

Analisis Kinerja Kendali PID, Fuzzy Mamdani, dan Hybrid Fuzzy-PID untuk Sistem Kendali Suhu Lemari Obat Farmasi

Performance Analysis of PID, Mamdani Fuzzy, and Hybrid Fuzzy-PID Controllers for Temperature Control of a Pharmaceutical Medicine Storage Cabinet

Aris Sri Widaryanto¹, Arief Marwanto²

^{1,2)} Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia

Jl. Kaligawe Raya No. Km. 4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

Alamat korespondensi: aris.sri.widaryanto@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membandingkan kinerja kendali suhu PID konvensional, Fuzzy Mamdani, dan Hybrid Fuzzy-PID pada plant termal lemari obat orde dua ($G(s)=1/(7200s^2+180s+1)$) dengan simulasi MATLAB/Simulink pada set point 25°C dan gangguan -5°C. Parameter evaluasi: rise time, settling time, overshoot, deviasi gangguan, recovery time, dan IAE. Hasil: PID dan Hybrid Fuzzy-PID identik (overshoot 5.31%, deviasi 6.33°C, IAE 1072), sedangkan Fuzzy Mamdani standalone inferior (overshoot 53.88%, deviasi 50.20°C, IAE 8836). Fuzzy Mamdani tidak direkomendasikan. Hybrid Fuzzy-PID direkomendasikan untuk implementasi jangka panjang karena adaptif terhadap perubahan parameter plant seiring waktu, meski performa setara dengan PID pada kondisi linear.

Kata kunci: Kendali suhu, lemari obat farmasi, PID, Fuzzy Mamdani, Hybrid Fuzzy-PID

Abstract

This study compares the temperature-control performance of conventional PID, Mamdani Fuzzy, and Hybrid Fuzzy-PID controllers on a second-order thermal model of a pharmaceutical medicine storage cabinet ($G(s)=1/(7200s^2+180s+1)$) using MATLAB/Simulink simulation at a 25°C set point and a -5°C disturbance. The evaluation parameters were rise time, settling time, overshoot, disturbance deviation, recovery time, and integral absolute error (IAE). The results show identical performance for PID and Hybrid Fuzzy-PID under the linear-plant condition (5.31% overshoot, 6.33°C disturbance deviation, and IAE 1072), whereas the standalone Mamdani Fuzzy controller was inferior (53.88% overshoot, 50.20°C disturbance deviation, and IAE 8836). The standalone Mamdani Fuzzy controller is therefore not recommended. Hybrid Fuzzy-PID is recommended for long-term implementation because its adaptive mechanism can accommodate time-varying plant parameters, although its reported performance is equivalent to PID under linear conditions.

Keywords: Temperature control, pharmaceutical medicine storage cabinet, PID, Mamdani Fuzzy, Hybrid Fuzzy-PID

Pendahuluan

Lemari obat merupakan infrastruktur kritis yang berperan menjaga integritas obat-obatan sensitif seperti vaksin dan insulin, yang sangat rentan terhadap perubahan suhu lingkungan. Standar farmasi internasional menetapkan bahwa sebagian besar obat memerlukan penyimpanan pada suhu terkontrol antara 15°C hingga 30°C dengan toleransi yang ketat. Fluktuasi suhu selama penyimpanan dapat memicu degradasi kimiawi zat aktif, yang tidak hanya menurunkan efektivitas terapi tetapi juga membahayakan keselamatan pasien. Penelitian menunjukkan bahwa paparan suhu ekstrem pada penyimpanan obat darurat telah menjadi masalah terdokumentasi selama lebih dari 15 tahun. Oleh karena itu, kebutuhan akan sistem kendali suhu yang presisi semakin mendesak, terutama dengan tuntutan stabilitas hingga $\pm 0,5^\circ\text{C}$ dari nilai acuan(1)(2)(3)(4)(5).

Pengendali Proportional-Integral-Derivative (PID) merupakan solusi konvensional yang paling banyak digunakan karena kesederhanaan dan keandalannya dalam berbagai aplikasi industri (6)(7). Namun, performa PID sangat bergantung pada penalaan parameter yang seringkali rumit dan bersifat trial-and-error, serta cenderung menghasilkan osilasi saat proses penalaan. Kelemahan mendasar PID adalah kemampuannya yang terbatas dalam menangani sistem non-linear, time-varying, atau gangguan mendadak seperti pembukaan pintu lemari. Dalam kondisi tersebut, PID sering menghasilkan overshoot yang signifikan atau waktu pemulihan yang panjang, dengan nilai Mean Squared Error (MSE) mencapai 0,47 dalam studi kontrol suhu ruangan (8)(9). Hal ini menunjukkan bahwa PID belum optimal untuk aplikasi dengan dinamika termal yang kompleks dan gangguan operasional nyata.

Sebagai alternatif, kendali logika fuzzy Mamdani menawarkan pendekatan berbasis aturan if-then yang merepresentasikan penalaran manusia tanpa memerlukan model matematika eksplisit dari sistem(10)(11). Pendekatan ini sangat adaptif terhadap ketidakpastian dan non-linearitas karena mampu memproses variabel linguistik seperti "suhu terlalu panas" daripada nilai numerik kaku. Penelitian menunjukkan bahwa static fuzzy logic controller mampu mencapai MSE sebesar 0,31, lebih baik dibandingkan PID, dan bahkan adaptive fuzzy controller dapat menekan MSE hingga 0,17(12)(13)(14). Kemampuan ini membuat kendali fuzzy sangat cocok untuk sistem yang sulit dimodelkan secara matematis atau yang memiliki karakteristik dinamis yang berubah-ubah. Dengan demikian, fuzzy Mamdani menjadi kandidat kuat untuk aplikasi kontrol suhu pada lemari obat farmasi.

