

PENINGKATAN PERFORMANSI MANUEVER GERAKAN ROLL HEXACOPTER DENGAN METODA KENDALI PID ADAPTIF

Al Al¹⁾*, Aswir Premadi²⁾, Asnal Effendi³⁾, Alfith⁴⁾, Dasman⁵⁾, Andi Syofian⁶⁾

^{1, 2), 3), 4), 5)} Dosen Program Studi Teknologi Rekayasa Instalasi Listrik, Fakultas Vokasi

⁶⁾ Dosen Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik

Institut Teknologi Padang

*Correspondent Author E-mail: al.mtdrs@gmail.com

Abstract

In the Hexacopter flight control system, there are three very influential movements, namely Pitch, Roll and Yaw movements. Roll movement is very important to note because it affects the direction of the plane's flight. This movement is strongly influenced by the system's dynamic response to changes in hardware characteristics and the influence of changes in wind direction and speed from external systems. For this reason, this research is offered to implement a control system that can adapt to these dynamic disturbances. This study proposes the application of a proportional integral derivative (PID) control system, where constant values can adjust to dynamic changes in the system. The value of these constants can adjust to changes in errors and momentary delta errors. then a fuzzy logic controller (FLC) algorithm is applied, to make the constant values adaptable. The design of Fuzzification and Defuzzification is based on the maximum error and delta error limits. After real-plant testing, system performance is obtained as follows: settling time = 24mS; peak time 21mS; rise time = 9mS; delay time = 4.4mS; percent overshoot and steady state error = 1%.

Keywords: Hexacopter, Adaptive PID

Abstrak

Pada sistem kendali penerbangan Hexacopter terdapat tiga gerakan yang sangat berpengaruh yaitu gerakan Pitch, Roll dan Yaw. Pergerakan roll sangat penting untuk diperhatikan karena mempengaruhi arah terbang pesawat. Pergerakan ini sangat dipengaruhi oleh respon dinamis sistem terhadap perubahan karakteristik perangkat keras dan pengaruh perubahan arah dan kecepatan angin dari sistem eksternal. Untuk itu penelitian ini ditawarkan untuk mengimplementasikan sistem kontrol yang dapat beradaptasi dengan gangguan dinamis tersebut. Penelitian ini mengusulkan penerapan sistem kendali proporsional integral derivatif (PID), dimana nilai konstanta dapat menyesuaikan dengan perubahan dinamis pada sistem. Nilai konstanta tersebut dapat menyesuaikan dengan perubahan error dan delta error sesaat. kemudian algoritma fuzzy logic controller (FLC) diterapkan, untuk membuat nilai konstanta dapat diadaptasi. Perancangan Fuzzifikasi dan Defuzzifikasi didasarkan pada nilai batas maksimal error dan delta error. Setelah pengujian real-plant, kinerja sistem diperoleh sebagai berikut: settling time = 24mS; waktu puncak 21mS; waktu naik = 9mS; waktu tunda = 4,4mS; persen overshoot dan kesalahan kondisi tunak = 1%.

Kata Kunci: Hexacopter, PID Adaptif

1. PENDAHULUAN

Perkembangan throttle pada Hexacopter akan mempengaruhi naiknya pesawat tergantung dari kecepatan masing-masing rotor hexacopter tersebut. Gerakan rolling adalah gerakan rotasi pada Hexacopter sumbu X yang dipengaruhi oleh perubahan kecepatan hexacopter pada rotor kanan dan kiri. Gerakan pitch adalah rotasi pada sumbu Y dan gerakan ini dipengaruhi oleh perubahan kecepatan Hexacopter di depan dan meningkatkan rotor. Gerakan presisi yaw adalah gerakan rotasi hexacopter pada sumbu Z [1][2] [3].

Hexacopter memiliki beberapa fungsi seperti di bidang militer, digunakan untuk memotret daerah musuh, daerah perselisihan, atau untuk memata-matai musuh. Adapun untuk keperluan tertentu, hexacopter digunakan untuk pemetaan zona yang lebih jauh, pemeriksaan gunung berapi, pengamatan sumbatan, atau pengambilan gambar zona pasca kegagalan gelombang pasang [4].

