



Sistem kendali kestabilan attitude quadrotor dengan metode self-tuning Fuzzy-PD

Attitude stabilization control for quadrotor using self-tuning fuzzy-PD

Sumardi^{*)}, Hadha Afrisal, Wisnu Dyan Nugroho

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

Cara sitasi: S. Sumardi, H. Afrisal, and W. D. Nugroho, "Sistem kendali kestabilan attitude quadrotor dengan metode self-tuning Fuzzy-PD," *Jurnal Teknologi dan Sistem Komputer*, vol. 8, no. 2, pp. 164-170, 2020. doi: [10.14710/jtsiskom.8.2.2020.164-170](https://doi.org/10.14710/jtsiskom.8.2.2020.164-170), [Online].

Abstract – This research aims to develop a quadrotor control system for maintaining its position and balance from disturbance while hovering. A fast and reliable control technique is required to respond to high maneuverability and high non-linearity of six degrees of freedom system. Hence, this research focuses on designing a self-tuning fuzzy-PD control system for quadrotor's attitude. The designed control system utilizes input data from the inertial navigation system (INS). Then the quadrotor's attitude is controlled by passing the PWM signal to the flight controller APM 2.6. The result shows that the average absolute error for the roll, pitch, and yaw angles are relatively small, as mentioned consecutively 2.079°, 2.266°, and 1.528°, while the maximum absolute errors are 6.314°, 6.722°, and 3.82°.

Keywords – quadrotor; attitude control; self-tuning fuzzy-PD

Abstrak – Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pengendalian attitude quadrotor dalam mempertahankan posisi dan keseimbangan terhadap gangguan pada saat terbang (hovering). Quadrotor membutuhkan sistem kendali non-linear yang handal dan cepat pada kondisi hovering untuk melakukan respons terhadap manuver yang tinggi pada sistem dengan enam derajat kebebasan. Penelitian ini berfokus untuk merancang dan menguji sistem kendali self-tuning fuzzy-PD untuk kendali attitude quadrotor. Sistem kendali quadrotor dirancang menggunakan data input dari inertial navigation system (INS). Selanjutnya pengendalian attitude quadrotor dilakukan dengan meneruskan output sinyal PWM hasil komputasi ke flight controller APM 2.6. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh rata-rata galat absolut yang cukup kecil untuk sudut roll, pitch, dan yaw secara berurutan sebesar 2,079°, 2,266°, dan 1,528°, sedangkan galat absolut maksimalnya sebesar 6,314°, 6,722°, dan 3,82°.

Kata kunci – quadrotor; kendali attitude; self-tuning fuzzy-PD

I. PENDAHULUAN

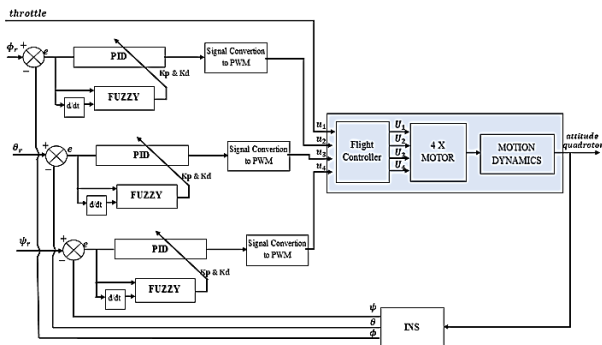
Quadrotor merupakan pesawat tanpa awak dengan empat rotor independen yang dipasang dengan konfigurasi kerangka yang menyilang. Rotor yang saling bersilangan memiliki torsi yang sama, sedangkan untuk rotor yang saling berhadapan memiliki torsi yang berlawanan. Jika semua rotor berputar dengan kecepatan sudut yang sama, maka pasangan rotor akan mampu meniadakan torsi yang dihasilkan oleh tiap pasangan rotor lainnya. Pengaturan kecepatan pada tiap rotor menyebabkan perubahan sikap (*attitude*) dari quadrotor yang didefinisikan dengan parameter sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Perubahan sikap tersebut menyebabkan pergerakan vertikal, lateral, dan longitudinal [1]. Berdasarkan tipe konfigurasi kerangkanya, quadrotor terbagi menjadi dua jenis, yaitu quadrotor konfigurasi kerangka plus "+" dan quadrotor konfigurasi kerangka silang "X" [2], [3].