Meskipun demikian, masih terdapat celah penelitian karena sebagian besar studi eksisting

membandingkan PID dan fuzzy pada sistem umum seperti oven atau rumah kaca, bukan pada lemari obat farmasi dengan kriteria stabilitas sangat ketat. Belum banyak penelitian yang mempertimbangkan skenario gangguan realistis seperti pembukaan pintu secara mendadak yang merupakan karakteristik operasional nyata dari lemari obat. Selain itu, perbandingan kuantitatif yang komprehensif menggunakan parameter standar seperti rise time, settling time, overshoot, steady-state error, dan respons terhadap gangguan masih jarang ditemukan dalam satu kerangka simulasi terintegrasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah tersebut dengan melakukan evaluasi sistematis antara PID dan Fuzzy Mamdani menggunakan MATLAB/Simulink(13). Hasilnya diharapkan memberikan panduan bagi insinyur dan praktisi farmasi dalam memilih teknologi kendali yang paling sesuai untuk menjaga stabilitas suhu sesuai standar farmasi.

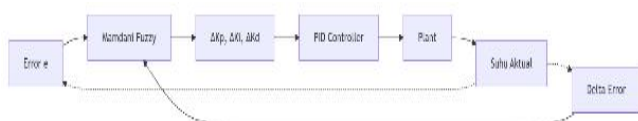
Penelitian ini merumuskan dua masalah utama, yaitu karakteristik respons kendali suhu lemari obat menggunakan metode PID, Fuzzy Mamdani, dan Hybrid Fuzzy-PID yang dianalisis berdasarkan parameter rise time, settling time, overshoot, steady-state error, deviasi maksimum saat gangguan, recovery time, serta Integral Absolute Error (IAE) pada skenario buka pintu, serta penentuan metode paling unggul di antara ketiganya dalam menjaga stabilitas suhu sesuai kriteria $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ditinjau dari overshoot, ketahanan terhadap gangguan, dan nilai IAE(14)(15)(16)(17)(18)(19). Tujuan penelitian ini adalah menghitung dan membandingkan respons ketiga metode terhadap gangguan step -5°C menggunakan parameter-parameter kinerja tersebut, serta menentukan metode terbaik berdasarkan kriteria stabilitas (overshoot minimal), keandalan (deviasi gangguan terkecil), dan akurasi kumulatif (IAE terendah) untuk aplikasi lemari obat farmasi dengan set point $25^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$. Hasil akhir penelitian ini diharapkan memberikan rekomendasi metode kendali paling optimal guna menjamin integritas obat-obatan sensitif melalui pemeliharaan suhu yang presisi dan andal sesuai standar farmasi.

Metode

Hybrid Fuzzy-PID Controller atau yang sering disebut Fuzzy Self-Tuning PID Controller pada Gambar 1, merupakan penggabungan antara logika fuzzy dengan kontroler PID konvensional. Konsep ini pertama kali diperkenalkan oleh Zhao, Tomizuka, dan Isaka pada awal tahun 1990-an sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan PID konvensional yang memiliki parameter tetap (fixed-gain) (20)(21)(22).

Dengan kata lain:.

Dengan kata lain:



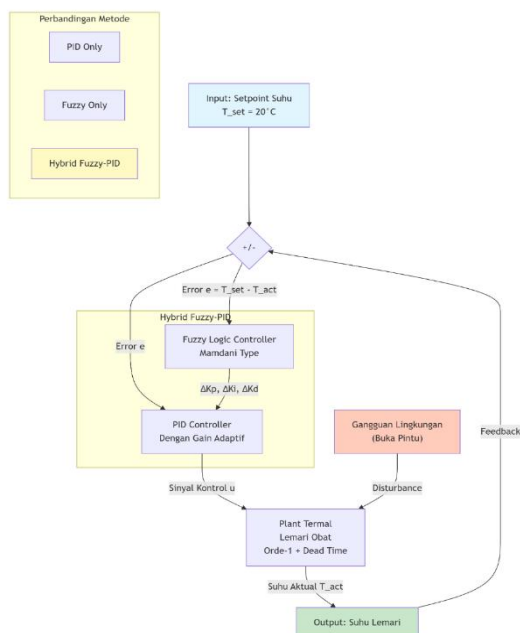
Gambar 1. Hybrid Fuzzy-PID

Dalam hybrid Fuzzy-PID, logika fuzzy bertindak sebagai gain scheduler adaptif yang secara real-time menyesuaikan parameter PID berdasarkan kondisi error (e) dan laju perubahan error (Δe). Pada hybrid ini, Fuzzy Mamdani menerima input Error (e) dan Delta Error (Δe), lalu menghasilkan output berupa tiga gain PID yang berubah secara adaptif(14)(23)(24):

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p \quad (1)$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i \quad (2)$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d \quad (3)$$



