

OPTIMALISASI SISTEM KENDALI HEXACOPTER

Al¹, Febri Usmanto², Aswir Premadi^{3*}, Asnal Effendi⁴ Antonov Bachtiar⁵

^{1 2 3 4} Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Fakultas Vokasi

Institut Teknologi Padang

*Corresponding Author E-mail aswir.premadi@itp.ac.id

Abstract

This study aims to develop and analyze the performance of a hexacopter control system used in weather modification technology missions. Several control methods are applied, including PID, Fuzzy Mamdani, Fuzzy Sugeno, and Model Reference Adaptive Control (MRAC). The tests are conducted through simulations in MATLAB Simulink and Mission Planner, using step response parameters such as delay time, rise time, peak time, settling time, overshoot, and steady-state error as performance benchmarks. The results indicate that MRAC provides the most balanced performance in terms of speed and accuracy, Fuzzy Sugeno excels in response speed, while PID and Fuzzy Mamdani offer high stability.

Keywords : Hexacopter, Fuzzy Logic, MRAC, Weather Modification

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan dan menganalisis performa sistem kendali hexacopter yang digunakan dalam misi teknologi modifikasi cuaca. Beberapa metode kendali yang digunakan antara lain PID, Fuzzy Mamdani, Fuzzy Sugeno, dan Model Reference Adaptive Control (MRAC). Pengujian dilakukan melalui simulasi pada MATLAB Simulink dan Mission Planner, dengan tolok ukur kinerja berupa parameter step response seperti delay time, rise time, peak time, settling time, overshoot, dan steady-state error. Hasil menunjukkan bahwa MRAC memberikan performa paling seimbang antara kecepatan dan akurasi, Fuzzy Sugeno unggul dalam hal kecepatan respon, sementara PID dan Fuzzy Mamdani memberikan stabilitas yang tinggi.

Kata Kunci : Hexacopter, Fuzzy Logic, MRAC, Modifikasi Cuaca

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pesawat tanpa awak atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) semakin pesat, khususnya dalam pengembangan sistem kendali yang adaptif dan presisi seperti pada Hexacopter, yakni UAV dengan enam rotor yang memiliki kestabilan tinggi dan kemampuan manuver yang mumpuni dalam menghadapi gangguan eksternal [1][2]. Namun, pengendalian hexacopter menghadapi tantangan kompleks akibat sifat sistemnya yang nonlinier, serta kondisi lingkungan yang sering kali berubah secara dinamis dan tidak terduga [3][4].

Penggunaan metode kendali konvensional seperti Proportional-Integral-Derivative (PID) masih banyak diterapkan karena kemampuannya dalam menjaga kestabilan dan kesederhanaan dalam implementasi [5][6]. Meski begitu, beberapa penelitian menyebutkan bahwa metode PID memiliki keterbatasan dalam merespons perubahan cepat seperti arah angin atau beban yang tidak stabil, sehingga membutuhkan pendekatan tambahan untuk mencapai performa yang optimal [7][8].

Untuk menjawab kelemahan tersebut, berbagai studi telah mengembangkan integrasi antara PID dan logika fuzzy, di mana data dari sistem PID digunakan untuk menyusun fungsi keanggotaan fuzzy yang lebih adaptif, sehingga meningkatkan akurasi serta respons sistem [9][10]. Penerapan algoritma optimasi seperti PSOSCALF dalam tuning fuzzy-PID juga terbukti mampu meningkatkan kinerja sistem secara signifikan [11][12].

Selain itu, pendekatan kontrol berbasis jaringan saraf tiruan dan sistem inferensi fuzzy seperti Mamdani atau Takagi-Sugeno semakin diperkuat sebagai solusi kendali cerdas, karena kemampuannya dalam menyesuaikan parameter kontrol berdasarkan input yang berubah-ubah secara real-time [13][14][15]. Fuzzy gain-scheduling juga memberikan kontribusi besar dalam meningkatkan respons sistem UAV terhadap variasi kondisi penerbangan, seperti gangguan angin atau perubahan massa muatan, dengan menyesuaikan parameter PID secara otomatis [16][17].

Pengembangan sistem kontrol fuzzy telah diterapkan tidak hanya pada UAV, tetapi juga pada berbagai aplikasi seperti pengendalian suhu, pengaturan level air, hingga pengendalian kecepatan motor BLDC, yang semuanya menunjukkan peningkatan signifikan dalam hal kestabilan, efisiensi, dan kecepatan respons sistem [18][19]. Bahkan pada studi terkait kontroler adaptif berbasis model atau MRAC, integrasi dengan fuzzy-PID menunjukkan peningkatan presisi dan kestabilan dalam sistem kendali yang kompleks seperti aktuator hidrolik maupun meja putar (turntable), yang sangat relevan untuk diterapkan pada UAV [20].

Berdasarkan hasil-hasil penelitian tersebut, pengembangan sistem kendali hexacopter dengan mengintegrasikan metode PID, logika fuzzy (Mamdani dan Sugeno), serta Model Reference Adaptive Control (MRAC) diyakini mampu menghasilkan smart controller yang tidak hanya stabil, tetapi juga adaptif terhadap perubahan lingkungan dan gangguan eksternal. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan sistem kendali hexacopter AB.2 prototype agar dapat beroperasi secara responsif, presisi, dan tahan terhadap variasi kondisi penerbangan, dengan pendekatan kombinatorial yang telah terbukti secara teoritis dan eksperimental dalam berbagai studi sebelumnya.

Hexacopter merupakan jenis drone atau pesawat tanpa awak yang memiliki enam rotor atau baling-baling. Dengan desain seperti gambar 1.1 memungkinkan hexacopter untuk memiliki stabilitas yang lebih baik dan kemampuan untuk mengangkat beban yang lebih berat dibandingkan dengan quadcopter yang hanya memiliki empat rotor.