Salah satu aspek yang penting untuk dikembangkan pada quadrotor adalah sistem kendali kestabilan posisi dan keseimbangan pada saat kondisi *hovering* (melayang dengan tetap mempertahankan titik posisi awal). Sistem kendali yang dibutuhkan harus memiliki respons yang handal dan cepat untuk menjaga kondisi quadrotor tetap dalam kondisi melayang pada titik posisi yang sama, meskipun mendapatkan gangguan baik secara natural maupun dengan dorongan fisik [4]. Di samping itu, karena quadrotor memiliki kemampuan gerak dengan manuver dan nonlinearitas yang tinggi serta memiliki enam derajat kebebasan, maka dibutuhkan metode kendali yang bersifat nonlinier dan memiliki respons yang cepat [5]-[7].

Beberapa kajian mensimulasikan kombinasi metode optimasi numerik berbasis populasi, seperti *particle swarm optimization* (PSO) [8], [9], *ant colony optimization* (ACO) [10], dan *genetic algorithm* (GA) [11], dengan kontrol PID. Metode PSO digunakan untuk proses *fine-tuning* PID sehingga dihasilkan parameter PID yang optimal dalam [8]. Namun, kekurangan dari metode tersebut adalah jumlah partikel pada PSO harus dibatasi untuk mengurangi jumlah iterasi.

Beragam metode kendali nonlinear juga telah digunakan dalam kajian lain terkait kestabilan quadrotor, di antaranya *self-tuning* PSO yang diterapkan

^{*)} Penulis korespondensi (Sumardi)
Email: sumardi@elektro.undip.ac.id



Gambar 1. Sistem kendali *self-tuning* fuzzy-PD

pada pengendalian sudut *bearing* quadrotor [12]. Metode *self-tuning* PSO tersebut dapat mengatasi gangguan yang diberikan pada pergerakan rotasi quadrotor, yakni pada sudut putar *yaw*, dengan rata-rata galat sebesar $7,9^{\circ}$. Metode pada penelitian tersebut cukup baik dalam meminimalisasi nilai galat pada keadaan tunak, namun memiliki *settling time* yang cukup lama, yakni sebesar 6,4 detik. Selain itu, kajian tersebut hanya menggunakan satu sumbu saja.

Beberapa kajian lain menggunakan metode logika fuzzy [7] dan hibrida fuzzy dengan metode kontrol PID [13], [14]. Metode hibrida fuzzy dan PID menunjukkan akurasi yang lebih baik dibandingkan metode yang hanya menggunakan kontrol PID saja. Metode hibrida fuzzy dan PID menunjukkan *settling time* yang relatif lebih cepat dibandingkan hasil dari metode *self-tuning* PSO.

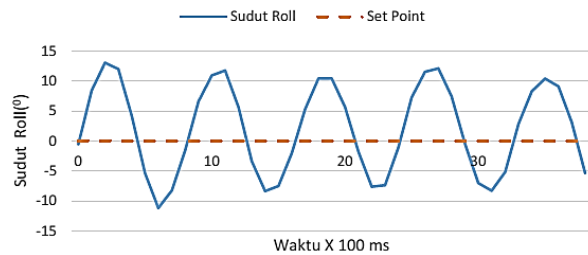
Beragam alternatif metode pengendalian *attitude* quadrotor sudah banyak disimulasikan dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi. Namun, untuk implementasi waktu nyata (*real-time*), pengendalian *attitude* quadrotor pada saat *hovering* membutuhkan algoritma dengan *settling time* yang singkat dan memiliki galat keadaan tunak yang minimal. Penelitian ini mengkaji implementasi metode kendali nonlinear *self-tuning* hibrida fuzzy dan *proportional derivative* (PD) untuk mengendalikan kestabilan *attitude* quadrotor pada sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw* saat kondisi *hovering* secara waktu nyata. Quadrotor yang dirancang menggunakan konfigurasi kerangka silang “X”.

II. METODE PENELITIAN

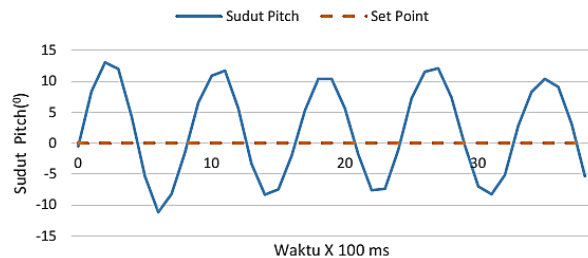
Sistem kendali dengan metode *self-tuning* fuzzy-PD yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 1. Metode kendali pada sistem digunakan untuk melakukan penalaan parameter dari kendali PD, dengan masukan berupa galat (e) dan perubahan galat (de/dt atau Δe).