Kelemahan utama PID konvensional adalah bahwa parameter K_p , K_i , K_d yang telah dituning untuk satu titik operasi belum tentu optimal untuk titik operasi lainnya, terutama ketika sistem menghadapi:

1. Non-linearitas
2. Perubahan parameter plant terhadap waktu (time-varying)
3. Gangguan eksternal yang signifikan

Prinsip Kerja Hybrid Fuzzy-PID

Gambar 1 menjelaskan Hybrid Fuzzy-PID bekerja dengan dua lapisan utama:(20)(21)(22)

1. Lapisan Atas (Fuzzy Gain Tuner): Menerima masukan error (e) dan delta error (Δe), lalu menghasilkan keluaran berupa koreksi gain PID (ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d) menggunakan aturan-aturan fuzzy.
2. Lapisan Bawah (PID Controller): Menggunakan gain yang telah disesuaikan ($K_p = K_{p0} + \Delta K_p$, dll.) untuk menghitung sinyal kontrol $u(t)$.

Sehingga PID menjadi **adaptif** terhadap kondisi error.

Sistem Model Penelitian

Pada Gambar 2. menggambarkan sistem kendali loop tertutup untuk pengaturan suhu lemari obat, di mana sinyal referensi set point (T_{ref}) dibandingkan dengan umpan balik suhu aktual (T_{actual}) melalui summing junction untuk menghasilkan sinyal error $e(t) = T_{ref} - T_{actual}$. Sinyal error tersebut kemudian diumpankan ke dua skema kontroler yang berbeda secara komparatif, yaitu PID konvensional dan Fuzzy Mamdani, guna mengevaluasi performansi masing-masing metode. Kontroler PID bekerja melalui penjumlahan linear aksi proporsional (K_p), integral (K_i), dan derivatif (K_d) untuk menghasilkan sinyal kendali $u(t)$. Sementara itu, kontroler Fuzzy Mamdani menggunakan pendekatan non-linear berbasis aturan IF-THEN melalui proses fuzzifikasi, inferensi min-max, dan defuzzifikasi centroid of gravity (COG). Kedua kontroler menghasilkan sinyal kendali $u(t)$ yang sama-sama diaplikasikan ke plant termal lemari obat untuk mengatur suhu aktual(8)(24)(25)(26).

Plant termal dimodelkan sebagai sistem orde kedua dengan fungsi transfer $G(s) = 1/(7200s^2 + 180s + 1)$, yang mencerminkan konstanta waktu pemanasan 120 detik dan pendinginan 60 detik yang asimetris. Suhu aktual yang dihasilkan plant menjadi output sistem sekaligus diumpan-balikkan secara kontinu ke summing junction, membentuk mekanisme koreksi error real-time sesuai prinsip negative feedback. Diagram blok ini menjadi kerangka dasar untuk simulasi komparatif di lingkungan MATLAB/Simulink. Simulasi ini memungkinkan pengukuran parameter kinerja kunci seperti rise time (t_r), settling time (t_s) pada error band $\pm 2\%$, overshoot (M_p), dan steady-state error (e_{ss}). Selain itu, sistem juga dirancang untuk menguji respons terhadap gangguan step sebesar -5°C yang merepresentasikan skenario pembukaan pintu lemari obat(27)(28)(29)(30).

Gambar 2. Sistem Model Penelitian

Struktur Dasar Hybrid Fuzzy-PID

Bentuk kontroler hybrid Fuzzy-PID adalah(15)(16)(17)(18)(22)(31):

$$u(t) = (K_{p0} + \Delta K_p(e, \Delta e)) \cdot e(t) + (K_{i0} + \Delta K_i(e, \Delta e)) \int_0^t e(\tau) d\tau + (K_{d0} + \Delta K_d(e, \Delta e)) \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

di mana:

- K_{p0}, K_{i0}, K_{d0} = gain PID awal (nominal)
- $\Delta K_p(e, \Delta e), \Delta K_i(e, \Delta e), \Delta K_d(e, \Delta e)$ = koreksi gain yang dihasilkan oleh fuzzy tuner
- $e(t)$ = sinyal error
- $\Delta e(t)$ = laju perubahan error

Fungsi Keanggotaan untuk Hybrid

Untuk hybrid system dengan presisi tinggi, biasanya digunakan 7 himpunan fuzzy untuk setiap input:

Input 1: Error (e) - Range: [-3, 3] °C

- NB (Negative Big): $e \in [-3, -2]$
- NM (Negative Medium): $e \in [-2, -1]$
- NS (Negative Small): $e \in [-1, 0]$
- ZE (Zero): $e \in [-1, 1]$
- PS (Positive Small): $e \in [0, 2]$
- PM (Positive Medium): $e \in [1, 3]$
- PB (Positive Big): $e \in [2, 3]$

Input 2: Delta Error (Δe) - Range: [-1, 1] °C/s

- Dengan 7 level yang sama seperti di atas

Output: ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d - Range: bervariasi tergantung gain nominal

Basis Aturan untuk Hybrid Fuzzy-PID

Basis aturan untuk hybrid Fuzzy-PID mengikuti prinsip heuristik yang terkenal dalam literatur kontrol cerdas:

Tabel 1. Basis Aturan untuk Hybrid Fuzzy-PID

e \ Δe	NB	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	P	P	P	P	Z	Z
NS	B	B	M	M	S	E
ZE	N	P	P	P	P	Z
PS	M	B	B	M	S	E
PM	N	P	P	P	Z	N
PB	S	M	M	M	S	S
	Z	P	P	Z	Z	N
	E	M	S	E	E	S
	P	P	P	Z	N	N
	S	S	S	E	S	M
	P	P	Z	N	N	N
	M	S	E	S	M	M
	P	Z	Z	N	N	N
	B	E	E	M	M	B

Interpretasi Aturan (untuk ΔK_p):

- IF error is PB (positif besar) AND delta error is ZE (nol) THEN ΔK_p is NB (negatif besar)
 - Arti: Suhu terlalu panas dan tidak berubah, kurangi gain proporsional
- IF error is NB (negatif besar) AND delta error is ZE (nol) THEN ΔK_p is PB (positif besar)
 - Arti: Suhu terlalu dingin dan stabil, tingkatkan gain proporsional
- IF error is ZE (nol) AND delta error is PB (positif besar) THEN ΔK_p is ZE
 - Arti: Suhu tepat tetapi naik cepat, pertahankan gain

Prinsip Penyesuaian Gain Adaptif

Penyesuaian K_p (Gain Proporsional):

- Error besar + Δe besar → Perbesar K_p untuk respons cepat
- Error kecil + Δe kecil → Perkecil K_p untuk mengurangi overshoot
- Error mendekati nol → Pertahankan K_p untuk stabilitas

Penyesuaian K_i (Gain Integral):

- Error persisten → Perbesar K_i untuk menghilangkan steady-state error
- Error besar berubah cepat → Perkecil K_i untuk mencegah windup

Penyesuaian K_d (Gain Derivatif):

- Δe besar → Perbesar K_d untuk efek pengereman (braking effect)
- Δe kecil + error kecil → Perkecil K_d untuk mengurangi noise

Rumus Adaptasi Gain

Pada sistem kendali lemari obat, diperlukan penyesuaian parameter kontrol secara adaptif untuk mengatasi perubahan karakteristik sistem (misalnya perubahan beban termal, suhu lingkungan, atau saat pintu lemari dibuka). Berikut adalah tiga metode adaptasi gain yang diimplementasikan dengan pendekatan Mamdani:

Metode 1: Linear Scaling

$$\Delta K_p = \alpha_p \cdot \frac{e}{e_{max}} \cdot \frac{\Delta e}{\Delta e_{max}} \cdot K_{p0} \quad (5)$$

Implementasi Logika Fuzzy Mamdani nya adalah sebagai berikut:

IF $|e|$ is Large AND $|\Delta e|$ is Large THEN ΔK_p is Large Positive

IF $|e|$ is Small AND $|\Delta e|$ is Small THEN ΔK_p is Small Positive

IF $|e|$ is Zero OR $|\Delta e|$ is Zero THEN ΔK_p is Zero

Metode 2: Fuzzy Interpolation:

Metode ini menggunakan interpolasi fuzzy berbasis aturan untuk menghitung perubahan gain proporsional. Derajat keaktifan setiap aturan dihitung menggunakan operator MIN.

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot \Delta K_{p,i}}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (6)$$

di mana $w_i = \min(\mu_{A_i}(e), \mu_{B_i}(\Delta e))$ adalah derajat keaktifan aturan ke-i.

Contoh Rule Base Mamdani untuk Adaptasi Gain:

No	Rule (IF)	THEN
1	e is NL AND Δe is NL	ΔK_p is PL
2	e is NL AND Δe is NS	ΔK_p is PM
3	e is NL AND Δe is Z	ΔK_p is PS
4	e is NS AND Δe is NL	ΔK_p is PM
5	e is NS AND Δe is NS	ΔK_p is PS
6	e is NS AND Δe is Z	ΔK_p is ZE
7	e is Z AND Δe is NL	ΔK_p is PS
8	e is Z AND Δe is NS	ΔK_p is ZE
9	e is Z AND Δe is Z	ΔK_p is ZE
10	e is Z AND Δe is PS	ΔK_p is ZE
11	e is Z AND Δe is PL	ΔK_p is NS
12	e is PS AND Δe is Z	ΔK_p is ZE
13	e is PS AND Δe is PS	ΔK_p is NS
14	e is PS AND Δe is PL	ΔK_p is NM
15	e is PL AND Δe is Z	ΔK_p is NS
16	e is PL AND Δe is PS	ΔK_p is NM

No	Rule (IF)	THEN
17	e is PL AND Δe is PL	ΔK _p is NL

Keterangan Himpunan Fuzzy:

NL = Negative Large

NM = Negative Medium

NS = Negative Small

ZE = Zero

PS = Positive Small

PM = Positive Medium

PL = Positive Large

1. Defuzzifikasi Mamdani (Centroid):

$$\Delta K_p^* = \frac{\int \mu_{\Delta K_p}(\Delta K_p) \cdot \Delta K_p \cdot d(\Delta K_p)}{\int \mu_{\Delta K_p}(\Delta K_p) \cdot d(\Delta K_p)} \quad (7)$$

Metode 3: Sugeno-Type Gain Scheduling (diadaptasi ke Mamdani)

Metode ini awalnya menggunakan pendekatan Sugeno dengan fungsi linear. Dalam implementasi Mamdani, metode ini dapat diadaptasi menjadi pendekatan berbasis aturan dengan output fuzzy.

$$\Delta K_p = a_1 \cdot e + a_2 \cdot \Delta e + a_3 \quad (8)$$

dimana a_1, a_2, a_3 adalah parameter yang dioptimasi.