Miftah Ilhami dan kawan kawan 2017 [5], melakukan kajian rekapitulasi Rencana Kerangka Kerja Kendali Pesawat Hexacopter Multi Revolving Wing, menggunakan strategi Corresponding Indispensably Subordinate (PID) dengan waktu stabilisasi 1,19 detik dan waktu melebihi 2,8% dalam kerangka roll dan pitch. stabilisasi 2,327 detik dan lebih dari 1,03% pada kerangka yaw. Sementara itu, Mochammad Zaky dan kawan-kawan, 2020 [6], telah melakukan penelitian penerapan PID untuk mengendalikan ramble hexacopter manual dengan hasil settling time 0,98 detik dan overshoot 1,03% pada rangka roll, settling time 0,672 detik dan lebih. Dengan melihat beberapa penelitian sebelumnya terlihat bahwa mereka menggunakan metode yang sama yaitu kontrol PID. Pada prinsipnya kinerja dari sistem kendali ini dapat lebih ditingkatkan lagi untuk mendapatkan sistem kendali Hexacopter yang lebih handal. Sehubungan dengan hal tersebut di atas, cukup menarik untuk dibahas dalam penelitian ini, dan melaporkan bagaimana mendapatkan nilai konstanta K_p , K_i dan K_d yang lebih baik, dengan menerapkan metode Ziegler-Nichols. Selanjutnya bagaimana cara memperbaiki parameter sistem kontrol jika PID belum didapatkan nilai yang lebih optimal.

Pengaturan yaw dilakukan untuk memutar posisi Hexacopter dengan bagian tengah tetap pada posisi yang sama, dan dengan mengurangi kecepatan 2 rotor yang memiliki arah putar yang sama dan memperluas putaran 2 rotor yang memiliki arah putaran terbalik. dua rotor sebelumnya. Jika kecepatan rotor yang dibersihkan dan kanan berkurang di sisi depan dan kecepatan rotor meningkat, Hexacopter berputar berlawanan arah jarum jam dengan pusat sebagai sumbu [7], [8]. Parameter Kontroler PID digunakan untuk mengontrol penyetelan mesin. Titik kemiringan dibaca secara hati-hati oleh sensor MPU6050 terhadap nilai keadaan yang ditentukan dari setiap setpoint. Sedangkan parameter hasil berupa beat PWM dengan lebar tertentu yang dapat digunakan untuk mengubah kecepatan putar mesin BLDC [9]. Logika fuzzy dapat menunjukkan kapasitas nonlinier yang sangat kompleks. Logika fuzzy dapat membangun dan menerapkan pertemuan ahli secara langsung tanpa harus melalui proses persiapan. Dalam hal ini, sering disebut sebagai Fuzzy Master Frameworks bagian terpenting [10][11].

Semua prosedur yang akan digunakan pada Fuzzifikasi, Obstruksi, dan Defuzzifikasi mengacu pada apa yang ada di database fuzzy. Dengan cara ini, basis informasi Fuzzy memainkan peran penting dalam kerangka halus [12]. Fuzzifikasi merupakan bagian dari kerangka halus yang berfungsi mengubah nilai positif menjadi faktor etimologis. Pegangan ini terdiri dari membangun pekerjaan pendaftaran berdasarkan database fuzzy. Selain itu, deduksi menunjukkan alasan untuk membuat pilihan. Tabel FAM biasanya mendeskripsikan segmen ini (Fuzzy Associative Map) [13]. Dalam menentukan reaksi temporal kerangka kendali dengan langkah input ditentukan oleh parameter seperti [14][15]: Delay Time (td); Waktu Naik (tr); Waktu (ts); Waktu Teratas (tp); Persen Overshoot (% Mp); Kesalahan status yang tak tergoyahkan.