A. Penentuan parameter PID dengan Ziegler-Nichols II

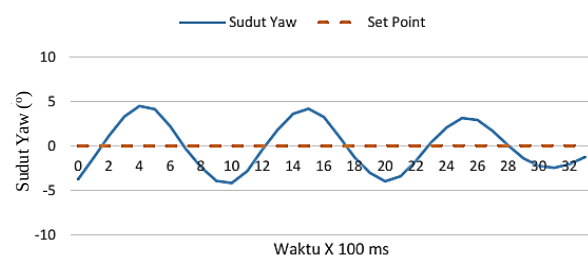
Langkah pertama pada penalaan Ziegler-Nichols II diawali dengan memberikan masukan nilai K_p dari 0 hingga respons mengalami osilasi dengan nilai amplitudo dan periode yang sama. Parameter K_p pada penalaan Ziegler-Nichols II dituliskan dengan simbol K_{cr} . Pada saat melakukan penalaan parameter K_{cr} (*critical gain*), parameter K_i dan K_d dinormalisasi



Gambar 2. Respons penalaan parameter $K_{cr}=2,75$ pada sudut *roll*



Gambar 3. Respons penalaan parameter $K_{cr}=2,75$ pada sudut *pitch*



Gambar 4. Respons penalaan parameter $K_{cr}=3,9$ pada sudut *yaw*

Tabel 1. Perhitungan parameter sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw*

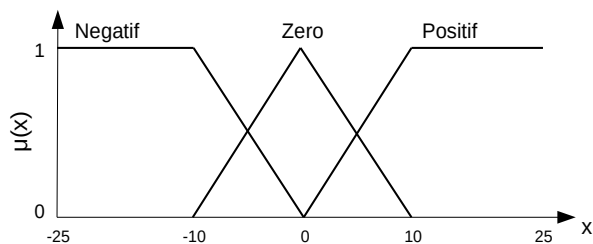
Parameter	Sudut (°)		
	Roll	Pitch	Yaw
K_{cr}	2,750	2,750	3,900
P_{cr}	0,825	0,825	1,325
K_p	1,650	1,650	2,340
T_d	0,103	0,103	0,165
K_d	0,170	0,170	0,387

menjadi 0 [15]. Respons penalaan Ziegler-Nichols II dapat dilihat pada Gambar 2 hingga Gambar 4.

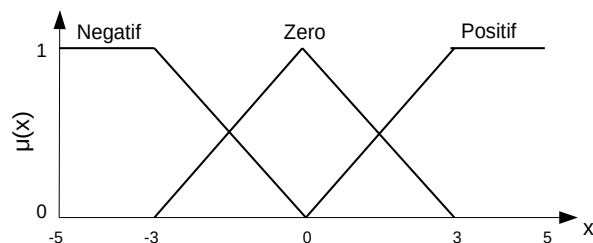
Dari penalaan Ziegler-Nichols II yang telah dilakukan, diperoleh parameter yang dinyatakan pada Tabel 1. Hasil perhitungan K_p dan K_d terbaik menjadi dasar penentuan nilai *singleton* pada basis aturan fuzzy yang digunakan pada saat proses defuzzifikasi.

B. Penentuan basis aturan fuzzy

Masukan dari kendali fuzzy dinyatakan sebagai *error* dan $\Delta error$, dengan tiap masukan memiliki tiga fungsi keanggotaan seperti yang terlihat pada Gambar 5 hingga Gambar 8. Kenggotaan yang telah dibuat



Gambar 5. Himpunan keanggotaan masukan *error roll* dan *error pitch*



Gambar 6. Himpunan keanggotaan masukan Δ *error roll* dan Δ *error pitch*

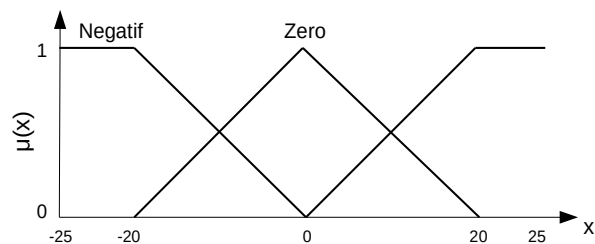
tersebut disusun dalam basis aturan fuzzy yang terlihat pada [Tabel 2](#) dan [Tabel 3](#).

Nilai parameter basis aturan diperoleh melalui penalaan PD dengan metode Ziegler-Nichols II. Setelah beberapa percobaan, diperoleh konstanta yang paling baik. Arti dari variabel “K” adalah kecil, “S” adalah sedang, dan “B” adalah besar. Parameter *singleton* diperoleh dari hasil penalaan PID Ziegler-Nichols II. Parameter tersebut berada pada seluruh *singleton* kategori sedang. Kategori kecil dan besar untuk parameter K_p memiliki selisih masing-masing 0,2 terhadap *singleton* sedang, sedangkan untuk parameter K_d memiliki selisih masing-masing 0,15 terhadap *singleton* sedang. Grafik *singleton* ditunjukkan pada [Gambar 9](#) untuk sudut *roll* dan *pitch*, dan [Gambar 10](#) untuk sudut *yaw*.