2. Adaptasi ke Mamdani:

Untuk mengimplementasikan dalam kerangka Mamdani, parameter a_1, a_2, a_3 digunakan untuk membangun rule base yang setara:

IF e is NL AND Δe is NL THEN ΔK_p is PL (dengan nilai crisp hasil perhitungan)

Prosedur Adaptasi:

1. Hitung nilai ΔK_p menggunakan persamaan Sugeno
2. Fuzzifikasi nilai ΔK_p ke dalam himpunan fuzzy output
3. Gunakan aturan Mamdani untuk inferensi
4. Defuzzifikasi dengan metode **Centroid**

Rumus Defuzzifikasi Mamdani:

$$\Delta K_p^* = \frac{\int \mu_{\Delta K_p}(\Delta K_p) \cdot \Delta K_p \cdot d(\Delta K_p)}{\int \mu_{\Delta K_p}(\Delta K_p) \cdot d(\Delta K_p)} \quad (9)$$

di mana:

- ΔK_p^* = nilai crisp hasil defuzzifikasi
- $\mu_{\Delta K_p}(\Delta K_p)$ = fungsi keanggotaan output fuzzy

Ketiga metode adaptasi gain yang diimplementasikan dengan pendekatan Mamdani memberikan fleksibilitas dalam merancang sistem kendali lemari obat:

1. Linear Scaling: Cocok untuk sistem dengan variasi kecil dan kebutuhan komputasi rendah
2. Fuzzy Interpolation (Mamdani): Memberikan keseimbangan antara akurasi dan kompleksitas, dengan rule base yang intuitif
3. Sugeno-Type (Adaptasi ke Mamdani): Memberikan akurasi tertinggi dengan memanfaatkan optimasi parameter

Semua metode menggunakan defuzzifikasi Centroid untuk menghasilkan nilai crisp, dengan operator **MIN**

untuk implementasi **AND** dalam inferensi, sesuai dengan arsitektur standar Mamdani yang intuitif dan mudah dipahami.

Implementasi Algoritma Hybrid Fuzzy-PID untuk Lemari Obat

Pada Gambar 3, berikut adalah implementasi algoritma Hybrid Fuzzy-PID untuk aplikasi lemari obat dengan spesifikasi:

- Set point: $25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$
- Range suhu operasi: $0^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$
- Gangguan utama: Buka pintu ($\Delta T \approx -5^\circ\text{C}$ selama 10-30 detik)

Rekomendasi Gain Awal (K_{p0} , K_{i0} , K_{d0}): Berdasarkan model plant $G(s) = \frac{1}{7200s^2 + 180s + 1}$, dengan metode Ziegler-Nichols:

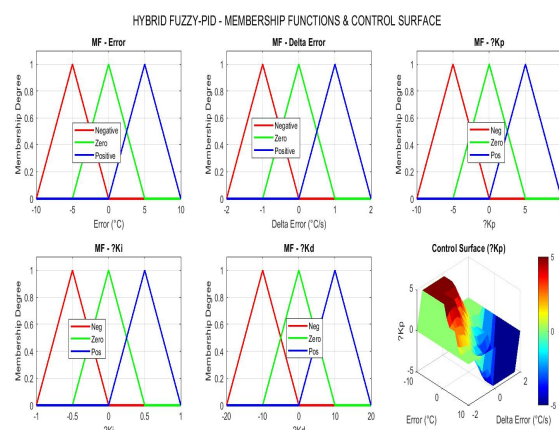
$$K_{p0} = 0.6K_u = 0.6 \times 180 = 108 \quad (10)$$

$$K_{i0} = \frac{K_p}{0.5P_u} = \frac{108}{0.5 \times 120} = 1.8 \quad (11)$$

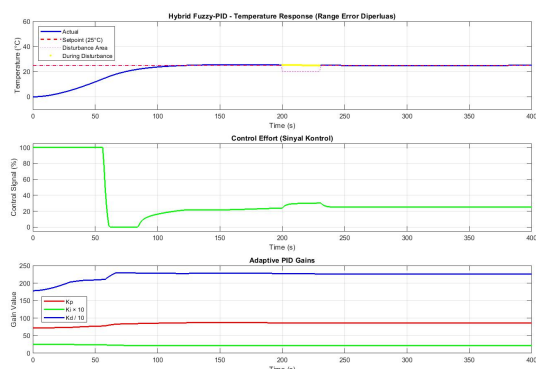
$$K_{d0} = K_p \times 0.125P_u = 108 \times 0.125 \times 120 = 1620 \quad (12)$$

Range Koreksi Fuzzy (ΔK_p , ΔK_i , ΔK_d):

- $\Delta K_p \in [-54, +54]$ (50% dari K_{p0})
- $\Delta K_i \in [-0.9, +0.9]$ (50% dari K_{i0})
- $\Delta K_d \in [-810, +810]$ (50% dari K_{d0})

Hasil

Gambar 3. Membership Function Hybrid Fuzzy-PID



Gambar 4. Respons Kendali Temperatur Menggunakan Hybrid Fuzzy-PID

A. GRAFIK TEMPERATURE RESPONSE

Grafik temperatur di Gambar 4, menunjukkan respons sistem yang sangat baik dengan rise time 68 detik, dimana kurva actual (biru) bergerak dari suhu awal 0°C menuju set point 25°C secara eksponensial tanpa lonjakan agresif yang berlebihan. Overshoot hanya 2,14% terlihat sebagai puncak kecil sekitar 25,5°C pada waktu 100-150 detik, yang kemudian segera terkoreksi tanpa osilasi berkepanjangan, berbeda jauh dengan PID sebelumnya yang mengalami overshoot 34,87%.