Strategi Ziegler-Nichols adalah strategi langkah-reaksi yang digunakan dalam mengeksplorasi penyetelan loop terbuka. Strategi ini memiliki 2 parameter yaitu L (dead time) dan T (delay time). Garis ini akan bertemu dengan sumbu absis dan garis paling ekstrim. Titik perpotongan garis singgung dengan hub absis dapat berupa derajat waktu mati, dan titik perpotongan dengan garis yang paling ekstrim adalah waktu tunda yang diukur dari titik waktu L. Untuk sementara mendapatkan reaksi plant terhadap unit-input langkah akan menghasilkan tikungan-S. Menentukan parameter kontrol PID Untuk plant yang model matematisnya tidak diketahui, penalaan Ziegler-Nichols dapat diterapkan [16][17][18].

2. METODOLOGI

Untuk mendapatkan informasi tes asli dan informasi tes demonstrasi, Anda memerlukan program komputer MATLAB dan program Arduino IDE. Jeroen et. al, Sepanjang tahun 2017, dalam merencanakan pengendalian PID untuk pengendalian mesin terbang Hexacopter, digunakan pendekatan strategi perubahan terprogram pengendali PID Hexacopter. Nilai yang diperoleh dari PID konsisten kemudian dibandingkan dengan strategi tuning konsisten Ziegler-Nichols PID [19] [20]. Informasi reaksi kerangka kerja loop terbuka diambil untuk bukti yang dapat dikenali menggunakan simpanan alat bukti pembeda kerangka kerja (SIT). Model ilmiah digunakan untuk melakukan rekreasi dengan Simulink MATLAB. Peragaan ulang dengan Simulink mendapat reaksi loop terbuka untuk memutuskan apakah reaksi tersebut mendekati reaksi loop terbuka tanaman asli. Selain itu,

reaksi loop terbuka juga digunakan untuk mendapatkan nilai PID yang konsisten menggunakan strategi Ziegler-Nichols, sebagai tolak ukur pengantar untuk melakukan uji coba & kesalahan pada kerangka kerja dalam peragaan ulang. menghargai salah satu nilai set-point, uji coba dilakukan pada nilai set-point lain yang berbeda. Terhadap perubahan beberapa nilai setpoint, reaksi kerangka diamati untuk mendapatkan nilai fuzzifikasi. Dengan menggunakan kontroler rasional halus, penyetelan PID dilakukan secara otomatis sehingga nilai PID secara konsisten berubah atau dapat menyesuaikan secara otomatis ke titik setel yang diinginkan. Ini adalah referensi untuk pengembangan instruksi pada Throttle (Throttle) menjadi instruksi perubahan set-point dalam dialek khusus [21]. Langkah-langkah yang termasuk dalam menjalankan strategi penyelidikan ini dapat dijelaskan sebagai berikut [22]: pengukuran/pengujian sinyal kontrol PWM dan kecepatan rotor; Pengujian kerangka kerja loop terbuka; Pengumpulan data pengukuran; Pemrosesan data loop terbuka untuk mendapatkan model matematis dari sistem; Simulasi uji validasi model matematika; Pengolahan data model loop terbuka untuk mendapatkan nilai konstanta PID menggunakan metode Ziegler-Nichols; Menguji model loop tertutup untuk mendapatkan kinerja yang dicapai oleh sistem menggunakan konstanta PID yang diperoleh dengan metode Ziegler-Nichols; Uji coba model loop tertutup dengan berbagai nilai setpoint; Fuzzifikasi dan defuzzifikasi; Pengujian model dengan kontrol PID dengan penalaan otomatis Fuzzy. Dalam penelitian ini digunakan berbagai peralatan dan material antara lain pesawat Hexacopter; Sensor Girokop MPU 6050; Osiloskop; Arc, sebagai tes sudut faktual yang dibaca Girokop; Arduino IDE; MATLAB sebagai perangkat lunak simulasi dan identifikasi sistem. Tempat uji telah dirakit dan konstruksinya ditunjukkan pada Gambar 1. Sementara posisi pesawat, rotor, atau motor BLDC pada sistem pengujian ditunjukkan pada Gambar 1 Gambar 2 juga menunjukkan penempatan masing-masing ESC pada angka 1,2,3,4,5 dan 6.