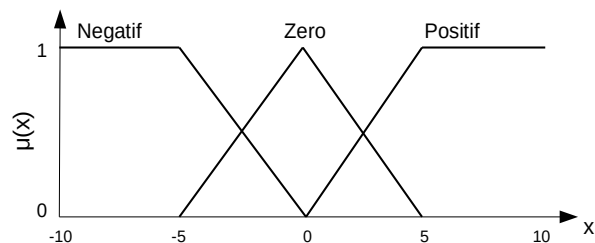
C. Perancangan perangkat keras

Secara garis besar, sistem kendali quadrotor yang dirancang dapat dilihat pada [Gambar 11](#). Sistem kendali *attitude* pada quadrotor dimulai dengan pembacaan nilai parameter *attitude* yang meliputi sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw* oleh *inertial navigation system* (INS). Nilai parameter *attitude* yang telah didapatkan kemudian dibandingkan dengan nilai referensi yang diperoleh melalui komunikasi nirkabel frekuensi radio 433MHz yang terhubung dengan stasiun kontrol dan ditampilkan dalam GUI sederhana sebagai penampil nilai dan setelan awal nilai referensi.

Nilai galat yang diperoleh digunakan sebagai masukan dari sistem kendali. Tiga sinyal kendali, yaitu sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw*, yang berupa sinyal PWM dari mikrokontroler dimasukkan ke dalam APM 2.6 yang digunakan untuk mengendalikan empat buah motor BLDC. Kotak dengan garis putus-putus merupakan bagian sistem kendali terbang APM 2.6 yang tidak termasuk ke dalam pembahasan.



Gambar 7. Himpunan keanggotaan masukan *error yaw*



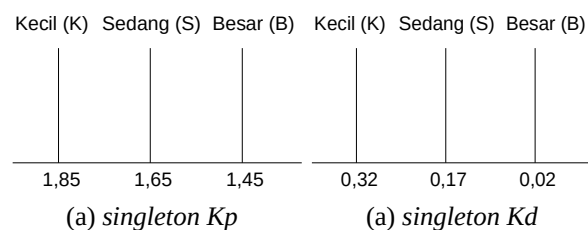
Gambar 8. Himpunan keanggotaan masukan Δ *error yaw*

Tabel 2. Basis aturan K_p

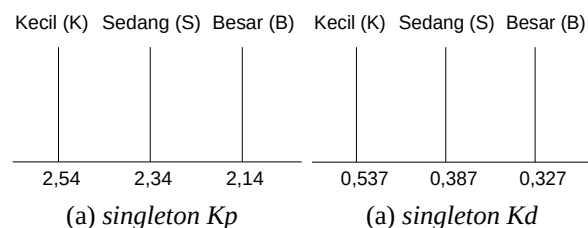
Masukan Δ error	Masukan error		
	Negatif	Zero	Positif
Negatif	B	S	B
Zero	S	K	S
Positif	B	S	B

Tabel 3. Basis aturan K_d

Masukan Δ error	Masukan error		
	Negatif	Zero	Positif
Negatif	K	S	K
Zero	S	B	S
Positif	K	S	K



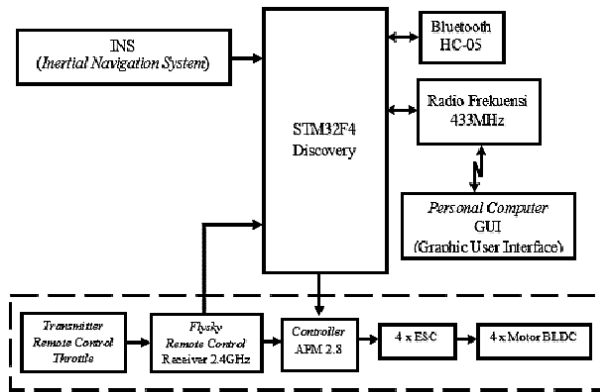
Gambar 9. Singleton sudut *roll* dan *pitch*



Gambar 10. Singleton sudut *yaw*

D. Perancangan perangkat lunak

Perancangan perangkat lunak yang digunakan pada sistem quadrotor ditampilkan dalam diagram alir pada



Gambar 11. Blok diagram perancangan perangkat keras

Gambar 12. Tahap awal yang dilakukan adalah proses inialisasi *pin* dan *port* yang digunakan untuk pembacaan sensor, pengiriman dan penerimaan data dari *Bluetooth*, radio frekuensi, dan sinyal keluaran yang dikirimkan ke APM 2.6. Nilai *setpoint* sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw* ditentukan dan dilakukan pembacaan nilai sudut aktual quadrotor dengan INS. Nilai *setpoint* sudut tersebut dibandingkan dengan nilai sudut aktual quadrotor yang diperoleh dari pembacaan INS.