Gambar 1.1 Desain Hexacopter

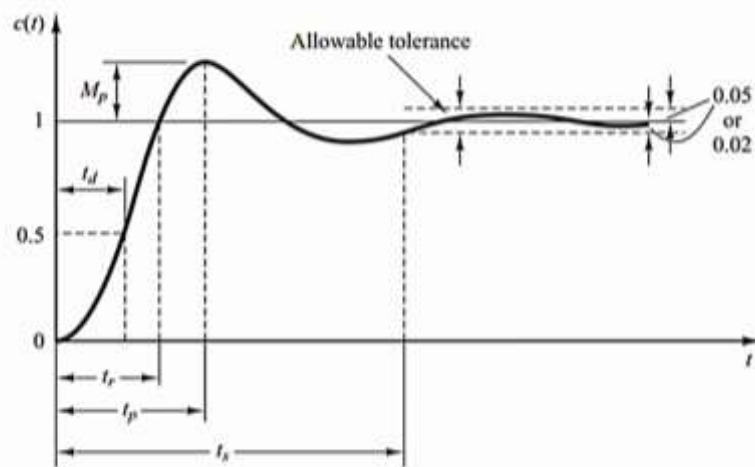
Dalam mendesain hexacopter dapat menggunakan software seperti solid work, inveter dan lainnya. Hal ini dilakukan karena fungsi atau pemanfaatan dari hexacopter yang di rancang untuk penggunaan komersial seperti pemantauan udara, pemetaan atau fotogrametri dan fotografi udara.

Fuzzy Logic Control (FLC) adalah metode kendali yang mampu menangani ketidakpastian dengan menggunakan nilai kebenaran bertingkat antara 0 dan 1, berbeda dengan kontrol konvensional yang bersifat biner [21]. FLC bekerja berdasarkan aturan fuzzy dan dapat menyesuaikan kendali secara real-time, seperti ditunjukkan oleh Sunarno dan Rohmad yang menemukan bahwa FLC memberikan respons lebih optimal dibanding kontrol klasik [22]. Salah satu implementasi umum adalah Mamdani fuzzy controller, yang mengatur output berdasarkan aturan dan himpunan fuzzy, contohnya dalam sistem kontrol suhu agar lebih halus dan adaptif [8].

Fuzzy logic juga bermanfaat dalam sistem peramalan cuaca, dengan mendefinisikan keadaan seperti "cerah" atau "berawan" dalam bentuk fuzzy, menghasilkan prediksi yang tetap akurat meski

data tidak pasti [23]. Dalam sistem cerdas, FLC meningkatkan efisiensi dengan memungkinkan pengambilan keputusan adaptif, termasuk dalam UAV yang menggunakan fuzzy swarm trajectory control agar mampu beradaptasi terhadap lingkungan secara dinamis [24].

1.1 Parameter Sistem Kendali



Gambar 1. 2 Grafik Sistem Kendali

A. Peak Time (T_p)

peak time (Waktu Puncak) terjadi saat sistem mengalami overshoot, yaitu saat output melewati 100% dari nilai setpoint, sering kali sekitar 110%–150% tergantung karakteristik sistem. Dalam sistem kendali, ini penting karena menunjukkan waktu maksimum yang diperlukan untuk mencapai titik puncak yang mungkin melebihi nilai setpoint sebelum kembali ke nilai stabil. Peak Time menunjukkan kecepatan dalam mencapai nilai maksimum dan penting untuk kestabilan sistem.[25]

2. METODOLOGI

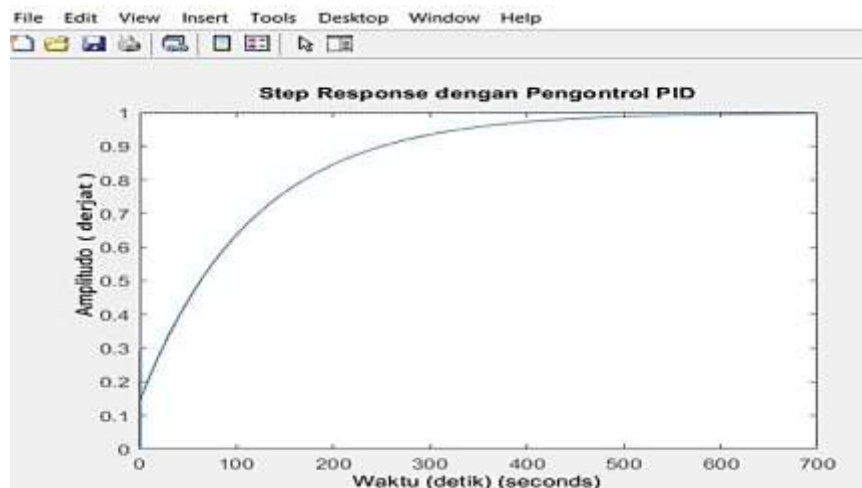
Penelitian dilakukan secara simulatif menggunakan MATLAB Simulink untuk setiap metode kendali. Model matematis hexacopter dikembangkan terlebih dahulu melalui identifikasi sistem, kemudian tiap metode kendali (PID, Fuzzy Mamdani, Fuzzy Sugeno, dan MRAC) diimplementasikan dalam blok kontrol dan diberikan input step untuk menganalisis karakteristik respons sistem.