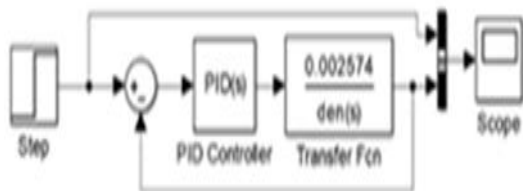


Gambar 1. Alat Uji Gerakan Maneuver Hexacopter



Gambar 2. Posisi Motor Pada Hexacopter

Untuk menguji respon open loop terhadap model sistem, dilakukan simulasi dengan SIMULINK MATLAB seperti pada diagram blok pada Gambar 3 [23]. Hasil identifikasi yang diperoleh dengan bantuan SIT MATLAB digunakan sebagai model matematis plant yang akan diberi perlakuan dengan berbagai konstanta aksi kontrol PID hingga diperoleh nilai yang paling optimal seperti pada Gambar 4. Untuk meningkatkan respon sistem agar lebih optimal, Fuzzy Logic Controller (FLC) ditambahkan untuk menyetel konstanta PID selama proses kontrol. Pengaturan konstanta PID oleh FLC didasarkan pada besar kecilnya nilai error dan laju perubahan error atau delta error (de) [24].



Gambar 3. Diagram simulasi sistem open loop



Gambar 4. Diagram simulasi Sistem closed loop

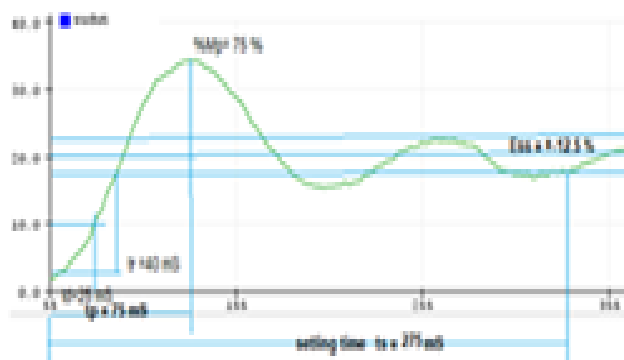
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses pengukuran resultan gerakan Pitch dilakukan dengan memberikan konfigurasi kecepatan putar motor M1 hingga M6 melalui variasi sinyal kontrol PWM yang diberikan pada sistem pengukuran ini. Pengukuran sudut kemiringan gerakan Roll dideteksi melalui sensor Gyroscope. Data dari Gyroskop melalui Arduino dikirim ke PC untuk penyimpanan data dan dapat menampilkan grafik secara real time. Lebih lanjut, contoh data pengukuran ini dapat dijelaskan sebagai berikut; Gerakan Roll adalah gerakan yang dihasilkan karena konfigurasi kecepatan putar motor 1, 2 dan 3 serta motor 4, 5 dan 6. Ketika motor 1, 2 dan 3 berputar lebih cepat dari motor 4, 5 dan 6 maka Terjadi Roll Up, begitu juga sebaliknya jika motor 4, 5 dan 6 lebih cepat dari motor 1, 2 dan 3, maka akan terjadi Roll Down seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Kemiringan Sudut Pada Gerakan Roll

Motor rotation speed configuration						Relevance	
M1(Rpm)	M2(Rpm)	M3(Rpm)	M4(Rpm)	M5(Rpm)	M6(Rpm)	Resultant movement	Angular Degree (°)
704	712	706	711	714	715	balance	0
605	1306	608	1798	1172	598	Pitch	25
586	1576	604	2223	1146	553	Up	50
606	1243	612	605	1170	1750	Pitch	-25
596	1431	611	597	1160	2264	down	-50

Proses pengukuran sistem loop terbuka dapat dilakukan dengan menggunakan metode ini, terhadap objek pengukuran. Selain itu respon loop terbuka ini juga digunakan untuk menentukan kinerja sistem sebelum menambahkan sistem kontrol [25]. Hasil pengujian respon loop terbuka sistem ini, hasil plot grafik ditunjukkan pada Gambar 5. Dengan mengamati Gambar 5 diperoleh hasil sebagai berikut: Setling time $t_s =$