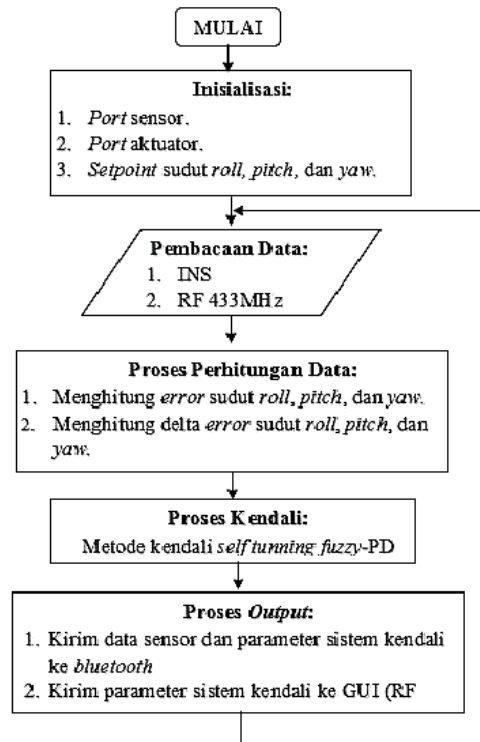
Selisih antara nilai *setpoint* dan nilai aktual digunakan untuk menghitung galat (nilai *error*). Perhitungan nilai $\Delta error$ ditentukan dari selisih galat aktual dengan galat sebelumnya. Setelah itu, nilai *error* dan $\Delta error$ diklasifikasikan dan diolah menggunakan metode fuzzy dengan fungsi keanggotaan dan basis aturan yang telah ditentukan. Nilai pembobotan rata-rata diperoleh menggunakan metode *weighted of average*, di antaranya K_p dan K_d pada sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Nilai *error* yang diolah oleh kontroler PD menjadi nilai umpan balik pada kontroler APM 2.6 pada *port roll*, *pitch*, dan *yaw*. Proses koreksi sinyal PWM dilakukan berdasarkan hasil komputasi nilai PD. Data sudut aktual quadrotor juga dikirimkan melalui RF 433 MHz ke PC untuk ditampilkan dalam GUI. Rangkaian proses tersebut berulang ke tahapan pembacaan data sensor kembali.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian sistem dilakukan dengan cara memasang quadrotor ke alat uji yang ditunjukkan pada Gambar 13. Sistem diberikan kendali *self-tuning fuzzy-PD* untuk dilakukan observasi dan analisis terhadap respons quadrotor tanpa gangguan dan dengan gangguan dari luar sistem.

A. Pengujian tanpa gangguan

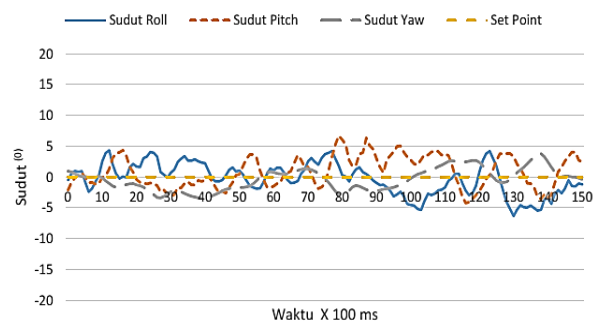
Pada pengujian keseluruhan tanpa gangguan, sistem diberikan nilai *set point* sebesar 0^0 pada masing-masing sudut putar (*roll*, *pitch*, dan *yaw*). Gambar 14 memperlihatkan tampilan grafik yang merupakan hasil pengujian secara keseluruhan pada sistem quadrotor tanpa gangguan.



Gambar 12. Diagram alir sistem kendali



Gambar 13. Alat uji quadrotor



Gambar 14. Pengujian tanpa gangguan

Respons sistem sudut *roll* mencapai keadaan tunak pada detik ke-2 dengan galat keadaan tunak sebesar $-1,075^0$, meskipun masih mengalami osilasi. Respons

sistem pada sudut *roll* mengalami perubahan yang signifikan pada detik ke-9,1, namun respons dari sudut *roll* kembali menuju *set point*-nya. Respons sistem pada sudut *pitch* mencapai keadaan tunak pada detik ke-2, dengan galat keadaan tunaknya sebesar $1,094^{\circ}$. Pada detik ke-4, respons sistem pada sudut *pitch* mengalami osilasi yang signifikan, namun respons sistem berusaha mencapai keadaan tunaknya.