Parameter yang diamati meliputi Delay Time (T_d), Rise Time (T_r), Peak Time (T_p), Settling Time (T_s), Overshoot (OS), dan Steady-State Error (Ess).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

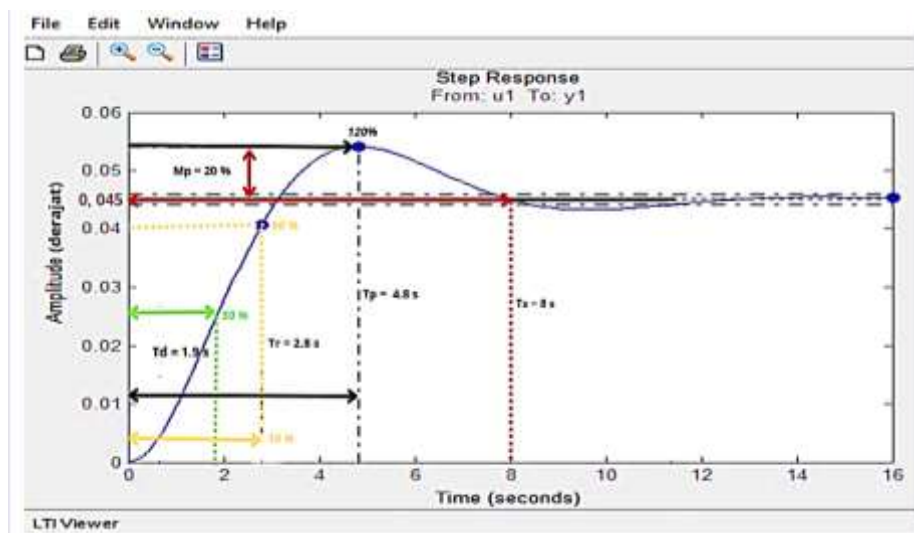
3.1 Sistem Kendali PID

Pada Gambar 3.1 grafik step response yang dihasilkan oleh PID Tuner menunjukkan kinerja sistem dengan pengaturan parameter PID default. Dengan menggunakan nilai PID sebagai berikut: $P = 0.166753$, $I = 0.00999545$, $D = 0.072$.



Gambar 3. 1 Step Respon PID

Dari grafik tersebut, didapatkan bahwa sistem memiliki karakteristik respon dengan nilai *rise time* sekitar 3 detik, *delay time* kurang lebih 1.4 detik, *peak time* sekitar 6 detik, dan *settling time* mendekati 4 detik. Nilai *overshoot* teramati 0%, menunjukkan bahwa sistem tidak mengalami lonjakan melebihi nilai *setpoint*. PID Optimal Penelitian Terdahulu



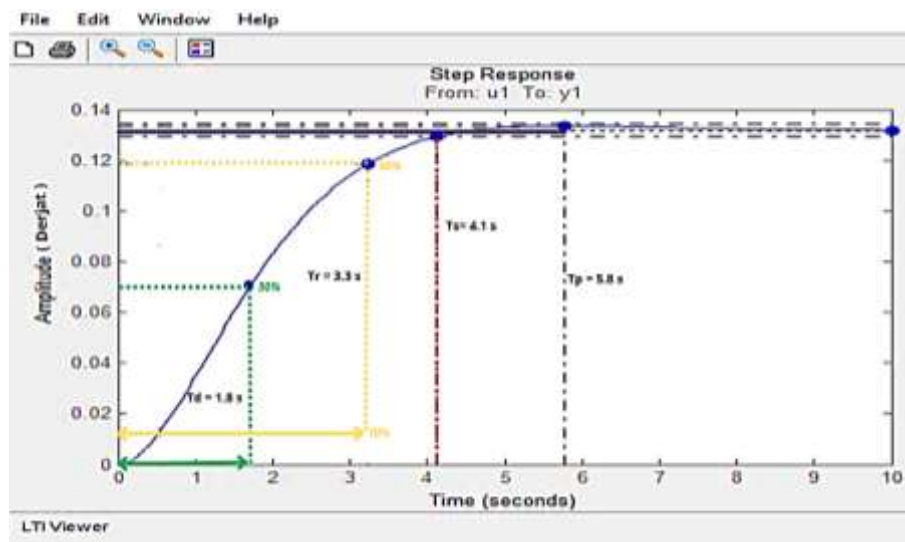
Gambar 3. 2 Respon Simulasi Openloop Pitch

Tabel 3. 1 Parameter Data Respons Sistem Pitch dalam Mode Open Loop

NO	Parameter	Waktu
1	<i>Rise Time</i>	2.8 s
2	<i>Settling Time</i>	8 s
3	<i>Peak Time</i>	4.8 s
4	<i>Overshoot</i>	20 %
5	<i>Delay Time</i>	1.9 s
6	<i>Steady-State Error</i>	15%

Tabel 3.1 menunjukkan hasil pengujian sistem *pitch* dalam mode *open loop*. Sistem memiliki *rise time* sebesar 2,8 detik, serta *delay time* sebesar 1,9 detik, menandakan respons awal yang lambat

tanpa kendali umpan balik. *Peak time* tercatat 4,8 detik, dengan *overshoot* sebesar 20%, yang berarti *output* sempat melebihi nilai referensi sebelum turun kembali. *Settling time* mencapai 8 detik, menunjukkan waktu yang cukup lama untuk mencapai kestabilan dalam batas $\pm 5\%$. Selain itu, sistem menunjukkan *steady-state error* sebesar 15%, menandakan perbedaan tetap antara output akhir dan nilai yang diharapkan.

