi: 10.1016/S0005-1098(00)00116-3.
- [16] M. Eltaleb and H. Çelik, "PLC Controlled Fuzzy Logic-Based Egg Hatching Machine," *Turkish Journal of Science and Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 339–350, Sep. 2024, doi: 10.55525/tjst.1427300.
- [17] P. Dutta and N. Anjum, "Optimization of Temperature and Relative Humidity in an Automatic Egg Incubator Using Mamdani Fuzzy Inference System," in *2021 2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, IEEE, Jan. 2021, pp. 12–16. doi: 10.1109/ICREST51555.2021.9331155.
- [18] M. Eltaleb and H. Çelik, "PLC Controlled Fuzzy Logic-Based Egg Hatching Machine," *Turkish Journal of Science and Technology*, vol. 19, no. 2, pp. 339–350, Sep. 2024, doi: 10.55525/tjst.1427300.