Respons sistem pada sudut *yaw* mencapai keadaan tunak pada detik ke-1, dengan galat keadaan tunak sebesar $1,62^{\circ}$. Respons sistem pada sudut *yaw* mengalami osilasi dengan nilai yang signifikan pada detik ke-10, namun respons dari sudut *yaw* kembali menuju *set point*.

B. Pengujian dengan gangguan

Pada pengujian keseluruhan dengan gangguan, sistem diberikan nilai *set point* sebesar 0° pada masing-masing sudut dan diberikan gangguan impuls yang direpresentasikan dengan tarikan pada tiap sudut putarnya. Gambar 15 sampai Gambar 17 secara berturut-turut memperlihatkan grafik yang menunjukkan hasil pengujian sistem quadrotor dengan gangguan pada sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw*.

Gangguan pada roll

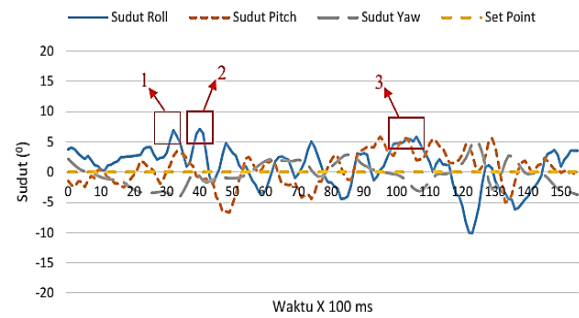
Pada pengujian keseluruhan dengan gangguan pada sudut *roll*, didapatkan hasil percobaan yang ditunjukkan pada Gambar 15. Sistem diberi gangguan sebanyak tiga kali yang ditunjukkan dalam grafik dengan angka 1-3. Pada gangguan pertama, sistem diberi gangguan pada sudut *roll* sebesar $6,0080$, pada gangguan kedua sebesar $7,1360$, dan gangguan ketiga sebesar $5,060$.

Pada gangguan pertama dan kedua, sistem berhasil mencapai nilai *set point* walaupun mengalami sedikit osilasi dan mengalami *overshoot* pada detik ke-4,9 sebesar $3,9820$. Pada gangguan ketiga, gangguan yang diberikan menyebabkan *overshoot* yang tinggi pada detik ke-12,3 sebesar $-10,0440$. Hal ini disebabkan karena terjadi tolakan dan pantulan pada alat uji disebabkan tarikan pada sistem yang terlalu lama. Osilasi pada sudut *roll* menyebabkan osilasi pada sudut *pitch* dan *yaw* karena pergerakan dari sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw* saling berhubungan satu sama lain [1]. Galat maksimal dan rata-rata sudut *roll* berturut-turut $6,314^{\circ}$ dan $2,079^{\circ}$.

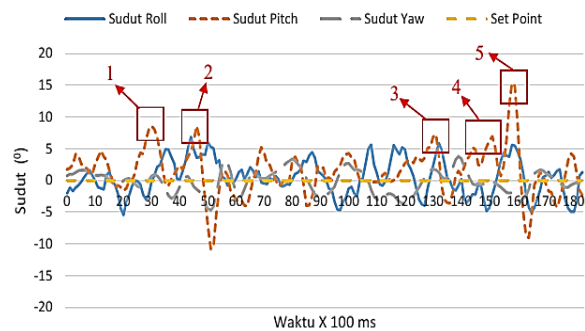
Gangguan pada pitch

Dalam pengujian keseluruhan dengan gangguan pada sudut *pitch*, sistem diberikan gangguan pada sudut *pitch* sebanyak lima kali, dengan hasil pengujian yang terlihat pada Gambar 16. Letak gangguan ditunjukkan dalam angka 1-5. Pada gangguan pertama, sistem diberi gangguan pada sudut *pitch* sebesar $8,038^{\circ}$, pada gangguan kedua sebesar $8,572^{\circ}$, gangguan ketiga sebesar $7,256^{\circ}$, gangguan keempat sebesar $6,918^{\circ}$, dan gangguan kelima sebesar $14,872^{\circ}$.