Gambar 5. Grafik Respon System Open Loop

275 mS = 350 mS; Peak time $t_p = 75 \text{ mS} = 95 \text{ mS}$; Rise time $t_r = 40 \text{ mS} = 50 \text{ mS}$; Delay time $t_d = 25 \text{ mS} = 32 \text{ mS}$; Persen maximum Overshoot $\%M_p = 75 \%$; Error steady state $E_{ss} = 12.5\%$.

Nilai parameter berubah karena waktu dalam pengujian melalui interfacing Arduino ke MATLAB setelah dikalibrasi dengan Google real time ternyata satuan waktu dalam pengukuran dan simulasi harus dikalikan dengan 0,0126 detik. Sehingga waktu setting data 275 mS harus dikalikan dengan 0,0126 S, menjadi = 350 mS, dan sama untuk parameter lainnya.

Kontroler PID dapat disetel dengan beberapa cara, termasuk penyetelan Ziegler-Nichols, penyetelan loop, metode analitik, optimisasi, penempatan pole, penyetelan otomatis, dan penyetelan tangan [26]. Pada kesempatan ini digunakan metode Ziegler-Nichols yaitu dengan melakukan percobaan respon plant dari input step unit pada rangkaian open loop. Dengan menganalisis data grafik yang ditampilkan, nilai konstanta PID K_p , K_i dan K_d dapat dihitung sebagai berikut:

$$K_p=1,2 \text{ T/L}=1,2 \cdot 40/12=3.33 \quad T_i=2 \times L=2 \times 12=24 \quad T_d=0,5 \times L=0,5 \times 12=6$$

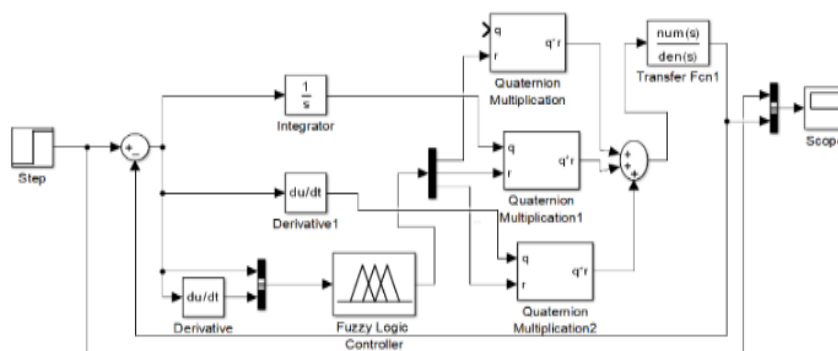
$$K_i=K_p / T_i=3.33 / 24=0.14 \quad K_d=K_p \cdot T_d=3.33 \cdot 6=19.98$$

Selain untuk menentukan konstanta PID, respon loop terbuka juga digunakan untuk mengidentifikasi model matematis atau fungsi transfer dari sistem. Data respons loop terbuka yang diproses dimasukkan ke lembar kerja MATLAB. Dengan bantuan System Identification Tool box (SIT), dilakukan proses identifikasi dan setelah divalidasi dibuat model matematis dari sistem tersebut; pembilangnya adalah 0,002574; penyebutnya adalah $S^2+0.024666S+0,0003888$.