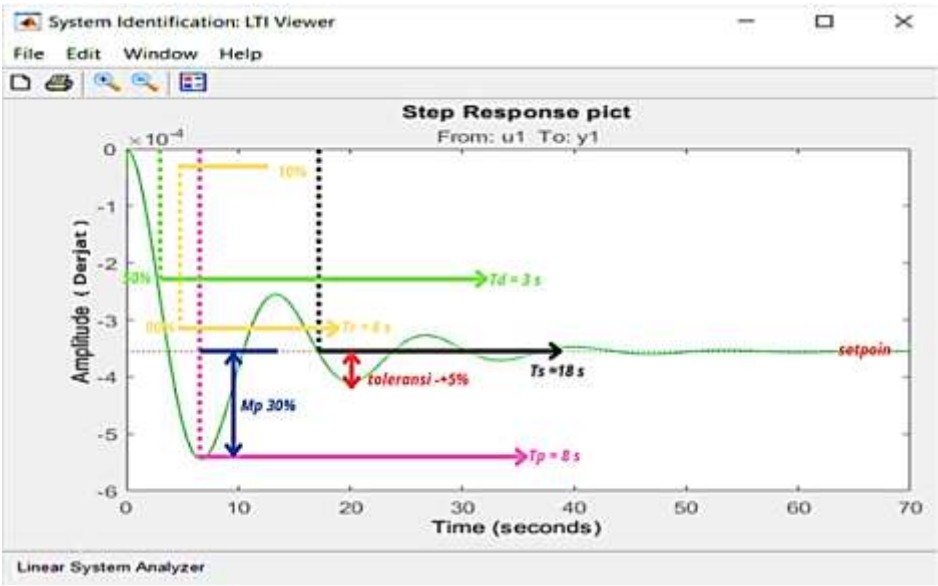


Gambar 3. 3 Respon Simulasi Openloop Roll

Tabel 3. 2 Parameter Data Respons Sistem Roll dalam Mode Open Loop

NO	Parameter	Waktu
1	Rise Time	3.3 s
2	Settling Time	4.1 s
3	Peak Time	5.8 s
4	Overshoot	0 %
5	Delay Time	1.8 s
6	Steady-State Error	0

Pengujian sistem roll dalam mode open loop menunjukkan respons yang lebih stabil dibandingkan sistem pitch. Rise time tercatat sebesar 3,3 detik, sedangkan delay time sebesar 1,8 detik, menunjukkan sistem cukup cepat merespons input. Peak time berada di 5,8 detik, namun overshoot tercatat 0%, menandakan output tidak melebihi nilai target. Settling time sistem adalah 4,1 detik, dan steady-state error juga 0, yang berarti output akhir sangat akurat mengikuti input referensi. Secara keseluruhan, sumbu roll menunjukkan karakteristik yang lebih ideal dibanding pitch dalam kondisi tanpa umpan balik.



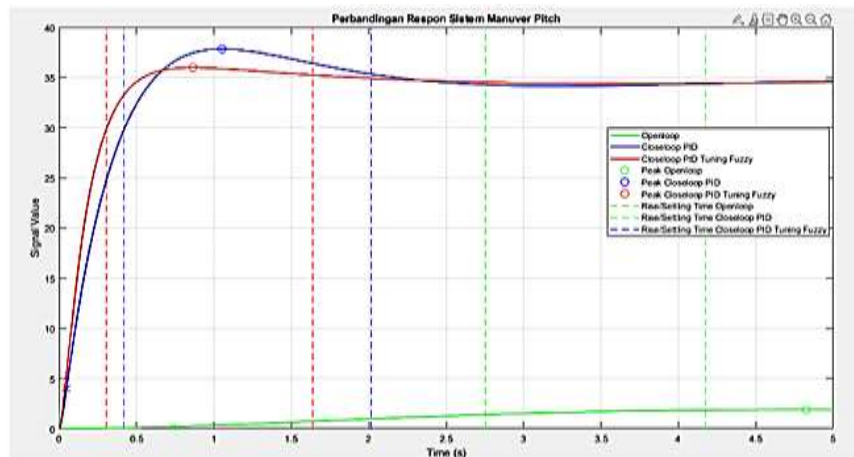
Gambar 3. 4 Grafik Step Respon Pict Prototype AB.2

Tabel 3. 3 Parameter Data Respons Sistem Pict dalam Mode Open Loop

No	Parameter	Nilai Waktu
1	Waktu Naik (Rise Time)	6 s
2	Waktu Stabil (Settling Time)	18 s
3	Waktu Puncak (Peak Time)	8 s
4	Overshoot	30%
5	Waktu Tunda (Delay Time)	3 s
6	Steady-State Error	18%

Pengujian sistem pitch dalam mode open loop (Tabel 4.5) menunjukkan bahwa rise time mencapai 6 detik, menandakan respons awal sistem cukup lambat. Delay time sebesar 3 detik mengindikasikan adanya jeda signifikan sebelum sistem mulai merespons input. Peak time tercatat 8 detik, dan sistem mengalami overshoot sebesar 30%, menunjukkan lonjakan respons yang agresif tanpa kendali. Waktu untuk mencapai kestabilan (settling time) adalah 18 detik, dengan kecenderungan osilasi yang tinggi sebelum sistem mantap. Data ini menunjukkan pentingnya penggunaan sistem kendali tertutup atau logika cerdas agar pitch drone lebih cepat, stabil, dan akurat dalam merespons perubahan.

3.2 Sistem Kendali Fuzzy

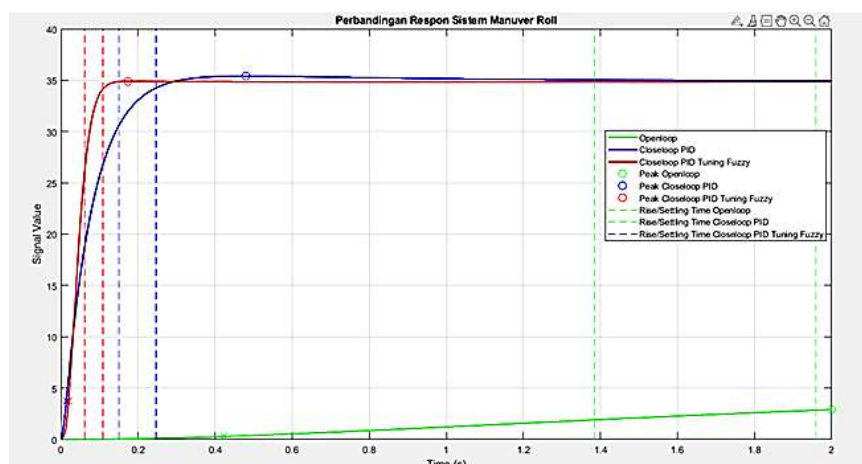


Gambar 3. 5 Hasil Simulasi Self Tuning PID Fuzzy sugeno Pitch

Tabel 3. 4 Parameter Respon sistem Manuver Pitch

NO	Parameter	Nilai Waktu
1	Rise Time	0.30543 s
2	Settling Time	1.637 s
3	Peak Time	0.86446 s
4	Overshoot	4.1471%
5	% S. state error	1.34%
6	Delay Time	0.036349 s