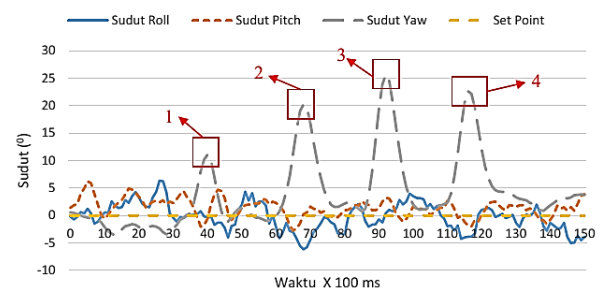
Pada gangguan pertama, sistem mampu menuju dan mencapai *set point*-nya, sedangkan pada gangguan kedua sistem mengalami *overshoot* sebesar $-10,756^{\circ}$. Hal ini disebabkan adanya tolakan dan pantulan pada



Gambar 15. Gangguan pada roll



Gambar 16. Gangguan pada pitch



Gambar 17. Gangguan pada yaw

alat uji, namun sistem tetap menuju nilai *set point*-nya walaupun mengalami osilasi. Pada gangguan ketiga, sistem mengalami *overshoot* sebesar $-3,256^{\circ}$. Setelah itu, sistem diberi gangguan ke-empat dan ke-lima dengan waktu jeda yang relatif singkat, yaitu sebesar $0,9$ detik. Pada gangguan kelima, sistem mengalami *overshoot* sebesar $-9,028^{\circ}$. Osilasi pada sudut *pitch* menyebabkan osilasi pada sudut *roll* dan *yaw* karena pergerakan sudut *roll*, *pitch*, dan *yaw* saling berhubungan [1]. Galat maksimal dan rata-rata sudut *pitch* berturut-turut $6,722^{\circ}$ dan $2,266^{\circ}$.

Gangguan pada yaw

Gambar 17 menunjukkan hasil pengujian keseluruhan sistem dengan gangguan yang diberikan pada sudut *yaw*. Gangguan diberikan sebanyak empat kali yang ditunjukkan dengan angka 1-4. Pada gangguan pertama, sistem diberi gangguan pada sudut *yaw* sebesar $11,138^{\circ}$, pada gangguan kedua sebesar $19,578^{\circ}$, gangguan ketiga sebesar $25,646^{\circ}$, dan keempat sebesar $22,152^{\circ}$.

Ketika sistem diberikan gangguan pada sudut yaw, sistem dapat mempertahankan posisi sudutnya, baik pada sudut yaw, roll, ataupun pitch walaupun sistem mengalami sedikit osilasi. Osilasi pada sudut yaw menyebabkan osilasi pada sudut roll dan pitch karena pergerakan sudut roll, pitch, dan yaw saling berhubungan satu sama lain [1]. Galat maksimal dan rata-rata sudut yaw berturut-turut $3,82^{\circ}$ dan $1,528^{\circ}$.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa ketika quadrotor diuji dengan menggunakan gangguan eksternal, respons sistem yang diberikan mampu mempertahankan attitude quadrotor mendekati setpoint walaupun osilasi yang dihasilkan cukup signifikan, namun tetap mampu kembali ke 0° sehingga mampu melakukan hovering seperti [4]. Berdasarkan hasil percobaan tersebut, metode kendali self-tuning fuzzy-PD yang dirancang terbukti mampu mencapai setpoint serta mencapai keadaan tunak dengan settling time yang relatif singkat, yakni antara 2 hingga 4 detik, sebagai salah satu kemampuan kendali gerak quadrotor sesuai [5]-[7].

Hasil ini menunjukkan settling time yang lebih cepat jika dibandingkan dengan [12] yang menggunakan PSO-PID sebesar 6,4 detik dengan hanya satu sumbu. Selain itu, nilai rata-rata galat sudut yang dihasilkan juga lebih kecil. Waktu settling time yang diperoleh dalam kajian ini lebih lambat daripada [14] yang menggunakan PID fuzzy sebesar 0,2 detik sampai 0,49 detik. Namun, hasil ini diperoleh dari simulasi quadrotor tanpa gangguan menggunakan Matlab. Bahkan, jika diberikan gangguan, waktu settling time kajian ini jauh lebih cepat daripada [14] sebesar 30 detik.