Hasil simulasi dengan menggunakan fasilitas Automatic Tuning Simulink belum menghasilkan sistem yang stabil, disini nilai konstanta PID yang didapatkan adalah $K_P=0.3225$, $I=0.00413$, dan $D=6.323$. Selanjutnya untuk mendapatkan nilai konstanta PID yang lebih optimal dilakukan dengan metode “trial and error”. Untuk mendapatkan nilai konstanta PID yang lebih optimal dilakukan dengan metode “trial and error”, dengan hasil tuning diperoleh nilai $K_p = 3,33$, nilai $I = 24$ ($K_i = 1/T_i = 1/24 = 0,041$), dan nilai $d = 900$. Nilai K_p dan I disini sesuai dengan metode Ziegler-Nichols yang sangat berbeda jauh hanya D dengan nilai $= 900$.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kinerja sistem mulai membaik, dimana parameter sistem telah mencapai nilai: Settling time $t_s = 0,063$ S; Waktu puncak $t_p = 0,022$ S; Rise time $t_r = 0.010$ S dan Delay time (t_d) = 0.005 S; %MP = 10 % dan $E_{ss}=0$ %. Pada hasil analisis parameter respon waktu respon dan error steady state sudah baik, namun overshoot masih 10%, hal ini masih perlu dicari solusinya lagi yaitu dengan menggunakan Fuzzy Logic Controller (FLC). FLC digunakan untuk menyetel konstanta PID secara otomatis, sesuai dengan nilai kesalahan dan kesalahan delta sesaat.

Untuk meningkatkan respon sistem lebih optimal, pada kesempatan ini ditambahkan FLC yang berfungsi sebagai bagian kontrol yang melakukan tuning konstanta PID selama proses kontrol. Setting konstanta PID dengan FLC berdasarkan besar kecilnya nilai Error dan tingkat perubahan error. Diagram simulasi ditunjukkan pada Gambar 6



Gambar 6. Diagram Simulasi Self Tuning PID Fuzzy

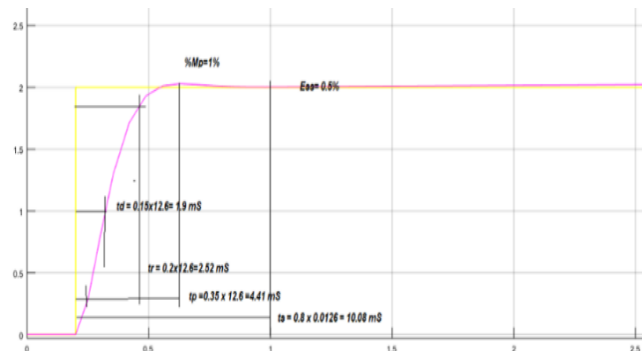
Penambahan FLC pada sistem kontrol PID untuk menyesuaikan konstanta PID secara otomatis berdasarkan error dan nilai delta-error diharapkan dapat diantisipasi, sedangkan pengaruh eksternal juga dapat menyesuaikan situasi terhadap perubahan set point. Perubahan set-point ini identik dengan mengubah perintah melalui Remote Control. Nilai konstanta default adalah nilai konstanta PID yang baik yang diperoleh melalui metode Ziegler-Nichols dan Trial and Error pada langkah sebelumnya. Nilai default ini dilambangkan dengan M (tengah) dalam aturan Fuzzy. Keadaan default terjadi ketika sistem telah mencapai stabilitas. Jika dilihat dari input member membership pada saat error dan delt-error sudah mencapai nol. Perancangan kontroler logika fuzzy ini membutuhkan dua input dan tiga output. Input 1 adalah error dan input 2 adalah delta-error. Sedangkan keluaran 1 adalah K_p , keluaran 2 adalah K_i , dan keluaran 3 adalah K_d . Kesalahan fungsi, kesalahan delta dan keluaran. Karena fungsi keanggotaan keluaran K_p K_i dan K_d sama, hanya satu gambar yang ditampilkan, yang mewakili yang lain.

Tabel fungsi keanggotaan yang dirancang sebelum mengisi Simulink ditunjukkan pada Tabel 2. Setelah dilakukan simulasi sistem kontrol Self Tuning PID Fuzzy Controller, didapatkan respon sistem yang lebih baik seperti pada Gambar 7.