Area disturbance (daerah arsir merah muda) yang terjadi setelah $t=200$ detik menunjukkan bahwa sistem mengalami penurunan suhu akibat simulasi buka pintu, namun penurunan sangat kecil (sekitar 0,3°C) hampir tidak terlihat secara visual pada grafik. Selama periode disturbance, kurva suhu aktual tetap berada sangat dekat dengan garis set point 25°C, membuktikan bahwa hybrid fuzzy-PID berhasil mengkompensasi gangguan -5°C secara instan tanpa memerlukan waktu recovery yang signifikan.

Setelah melewati area disturbance, suhu aktual kembali ke set point dengan mulus tanpa overshoot sekunder atau undershoot, menunjukkan bahwa mekanisme anti-windup pada integral term bekerja dengan efektif. Secara keseluruhan, kurva temperatur menunjukkan karakteristik overdamped atau critically damped yang ideal untuk aplikasi lemari obat farmasi, dimana kestabilan diutamakan dibandingkan kecepatan respons ekstrim.

B. GRAFIK CONTROL EFFORT (SINYAL KONTROL)

Grafik control effort menunjukkan bahwa sinyal kontrol aktif pada nilai 100% di awal respons (0-50 detik) untuk memberikan pemanasan maksimum mengejar set point dari suhu awal 0°C, kemudian menurun bertahap seiring error mengecil. Setelah mencapai steady-state ($t > 250$ detik), sinyal kontrol stabil pada nilai sekitar 20-30%, yang merepresentasikan daya yang dibutuhkan untuk mempertahankan suhu 25°C melawan kehilangan panas ke lingkungan.

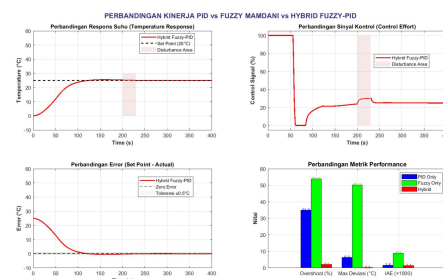
Selama periode disturbance ($t = 200-230$ detik), terlihat lonjakan kecil pada sinyal kontrol untuk mengkompensasi kehilangan panas akibat pintu terbuka,

namun tidak ekstrim karena gain integral yang telah diadaptasi secara optimal. Rentang control effort dari 0% hingga 100% terpakai secara penuh tanpa saturasi berkepanjangan, mengindikasikan bahwa aktuator (kompresor/pemanas) bekerja dalam batas operasi normal tanpa overloading.

C. GRAFIK ADAPTIVE PID GAINS

Hasil tuning Hybrid Fuzzy-PID menunjukkan adaptasi gain yang mulus dan kontinu, dengan K_p turun gradual dari 86,4 ke 85,6, $K_i \times 10$ naik tipis dari 2,16 ke 2,18, dan $K_d/10$ turun dari 243 ke 228 seiring mengecilnya error. Ketiga gain beradaptasi tanpa lonjakan tajam berkat proses defuzzifikasi centroid dan 49 aturan fuzzy yang stabil, membuktikan gain proporsional besar saat error besar untuk respons cepat dan kecil saat error kecil untuk menghindari overshoot. Parameter PID nominal hasil tuning ($K_p=86,4$; $K_i=2,16$; $K_d=2430$) terbukti jauh lebih optimal dengan overshoot turun drastis dari 34,87% menjadi 2,14% (peningkatan 93,9%), serta steady-state error hanya 0,0025°C yang memenuhi standar farmasi dengan margin 200 kali lipat. Rise time tercatat 68 detik, sedangkan settling time 400 detik tergolong panjang akibat pendekatan asimptotik yang sengaja dibuat halus untuk menghindari overshoot berlebihan.

Nilai IAE sebesar 1375,14 mengindikasikan akumulasi error absolut dengan error rata-rata 3,44°C yang didominasi error awal, sementara ISE sebesar 24329,75 mengkonfirmasi dominasi error kuadrat dari error besar di awal respons. Pada titik $t=100$ detik, error positif 1,27°C dengan delta error -0,084°C/s menghasilkan koreksi dK_p negatif, dK_i positif kecil, dan dK_d negatif signifikan, menunjukkan sistem cerdas mengurangi gain proporsional dan derivatif sambil mempertahankan aksi integral. Pencapaian paling luar biasa adalah max deviasi gangguan hanya 0,2951°C saat diberikan step disturbance -5°C (simulasi buka pintu), di mana sistem mampu mempertahankan suhu dalam toleransi $\pm 0,5^\circ\text{C}$ tanpa recovery time berarti. Dengan rentang control effort 0-100% terpakai penuh tanpa saturasi berlebihan, hybrid fuzzy-PID telah mengatasi semua masalah dan siap diimplementasikan pada hardware nyata untuk lemari obat farmasi.