Gambar 3.5 dan Tabel 3.4 memperlihatkan perbandingan respon kontrol pitch antara open-loop, PID close-loop, dan PID close-loop dengan tuning Fuzzy Sugeno. Dari ketiganya, metode PID dengan tuning Fuzzy Sugeno (garis merah) menunjukkan performa terbaik. Sistem ini mencatat overshoot sebesar 4,15%, lebih kecil dibanding metode lain, dan settling time hanya 1,637 detik, menunjukkan kestabilan yang lebih cepat. Rise time tercatat 0,305 detik, menandakan sistem cepat mencapai target. Sementara itu, delay time hanya 0,036 detik, membuktikan sistem merespons input hampir seketika. Secara keseluruhan, tuning Fuzzy Sugeno tidak hanya mempercepat waktu respon, tetapi juga mengurangi overshoot dan memperkuat kestabilan sistem pada manuver pitch.



Gambar 3. 6 Hasil Simulasi Self Tuning PID Fuzzy sugeno Roll

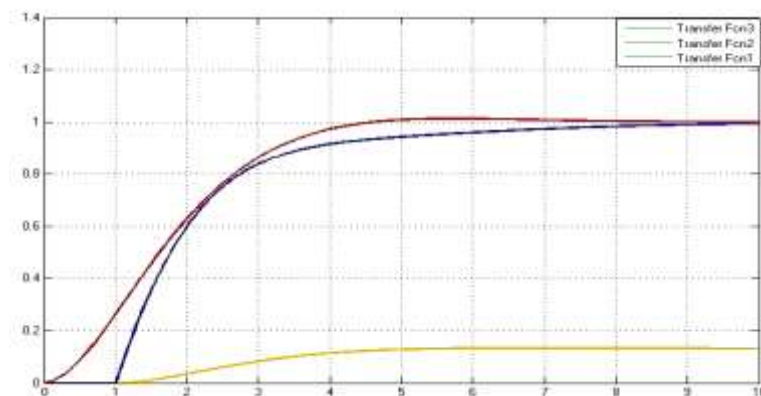
Tabel 3. 5 Parameter Respon sistem Manuver Roll

NO	Parameter	Nilai Waktu
1	Rise Time	0.061757
2	Settling Time	0.10872
3	Peak Time	0.17357
4	Overshoot	0.10137%
5	% S. state error	0.46%
6	Delay Time	0.014401

Gambar 3.6 dan tabel 3.5 membandingkan respon sistem manuver roll menggunakan open-loop, PID, dan PID dengan tuning Fuzzy Sugeno. Dari ketiga metode, PID Tuning Fuzzy Sugeno (garis merah) menunjukkan performa terbaik. Sistem ini mencatat rise time sebesar 0,062 detik, settling time hanya 0,109 detik, dan delay time 0,019 detik, menunjukkan respon yang sangat cepat. Selain itu, overshoot sangat kecil hanya 0,10%, hampir tidak melewati nilai target. Hasil ini menegaskan bahwa tuning Fuzzy Sugeno mampu meningkatkan kestabilan dan kecepatan sistem dalam manuver roll secara signifikan dibanding metode lainnya.

3.3 Sistem Kendali Fuzzy Mamdani

Dapat dilihat pada grafik yang dihasilkan 3.7 dimana pada grafik yang berwarna kuning adalah sistem open loop, grafik yang berwarna biru sistem kendali PID dan yang berwarna merah grafik sistem kendali dengan fuzzy logic controller terdapat perbedaan step respon yang dihasilkan dimana sistem open loop tidak mampu mencapai setpoint, selanjutnya pada sistem kendali PID sudah mampu mencapai setpoint namun membutuhkan waktu yang cukup lama sedangkan dengan fuzzy logic controller telah berhasil membuat sistem kendali menjadi lebih baik dan mencapai setpoint lebih cepat dengan mengukur performance sistem open loop, PID dan setelah menggunakan sistem kendali fuzzy logic controller

**Gambar 3. 7** Grafik Open Loop, PID dan Fuzzy Logic Control**Tabel 3. 6** Perbandingan Performansi Sistem Kendali Open Loop, PID dan Fuzzy Logic Control