Tabel 2. Distribusi Keluaran Kp Ki Kd Membership Function

Error Delta_Error	nb	nm	ns	Z	ps	pm	pb
nb	M	S	VS	VVS	VS	S	M
nm	B	M	S	VS	S	M	B
ns	VB	B	M	S	M	B	VB
Z	VVB	VB	B	M	B	VB	VVB
ps	VB	B	M	S	M	B	VB
pm	B	M	S	VS	S	M	B
pb	M	S	VS	VVS	VS	S	M

Dari Gambar 7 terlihat respon sistem semakin baik, dimana telah didapatkan terutama persen overshoot (%Mp) sebesar 1% dan kesalahan steady state (Ess) = 0,5 %. Sedangkan nilai parameter respon sistem lainnya adalah: Settling time = 10,08 mS; waktu puncak tp = 4,91 mS waktu naik tr = 2,52 mS; waktu tunda td = 1,9 mS. Respon sistem kendali pesawat Hexacopter pada Test Stand memiliki nilai parameter sebagai berikut: ts = 34 mS; tp= 21 mS; tr = 9,4 mS; td= 6,5 mS; % Mp = 7,5 %; Es = 1%. Dari data parameter terlihat bahwa telah terjadi banyak peningkatan pada respon sistem. Walaupun over shoot (%Mp) masih 7,5%, tapi steady state error (Ess) bisa diatasi hingga satu persen.



Gambar 7. Respon System Self Tuning PID Fuzzy

4. KESIMPULAN

Penerapan sistem kontrol PID Tuning Fuzzy Logic Controller telah meningkatkan parameter sistem secara signifikan dalam simulasi, tetapi pada instalasi nyata atau aplikasi langsung ke sistem aktual, hal itu sedikit berkurang. Untuk waktu respon seperti: settling time; waktu naik; waktu puncak; waktu tunda, sistem pengenalan PID penyetelan Fuzzy jauh lebih baik daripada PID biasa. Meskipun terjadi sedikit penurunan kinerja pada real plant namun masih lebih baik, seperti PID rise time 10 mS dan PID Fuzzy 2,52 mS, sedangkan PID Fuzzy real plant antara 9 mS sampai 9,2 mS. Dari segi persen overshoot % Mp juga terlihat adanya peningkatan performa dari PID sebesar 10%, PID Fuzzy sebesar 1%, dan PID Fuzzy real plant sebesar 7,5%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Miljković, D. (2018, May). Methods for attenuation of unmanned aerial vehicle noise. In *2018 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)* (pp. 0914-0919). IEEE.
- [2] Lu, D., Xiong, C., Zhou, H., Lyu, C., Hu, R., Yu, C., ... & Lian, L. (2021). Design, fabrication, and characterization of a multimodal hybrid aerial underwater vehicle. *Ocean Engineering*, 219, 108324.
- [3] I. G. M. Darmawiguna, G. S. Santyadiputra, and I. M. G. Sunarya, "Perancangan Prototipe Perangkat C-Uav (Courier Unmanned Aerial Vehicle) Berbasis Gps," *Semin. Nas. Ris. Inov.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [4] Lavers, C. (2021). Design in Engineering: An Evaluation of Civilian and Military Unmanned Aerial Vehicle Platforms, Embody Mitigation Against Asymmetric Hostile Actor Exploitation.
- [5] M. Ilhami, H. Nurhadi, B. Sampurno, and L. Rusdiyana, "Desain Sistem Kendali Pesawat Multi Rotary Wing UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Hexacopter."
- [6] M. Zaky, D. Minggu, and G. Sulistiyanto, "Penerapan PID (Proportional Integral Derivative) Untuk Mengontrol Mode Manual Drone Hexacopter," vol. 2, no. 1, 2020.
- [7] M. Zaky, D. Minggu, and G. Sulistiyanto, "Penerapan PID (Proportional Integral Derivative) Untuk Mengontrol Mode Manual Drone Hexacopter," vol. 2, no. 1, 2020.]
- [8] L. C. Dale, S. Darma, and P. Prawito, "Rancang Bangun Dan Kendali Semi- Otomatis Hexacopter Dengan Algoritma Genetik a*," vol. V, pp. SNF2016-CIP- 131-SNF2016-CIP-136, 2016.
- [9] Peralta, J., Peretti, G., Romero, E., Demarco, G., & Marqués, C. (2011). Quality Assessment of Transient Response Analysis Method for Detecting Radiation-Induced Faults. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, 2011.
- [10] Meshram, P. M., & Kanojiya, R. G. (2012, March). Tuning of PID controller using Ziegler-Nichol's method for speed control of DC motor. In *IEEE-international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM-2012)* (pp. 117-122). IEEE.
- [11] WISNU, C. (2014). IMPLEMENTASI METODE KENDALI PID ZIEGLER-NICHOLS PADA PESAWAT TILT-TWINROTOR (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada).
- [12] Ponksawat, P., & Wang, L. (2017, October). Automatic tuning of hexacopter attitude control systems with experimental validation. In *2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)* (pp. 753-758). IEEE.
- [13] Tashakori, A., Hassanudeen, M., & Ektesabi, M. (2015, June). FPGA based controller drive of BLDC motor using digital PWM technique. In *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems* (pp. 658-662). IEEE.
- [14] Oliveira, P. M., Vrančić, D., Cunha, J. B., & Pires, E. S. (2014). Teaching particle swarm optimization through an open-loop system identification project. *Computer Applications in Engineering Education*, 22(2), 227-237.
- [15] Peralta, J., Peretti, G., Romero, E., Demarco, G., & Marqués, C. (2011). Quality Assessment of Transient Response Analysis Method for Detecting Radiation-Induced Faults. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, 2011.
- [16] Meshram, P. M., & Kanojiya, R. G. (2012, March). Tuning of PID controller using Ziegler-Nichol's method for speed control of DC motor. In *IEEE-international conference on advances in engineering, science and management (ICAESM-2012)* (pp. 117-122). IEEE.
- [17] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2004). Revisiting the Ziegler–Nichol's step response method for PID control. *Journal of process control*, 14(6), 635-650.
- [18] Mazlan, N. N. B. M., Thamrin, N. M., & Razak, N. A. (2020, June). Comparison Between Ziegler-Nichols and AMIGO Tuning Techniques in Automated Steering Control System for Autonomous Vehicle. In *2020 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS)* (pp. 7-12). IEEE.
- [19] Tashakori, A., Hassanudeen, M., & Ektesabi, M. (2015, June). FPGA based controller drive of BLDC motor using digital PWM technique. In *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems* (pp. 658-662). IEEE.