IV. KESIMPULAN

Nilai singleton fuzzy diperoleh melalui penalaan dan persamaan Ziegler-Nichols II serta menghasilkan nilai K_p dan K_d berturut-turut 1,65 dan 0,17 pada sudut roll, 1,65 dan 0,17 pada sudut pitch, dan 2,34 dan 0,387 pada sudut yaw. Sistem kendali self-tuning tersebut mampu mempertahankan attitude quadrotor ketika diberikan gangguan baik dari sudut roll, pitch maupun sudut yaw, dengan galat absolut maksimal dan rata-rata berturut-turut sebesar $6,314^{\circ}$ dan $2,079^{\circ}$ pada sudut roll, $6,722^{\circ}$ dan $2,266^{\circ}$ pada sudut pitch, dan $3,82^{\circ}$ dan $1,528^{\circ}$ pada sudut yaw dengan settling time antara 2 hingga 4 detik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. M. B. Domingues, "Quadrotor prototype," *MS Thesis*, University of Lisbon, Lisbon, Portugal, 2009.
- [2] M. Prabha, R. Thottungal, and S. Kaliappan, "Modeling and simulation of x-quadcopter control," *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 282-287, 2016.
- [3] P. Wang, Z. Man, Z. Cao, J. Zheng, and Y. Zhao, "Dynamics modelling and linear control of quadcopter," in *2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, Melbourne, Australia, Dec. 2016, pp. 498-503,. doi: [10.1109/ICAMechS.2016.7813499](https://doi.org/10.1109/ICAMechS.2016.7813499)
- [4] A. Dharmawan and I. F. Arismawan, "Sistem kendali penerbangan quadrotor pada keadaan melayang dengan metode LQR dan Kalman filter," *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, vol. 7, no. 1, pp. 49-60, 2017. doi: [10.22146/ijeis.15262](https://doi.org/10.22146/ijeis.15262)
- [5] H. Arrosida, "Perancangan metode kontrol LQR (linear quadratic regulator) sebagai solusi optimal pengendalian gerak quadrotor," in *Seminar Nasional MASTER: Maritim, Sains, dan Teknologi Terapan*, Surabaya, Indonesia, Dec. 2016, pp. 109-122.
- [6] I. Sa and P. Corke, "System identification, estimation and control for a cost effective open-source quadcopter," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Saint Paul, USA, May. 2012, pp. 2202-2209. doi: [10.1109/ICRA.2012.6224896](https://doi.org/10.1109/ICRA.2012.6224896)
- [7] B. Erginer and E. Altuğ, "Design and implementation of a hybrid fuzzy logic controller for a quadrotor VTOL vehicle," *International Journal of Control, Automation and Systems*, vol. 10, pp. 61-70, 2012. doi: [10.1007/s12555-012-0107-0](https://doi.org/10.1007/s12555-012-0107-0)
- [8] A. Noordin, M. A. M. Basri, Z. Mohamed, and A. F. Z. Abidin, "Modelling and PSO fine-tuned PID control of quadrotor UAV," *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 1367-1373, 2017. doi: [10.18517/ijaseit.7.4.3141](https://doi.org/10.18517/ijaseit.7.4.3141)
- [9] V. Mohammadi, S. Ghaemi, and H. Kharrati, "PSO tuned FLC for full autopilot control of quadrotor to tackle wind disturbance using bond graph approach," *Applied Soft Computing*, vol. 65, pp. 184-195, 2018. doi: [10.1016/j.asoc.2018.01.015](https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.01.015)
- [10] T. K. Priyambodo, A. Dharmawan, O. A. Dhewa, and N. A. S. Putro, "Optimizing control based on fine tune PID using ant colony logic for vertical moving control of UAV system," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1755, no. 1, 170011, pp. 1-6, 2016. doi: [10.1063/1.4958613](https://doi.org/10.1063/1.4958613)
- [11] H. Noshahri and H. Kharrati, "PID controller design for unmanned aerial vehicle using genetic algorithm," in *23rd International Symposium on Industrial Electronics*, Istanbul, Turkey, Jun. 2014. doi: [10.1109/ISIE.2014.6864613](https://doi.org/10.1109/ISIE.2014.6864613)
- [12] M. S. Sulila, M. A. Riyadi and others, "Particle swarm optimization (PSO)-based self tuning proportional, integral, derivative (PID) for bearing navigation control system on quadcopter," in *4th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering*, Semarang, Indonesia, Oct. 2017, pp. 181-186. doi: [10.1109/ICITACEE.2017.8257699](https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2017.8257699)
- [13] P. A. Kusuma and A. Dharmawan, "Pengendalian kestabilan ketinggian pada penerbangan quadrotor dengan metode PID fuzzy," *IJEIS (Indonesian Journal of Electronics and Instrumentation Systems)*, vol. 7, no. 1, pp. 61-70, 2017. doi: [10.22146/ijeis.15456](https://doi.org/10.22146/ijeis.15456)

- [14] A. Faizal, E. Ismaredah and I. F. Ridho, "Perancangan pengendalian hover quadcopter menggunakan pengendali hybrid fuzzy dan proportional integral derivative (PID)," *Jurnal Ecotipe (Electronic, Control, Telecommunication, Information, and Power Engineering)*, vol. 5, pp. 19-28, 2018. doi: [10.33019/ecotipe.v5i2.647](https://doi.org/10.33019/ecotipe.v5i2.647)
- [15] K. Ogata and Y. Yang, *Modern control engineering*, vol. 5. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.