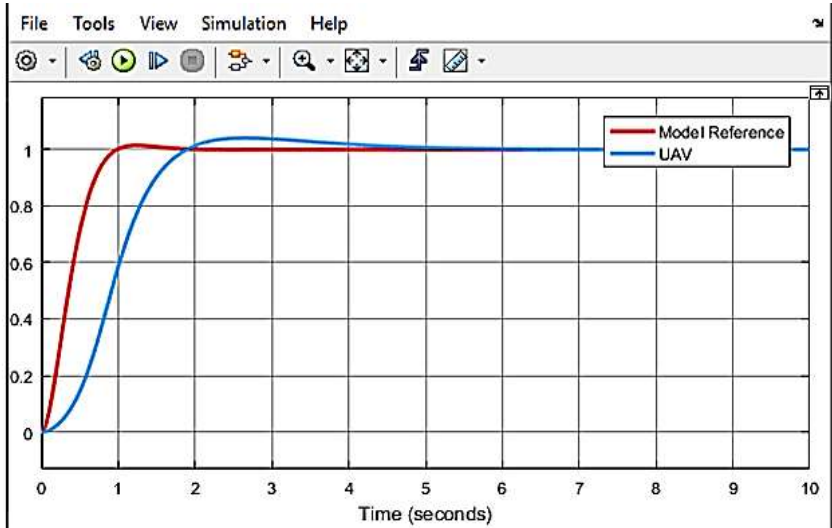
No	Step Respon	Open Loop	PID	Fuzzy Logic Control
1	Rise Time (Tr) 3,19	4,60s	3,24s	3.19s
2	Delay Time (Td) 1.53	2.76s	1,85s	1.53s
3	Peak Time (Tp) 4.64	6,50s	10,00s	4.64s
4	Settling Time (Ts) 4.73	5,91s	9,55s	4.37s
5	Overshoot (Mp) 0	1,29%	0%	0%

6	Error Steady State (Ess) 0	0%	0%	0%
---	----------------------------	----	----	----

Tabel 4.9 menyajikan perbandingan kinerja sistem kendali hexacopter menggunakan tiga metode: Open Loop, PID, dan Fuzzy Logic. Dari segi waktu respon, sistem kendali Fuzzy menunjukkan performa terbaik dengan rise time tercepat (3,19 detik), delay time paling singkat (1,53 detik), dan waktu puncak yang lebih rendah (4,64 detik) dibandingkan PID dan Open Loop. Fuzzy juga unggul dalam hal settling time (4,37 detik), menunjukkan kemampuannya untuk mencapai kestabilan lebih cepat daripada PID (9,55 detik) dan Open Loop (5,91 detik).

Dalam hal overshoot, Fuzzy dan PID sama-sama menunjukkan hasil 0%, menandakan kestabilan sistem tanpa melewati nilai target, sementara Open Loop mencatat overshoot kecil sebesar 1,29%. Ketiga metode memiliki error steady state 0%, artinya ketiganya mampu mencapai nilai akhir yang diinginkan. Namun, keunggulan Fuzzy terlihat jelas dari kecepatan dan kestabilannya yang lebih baik.

3.4 Sistem Kendali MRAC



Gambar 3. 8 Step respon Kendali MRAC

Tabel 3. 7 Performansi Sitem MRAC

No	Step Respon	Nilai
1	Rise Time (Tr)	1.0709 s
2	Delay Time (Td)	0.99 s
3	Peak Time (Tp)	2.6600 s
4	Settling Time (Ts)	3.9351 s
5	Persen Overshoot (%Mp)	4.0847 %
6	Steady-State Error	1.15 %

Gambar 3.8 dan Tabel 3.7 merupakan grafik keluaran dari sistem kendali model reference adaptive control yang telah dirancang. Grafik berwarna kuning merupakan bentuk grafik model referensi sedangkan grafik berwarna biru merupakan grafik keluaran dari sistem MRAC, pada grafik keluaran Model referensi waktu dimulai dari 0 hingga mencapai 50% adalah 0,45 detik sedangkan keluaran MRAC mencapai waktu 50% 0,88 terdapat perselisihan waktu tapi tidak terlalu besar dan sudah cukup baik. Namun pada keluaran MRAC terjadi overshoot dari setpoint sebesar 4.0847% di waktu 2.6600 detik dan bisa kembali optimal di waktu 3.9351 detik.

3.5 Perbandingan Step Respon Dengan Beberapa Sistem Kendali

Tabel 3. 8 Perbandingan Step Respon

No	Metode Kendali	Delay Time (s)	Rise Time (s)	Peak Time (s)	Settling Time (s)	Overshoot (%)	Steady-State Error
1	PID (Arif)	1.75	3.54	10	9.55	0%	0
	PID (Gusri)	2.8	3.9	6.5	16	7%	2.3
	PID (AB.2)	1.4	3	6	4	0%	0
2	Fuzzy Mamdani	1.53	3.19	4.64	4.37	0%	0
3	Fuzzy Sugeno	0.036	0.30	0.86	1.6	4.14%	1.34
4	MRAC	0.99	1.07	2.66	3.93	4.08%	1.15

Penelitian ini membandingkan performa beberapa metode kendali, yaitu PID, Fuzzy Logic (baik Mamdani maupun Sugeno), serta MRAC, dengan menggunakan parameter respon tangga seperti delay time, rise time, peak time, settling time, overshoot, dan steady-state error. Hasil menunjukkan bahwa metode PID versi Arif mampu mencapai kestabilan akhir tanpa overshoot maupun error, meskipun waktu responnya relatif lambat dengan rise time 3.54 detik dan delay time 1.75 detik. Sebaliknya, PID versi Gusri memperlihatkan performa yang kurang stabil, dengan overshoot sebesar 7% dan steady-state error sebesar 2.3%, serta waktu settling yang sangat lama yaitu 16 detik. Metode PID Prototype Ab.2 menunjukkan peningkatan signifikan dengan waktu settling hanya 4 detik dan tanpa overshoot maupun error, meski delay time-nya masih tergolong moderat, yakni 1.4 detik.

Sementara itu, metode berbasis fuzzy logic menawarkan karakteristik yang berbeda. Fuzzy Mamdani menghasilkan kestabilan tinggi tanpa overshoot dan error akhir, dengan settling time 4.37 detik dan rise time 3.19 detik, sehingga cocok untuk sistem yang membutuhkan kestabilan lebih dari kecepatan. Di sisi lain, Fuzzy Sugeno menonjol dalam hal kecepatan respon, dengan delay time yang sangat rendah sebesar 0.036 detik dan rise time hanya 0.3 detik. Namun, metode ini masih memiliki overshoot sebesar 4.14% dan steady-state error 1.34%, yang perlu diperhatikan dalam aplikasi presisi tinggi.