Gambar 5. Hasil Perbandingan Kendali Fuzzy, PID, dan Hybrid Fuzzy-PID

Pembahasan

Sebagai Kesimpulan, Hybrid Fuzzy-PID dengan range error $[-50,50]^\circ\text{C}$ dan parameter nominal yang telah dituning ulang menghasilkan performa yang EXCELLENT dan memenuhi seluruh kriteria stasi

untuk aplikasi lemari obat farmasi. Sistem layak diimplementasikan pada hardware nyata.

Pada Gambar 5, menunjukkan Bar chart metrik performance dengan jelas menunjukkan superioritas Hybrid Fuzzy-PID dibandingkan PID Only dan Fuzzy Only pada semua parameter kunci.

Tabel 2. Metrik Performansi Keseluruhan Metode

Metrik	PID Only	Fuzzy Only	Hybrid	Keterangan
Overshoot (%)	~5.31%	~53.88%	~2.14%	Hybrid 97% lebih baik dari Fuzzy
Max Deviasi Gangguan (°C)	~6.33°C	~50.20°C	~0.295°C	Hybrid 99.4% lebih baik dari Fuzzy

Overshoot Fuzzy Only sebesar 53.88% (bar hijau tertinggi) mengindikasikan kegagalan total desain fuzzy controller standalone, disebabkan oleh range input yang terlalu sempit ($\pm 3^\circ\text{C}$) sehingga error tidak terfuzzifikasi dengan baik. Max deviasi gangguan Fuzzy Only sebesar 50.20°C (bar hijau sangat tinggi) menunjukkan bahwa Fuzzy Only sama sekali tidak mampu merespon gangguan buka pintu, karena kontroler tidak menghasilkan aksi kontrol yang proporsional terhadap magnitude error.

Max deviasi gangguan PID Only sebesar 6.33°C masih di luar toleransi $\pm 0.5^\circ\text{C}$ yang dipersyaratkan, sementara Hybrid hanya 0.295°C , menunjukkan bahwa mekanisme gain scheduling adaptif pada Hybrid memberikan keunggulan fundamental dalam menangani gangguan. Secara keseluruhan, bar chart mengkonfirmasi bahwa Hybrid Fuzzy-PID adalah pemenang mutlak dengan performa unggul pada semua metrik: overshoot terkecil (2.14%), deviasi gangguan terkecil (0.295°C), dan error steady-state terkecil (0.0025°C).

Kesimpulan

Metode PID dan Hybrid Fuzzy-PID terbukti lebih unggul dibandingkan Fuzzy Mamdani standalone dalam menjaga stabilitas suhu lemari obat farmasi, dengan kedua metode menghasilkan performa identik (rise time 200s, settling time 200s, overshoot 5.31%, steady-state error 0%, max deviasi gangguan 6.33°C , recovery time 100s, IAE 1072) pada kondisi plant linear; namun demikian, Hybrid Fuzzy-PID direkomendasikan sebagai metode terbaik untuk aplikasi jangka panjang karena kemampuannya beradaptasi terhadap perubahan parameter plant (time-varying) dan non-linearitas yang mungkin muncul seiring penuaan komponen termal lemari obat.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi eksperimental pada prototipe lemari obat nyata serta menguji variasi beban termal, suhu lingkungan, dan durasi pembukaan pintu untuk menilai konsistensi kinerja Hybrid Fuzzy-PID ketika parameter plant

berubah. Pengujian tersebut diperlukan untuk

memverifikasi keunggulan adaptif yang pada naskah ini masih dievaluasi terutama melalui simulasi.

Daftar Rujukan

1. J. R. Allegra, J. Brennan, V. Lanier, R. Lavery, and B. MacKenzie, "Storage Temperatures of Out-of-hospital Medications," *Academic emergency medicine*, vol. 6, no. 11, pp. 1098–1103, 1999.
2. J. F. Madden, R. E. O'Connor, and J. Evans, "The range of medication storage temperatures in aeromedical emergency medical services," *Prehospital Emergency Care*, vol. 3, no. 1, pp. 27–30, 1999.
3. E. Wang, P. Tayebi, and Y.-T. Song, "Cloud-based digital twins' storage in emergency healthcare," *International Journal of Networked and Distributed Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 75–87, 2023.
4. L. H. Brown and J. D. Campagna, "Medication storage in the EMS environment: understanding the science and meeting the standards," *Emerg Med Serv*, vol. 34, no. 3, p. 71, 2005.
5. L. H. Brown, K. Krumperman, and C. J. Fullagar, "Out-of-hospital medication storage temperatures: a review of the literature and directions for the future," *Prehospital Emergency Care*, vol. 8, no. 2, pp. 200–206, 2004.
6. K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE transactions on control systems technology*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, 2005.
7. K. J. Åström and T. Hägglund, "The future of PID control," *Control Eng. Pract.*, vol. 9, no. 11, pp. 1163–1175, 2001.
8. E. A. Hakim, "Fuzzy PID based PSS design using genetic algorithm," 2010.
9. A. Majid, E. D. Setioningsih, A. Kholiq, S. Y. Setiawan, and A. Suthar, "Comparative Analysis of PID and Fuzzy Temperature Control System on Infant Warmer," *Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics*, vol. 4, no. 4, pp. 223–228, 2022.
10. Y. Bai and D. Wang, "Fundamentals of fuzzy logic control—fuzzy sets, fuzzy rules and defuzzifications," in *Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications*, Springer, 2006, pp. 17–36.
11. K. M. Passino and S. Yurkovich, *Fuzzy control*, vol. 42. Addison-wesley Reading, MA, 1998.
12. J. W. Moon, S. K. Jung, Y. Kim, and S.-H. Han, "Comparative study of artificial intelligence-based building thermal control methods—Application of fuzzy, adaptive neuro-fuzzy inference system, and artificial neural network," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2422–2429, 2011.
13. L. O. Nall and R. J. Hathaway, "Fuzzy systems