- [20] P. Poksawat and L. Wang, "Automatic tuning of hexacopter attitude control systems with experimental validation," 2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2017, pp. 753-758, doi: 10.1109/ICSTCC.2017.8107127.
- [21] Qian, G. M., Pebrianti, D., Bayuaji, L., Abdullah, N. R. H., Mustafa, M., Syafrullah, M., & Riyanto, I. (2018). Waypoint navigation of quad-rotor MAV using Fuzzy-PID control. In *Intelligent Manufacturing & Mechatronics* (pp. 271-284). Springer, Singapore.
- [22] Pedaste, M., Mäeots, M., Siiman, L. A., De Jong, T., Van Riesen, S. A., Kamp, E. T., ... & Tsourlidaki, E. (2015). Phases of inquiry-based learning: Definitions and the inquiry cycle. *Educational research review*, 14, 47-61.
- [23] Upamanyu, K., & Narayanan, G. (2019). Improved accuracy, modeling, and stability analysis of power-hardware-in-loop simulation with open-loop inverter as power amplifier. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(1), 369-378.
- [24] Pal, A. K., & Mudi, R. K. (2008). Self-tuning fuzzy PI controller and its application to HVAC systems. *International journal of computational cognition*, 6(1), 25-30.
- [25] Rotshtein, A. P., & Shtovba, S. D. (2009). Modeling of the human operator reliability with the aid of the Sugeno fuzzy knowledge base. *Automation and Remote Control*, 70(1), 163-169.
- [26] Sussner, P., Esmi, E. L., Villaverde, I., & Graña, M. (2012). The Kosko subsethood fuzzy associative memory (KS-FAM): Mathematical background and applications in computer vision. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 42(2), 134-149.