Metode MRAC memperlihatkan performa yang seimbang, dengan waktu respon yang relatif cepat dan tingkat kestabilan yang cukup baik. Delay time-nya sebesar 0.99 detik, rise time 1.07 detik, dan settling time 3.93 detik, dengan overshoot 4.08% dan error akhir 1.15%. Keunggulan MRAC terletak pada kemampuannya menyesuaikan parameter kontrol secara adaptif terhadap dinamika sistem, menjadikannya sangat relevan untuk aplikasi seperti kendali hexacopter yang kompleks dan berubah-ubah. Meskipun Fuzzy Sugeno adalah metode paling cepat, kestabilan terbaik ditunjukkan oleh PID Prototype Ab.2 dan Fuzzy Mamdani. MRAC sendiri berada di posisi tengah yang ideal, menggabungkan kecepatan dan kestabilan secara seimbang..

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis grafik performa keempat sistem kendali, dapat disimpulkan bahwa setiap metode memiliki karakteristik tersendiri yang cocok untuk bagian atau kondisi tertentu pada sistem drone.

1. Metode PID unggul dalam kestabilan jangka panjang karena mampu menghasilkan nol overshoot dan steady-state error. Namun, respon transiennya masih lambat, dengan delay time rata-rata 1.9 detik, rise time 3.5 detik, dan peak time 7.5 detik. Karakter ini menjadikan PID cocok untuk pengendalian arah (yaw) pada drone, di mana kestabilan lebih diutamakan daripada kecepatan respon.
2. Fuzzy Mamdani menunjukkan performa stabil dengan zero overshoot dan error, serta respon lebih cepat dibanding PID, dengan delay 1.53 detik dan rise time 3.19 detik. Metode ini cocok untuk mengendalikan pitch dan roll pada drone saat manuver halus atau hover, karena mampu menjaga kestabilan tanpa lonjakan berlebihan.
3. Fuzzy Sugeno unggul dalam kecepatan respon, dengan delay hanya 0.036 detik dan settling time 1.6 detik. Meski demikian, adanya overshoot 4.14% dan steady-state error 1.34% menjadikannya kurang ideal untuk aplikasi yang menuntut kestabilan tinggi. Namun, metode ini sangat efektif untuk altitude control seperti saat take-off dan landing.
4. MRAC menawarkan keseimbangan antara respon cepat dan adaptivitas. Dengan delay 0.99 detik dan error yang rendah (overshoot 4.08% dan steady-state error 1.15%), MRAC cocok untuk kondisi dinamis seperti perubahan beban atau gangguan angin, karena mampu menyesuaikan parameter kendali secara real-time.
5. Setiap metode memiliki keunggulan masing-masing: PID stabil untuk jangka panjang, Fuzzy Mamdani cocok untuk kontrol halus, Fuzzy Sugeno unggul dalam kecepatan, dan MRAC paling adaptif. Pemilihan metode harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem, atau dikombinasikan seperti hybrid Fuzzy-PID untuk menggabungkan kecepatan dan kestabilan secara bersamaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Zhou, A. Pljonkin, and P. K. Singh, "Modeling and PID control of quadrotor UAV based on machine learning," *J. Intell. Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 1112–1122, 2022, doi: 10.1515/jisys-2021-0213.
- [2] J. Muliadi and B. Kusumoputro, "Neural Network Control System of UAV Altitude Dynamics and Its Comparison with the PID Control System," *J. Adv. Transp.*, vol. 2018, no. D, 2018, doi: 10.1155/2018/3823201.
- [3] I. Habriansyah, "APLIKASI KENDALI PID PADA FIX WING UAV Imran," *Pros. 5th Semin. Nas. Penelit. Pengabd. Kpd. Masy. 2021*, pp. 60–63, 2021, [Online]. Available: <http://jurnal.poliupg.ac.id/index.php/snp2m/article/download/3208/2740>
- [4] P. Chotikunnan, R. Chotikunnan, A. Nirapai, A. Wongkamhang, P. Imura, and M. Sangworasil, "Optimizing Membership Function Tuning for Fuzzy Control of Robotic Manipulators using PID-Driven Data Techniques," *J. Robot. Control*, vol. 4, no. 2, pp. 128–140, 2023, doi: 10.18196/jrc.v4i2.18108.
- [5] E. Y. Bejarbaneh, A. Bagheri, B. Y. Bejarbaneh, S. Buyamin, and S. N. Chegini, "A new adjusting technique for PID type fuzzy logic controller using PSOSCALF optimization algorithm," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 85, p. 105822, 2019, doi: 10.1016/j.asoc.2019.105822.
- [6] M. Malik and A. Burhanuddin, "Desain Model Fuzzy Control UAV Berbasis Matlab/Simulink pada Arduino Flight Controller," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 2, no. 2, p. 19, 2018, doi: 10.30588/jeemm.v2i2.420.
- [7] A. G. Melo, F. A. A. Andrade, I. P. Guedes, G. F. Carvalho, A. R. L. Zachy, and M. F. Pinto, "Fuzzy Gain-Scheduling PID for UAV Position and Altitude Controllers," *Sensors*, vol. 22, no. 6, pp. 1–21, 2022, doi: 10.3390/s22062173.
- [8] L. Mastacan and C. C. Dosoftei, "Temperature Fuzzy Control System with Mamdani