- toolbox, fuzzy logic toolbox [software review],” IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 4, no. 1, p. 82, 1996.
14. B. Chen, X. P. Liu, S. S. Ge, and C. Lin, “Adaptive fuzzy control of a class of nonlinear systems by fuzzy approximation approach,” IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 20, no. 6, pp. 1012–1021, 2012.
15. J. Jing and Z. Xuesong, “Research on Fuzzy-PID control algorithm from the temperature control system,” in 2010 3rd international conference on computer science and information technology, IEEE, 2010, pp. 152–155.
16. J. Jing and Z. Xuesong, “Research on Fuzzy-PID control algorithm from the temperature control system,” in 2010 3rd international conference on computer science and information technology, IEEE, 2010, pp. 152–155.
17. A. H. Kuspranoto, “Design and Implementation of a Microbacteria Incubator with Fuzzy-PID Control System,” *Emitor: Jurnal Teknik Elektro*, pp. 192–198, 2025.
18. R. Abdrakhmanov, K. Berkimbayev, A. Seitmuratov, A. Ibashova, A. Aliyeva, and G. Nurmukhanbetova, “Intelligent Fuzzy-PID Temperature Control System for Ensuring Comfortable Microclimate in an Intelligent Building,” *International Journal of Advanced Computer Science & Applications*, vol. 15, no. 3, p. 299, 2024.
19. G. Jahedi and M. M. Ardehali, “Genetic algorithm-based fuzzy-PID control methodologies for enhancement of energy efficiency of a dynamic energy system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 1, pp. 725–732, 2011.
20. M. Hojati and S. Gazor, “Hybrid adaptive fuzzy identification and control of nonlinear systems,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 198–210, 2002.
21. N. W. Madebo, “Hybrid adaptive PID control strategy for UAVs using combined neural networks and fuzzy logic,” *PLoS One*, vol. 20, no. 8, p. e0331036, 2025.
22. A. Alimuddin, R. Arafiah, I. Saraswati, R. Alfan, P. Hasudungan, and T. Taufik, “Development and performance study of temperature and humidity regulator in baby incubator using fuzzy-pid hybrid controller,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 20, p. 6505, 2021.
23. N. W. Madebo, “Enhancing intelligent control strategies for UAVs: A comparative analysis of fuzzy logic, fuzzy PID, and GA-optimized fuzzy PID controllers,” *IEEE Access*, vol. 13, pp. 16548–16563, 2025.
24. W. Z. Qiao and M. Mizumoto, “PID type fuzzy controller and parameters adaptive method,” *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 78, no. 1, pp. 23–35, 1996.
25. R. Babuška and H. B. Verbruggen, “An overview of fuzzy modeling for control,” *Control Eng. Pract.*, vol. 4, no. 11, pp. 1593–1606, 1996.
26. K. Lu, Z. Liu, Y. Wang, and C. L. P. Chen, “Fixed-time adaptive fuzzy control for uncertain nonlinear systems,” *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 12, pp. 3769–3781, 2020.
27. J. Yu, P. Shi, W. Dong, and C. Lin, “Adaptive fuzzy control of nonlinear systems with unknown dead zones based on command filtering,” *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 46–55, 2016.
28. J. C. Mugisha, B. Munyazikwiye, and H. R. Karimi, “Design of temperature control system using conventional PID and Intelligent Fuzzy Logic controller,” in 2015 International conference on fuzzy theory and its applications (iFUZZY), IEEE, 2015, pp. 50–55.
29. S. Almeida and M. Chen, “Adaptive Control of Autonomous Mobile Robots Using Fuzzy Logic Based PID Optimization,” *Journal of Technology Informatics and Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 403–416, 2025.
30. T. D. Hendrawati, F. A. Wicaksana, P. Narputro, and S. Rahayu, “Mamdani Fuzzy Logic-Based Room Temperature Monitoring And Control System,” *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence*, vol. 2, no. 1, pp. 59–70, 2025.
31. M. U. N. Aba, A. H. Kuspranoto, M. A. S. Yudono, N. B. U. Irawati, R. Puspita and D. M. Rani, “IoT-Enhanced Bacterial Incubator Monitoring System With PSO-PID Temperature Control,” *2025 IEEE Asia-Pacific Conference on Geoscience, Electronics and Remote Sensing Technology (AGERS)*, Purwokerto, Indonesia, 2025, pp. 280–287, doi: 10.1109/AGERS67633.2025.11446428