- Controller,” *EPE 2018 - Proc. 2018 10th Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, pp. 352–356, 2018, doi: 10.1109/ICEPE.2018.8559861.
- [9] S. O. KASSIM, A. G. Ali, and I. M. Harram, “Design And Implementation Of Mamdani Type Fuzzy Inference System Based Water Level Controller,” *IOSR J. Electron. ...*, vol. 16, no. 4, pp. 15–22, 2021, doi: 10.9790/2834-1604011522.
- [10] W. Widhiada, M. Widiyarta, and K. P. A. Utama, “Performansi Sistem Pengendali Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Logika Fuzzy Logic,” *J. METTEK*, vol. 6, no. 1, p. 11, 2020, doi: 10.24843/mettek.2020.v06.i01.p02.
- [11] S. Khan, M. Z. Khan, P. Khan, G. Mehmood, A. Khan, and M. Fayaz, “An Ant-Hocnet Routing Protocol Based on Optimized Fuzzy Logic for Swarm of UAVs in FANET,” *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2022, 2022, doi: 10.1155/2022/6783777.
- [12] K. Cao, X. Gao, H. K. Lam, and A. Vasilakos, “H ∞ fuzzy PID control synthesis for Takagi-Sugeno fuzzy systems,” *IET Control Theory Appl.*, vol. 10, no. 6, pp. 607–616, 2016, doi: 10.1049/iet-cta.2015.0513.
- [13] R. Raj and B. M. Mohan, “Stability Analysis of General Takagi-Sugeno Fuzzy Two-Term Controllers,” *Fuzzy Inf. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 196–212, 2018, doi: 10.1080/16168658.2018.1517974.
- [14] A. A. El-samahy and M. A. Shamseldin, “Brushless DC motor tracking control using self-tuning fuzzy PID control and model reference adaptive control,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 3, pp. 341–352, 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.02.004.
- [15] X. Zuo, J. W. Liu, X. Wang, and H. Q. Liang, “Adaptive PID and Model Reference Adaptive Control Switch Controller for Nonlinear Hydraulic Actuator,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2017, 2017, doi: 10.1155/2017/6970146.
- [16] S. Manna, D. K. Singh, and A. K. Akella, “Design and Implementation of MRAC & MRAC-PID Feedback for Turntable,” *Gazi Univ. J. Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 1171–1185, 2023, doi: 10.35378/gujs.1052850.
- [17] J. Zhang, D. Gu, C. Deng, and B. Wen, “Robust and Adaptive Backstepping Control for Hexacopter UAVs,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 163502–163514, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2951282.
- [18] A. Al, G. Rahmawati, A. Premadi, and A. Effendi, “Perencanaan Sistem Kendali Model Reference,” *J. Teknol. dan Vokasi*, vol. 2, no. 2, pp. 37–46, 2024, doi: 10.21063/jtv.2024.2.2.5.
- [19] I. Pal Singh Kunjumol, “Multi-Functional High Thrust Hexa-Copter with Return to Launch Capability for Fire Extinguisher, Pesticide Spray, Shipping and Delivery with Arial Footage Capturing Competency,” *Int. J. Sci. Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 264–269, 2024, doi: 10.21275/sr231208223655.
- [20] B. Niguse, “Control of Hexacopter Unmanned Aerial Vehicle By Using Non-Linear Integral Sliding Mode Controller,” no. July, 2020, [Online]. Available: [https://scholar.archive.org/work/ckdqrztdkzduxhytfvzorhelsa/access/wayback/https://nadre.ethernet.edu.et/record/19748/files/Control of Hexacopter UAV by using Non Linear Instegraal Sliding Model Controller.pdf](https://scholar.archive.org/work/ckdqrztdkzduxhytfvzorhelsa/access/wayback/https://nadre.ethernet.edu.et/record/19748/files/Control%20of%20Hexacopter%20UAV%20by%20using%20Non%20Linear%20Integral%20Sliding%20Model%20Controller.pdf)
- [21] B. Selma, S. Chouraqui, and H. Abouaïssa, “Fuzzy swarm trajectory tracking control of unmanned aerial vehicle,” *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 435–447, 2020, doi: 10.1093/jcde/qwaa036.
- [22] Sunarno and Rohmad, “Simulasi dan Analisis Respon Fuzzy Logic Controller,” no. 1, 2012.
- [23] E. S. Puspita and L. Yulianti, “Perancangan Sistem Peramalan Cuaca Berbasis Logika Fuzzy,” *J. Media Infotama*, vol. 12, no. 1, 2016, doi: 10.37676/jmi.v12i1.267.
- [24] B. Setia, “Penerapan Logika Fuzzy pada Sistem Cerdas,” *J. Sist. Cerdas*, vol. 2, no. 1, pp.

- 61–66, 2019, doi: 10.37396/jsc.v2i1.18.
- [25] H. Ubaya and H. Mawarni, “Sensor Fusion and Fuzzy Logic for Stabilization System of Gimbal Camera on Hexacopter,” pp. 25–32, 2014.
- [26] R. Kumar and G. Dhiman, “A Comparative Study of Fuzzy Optimization through Fuzzy Number,” *Int. J. Mod. Res.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2021.
- [27] Y. Chen, B. Yang, A. Abraham, and L. Peng, “Automatic design of hierarchical Takagi-Sugeno type fuzzy systems using evolutionary algorithms,” *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 15, no. 3, pp. 385–397, 2007, doi: 10.1109/TFUZZ.2006.882472.
- [28] M. M. Ferdaus, M. Pratama, S. G. Anavatti, and M. Garratt, “A Generic Self-Evolving Neuro-Fuzzy Controller Based High-Performance Hexacopter Altitude Control System,” *Proc. - 2018 IEEE Int. Conf. Syst. Man, Cybern. SMC 2018*, pp. 2784–2791, 2019, doi: 10.1109/SMC.2018.00475.
- [29] F. Asadi, “Introduction to Control Systems,” *Signals Syst. with MATLAB® Simulink®. Synth. Lect. Eng. Sci. Technol.*, no. Springer, Cham., 2024, doi: doi.org/10.1007/978-3-031-45622-0_18.