

Pengendalian Kestabilan Ketinggian pada Penerbangan *Quadrotor* dengan Metode PID Fuzzy

Panca Agung Kusuma*¹, Andi Dharmawan²

¹Program Studi Elektronika dan Instrumentasi, FMIPA UGM, Yogyakarta

²Departemen Ilmu Komputer dan Elektronika, FMIPA UGM, Yogyakarta

e-mail: *panca.ak@gmail.com, dharmawan.andi@gmail.com

Abstrak

Quadrotor merupakan salah satu jenis wahana tanpa awak yang memiliki kemampuan lepas landas secara vertikal serta mampu mempertahankan posisinya pada saat terbang. Dalam menerbangkan *quadrotor* terkadang dibutuhkan ketinggian yang stabil untuk menjalankan misi tertentu. Dengan ketinggian yang stabil akan memudahkan pilot dalam mengendalikan pesawat untuk bergerak ke suatu arah.

Pada penelitian ini dirancang dan dibuat sistem yang mampu menstabilkan ketinggian *quadrotor* dengan menggunakan metode PID Fuzzy. Sistem kendali ketinggian dibutuhkan untuk membantu pilot mengendalikan kestabilan ketinggian *quadrotor* tanpa perlu mengatur throttle. Kendali dengan metode PID merupakan salah satu sistem kendali yang umum diterapkan pada *quadrotor*. Kendali ini mempunyai konstanta yang dapat ditala menggunakan logika fuzzy dengan pendekatan linguistik untuk memperbaiki tanggap waktu sistem pada saat mengatasi error.

Hasil penelitian menunjukkan metode kendali PID Fuzzy menghasilkan tanggap waktu yang lebih baik dibandingkan dengan metode PID saja. Implementasi kendali PID menghasilkan kendali kestabilan ketinggian dengan nilai rerata steady state error sebesar $\pm 1,86$ cm, sedangkan PID Fuzzy menghasilkan nilai rerata steady state error sebesar $\pm 1,22$ cm.

Kata kunci— UAV, *quadrotor*, PID, fuzzy, ketinggian

Abstract

Quadrotor is a kind of unmanned aerial vehicle that have the ability to take off vertically and maintaining its position while flying mid-air. Flying a *quadrotor* sometimes needs a stable altitude to perform a specific mission. A stable altitude will make easier for pilot to control the movement of the *quadrotor* to certain direction.

This study designed and implemented a system that can stabilises the altitude of a *quadrotor* by using Fuzzy-PID method. Altitude control system needed to help pilot controls the altitude stability without adjusting the throttle. Control with PID method is a common control system to be implemented on a *quadrotor*. This control system has a constant that can be tuned with fuzzy logic with linguistic approach to improve the response time when compensating an error.

The result of this study shows that Fuzzy PID control method generate a better response time compared with the PID-only method. The implementation of PID control generate an altitude stabilisation with a mean value steady state error of $\pm 1,86$ cm, whereas the PID Fuzzy generate a mean value of steady state error of $\pm 1,22$ cm.

Keywords— UAV, *quadrotor*, PID, fuzzy, altitude

1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi di berbagai bidang membuat manusia semakin mudah menjalankan suatu pekerjaan. Salah satu produk teknologi yang semakin banyak dipakai dan dikembangkan adalah *unmanned air vehicle* (UAV) atau pesawat terbang tanpa awak. UAV merupakan wahana terbang tanpa awak yang biasa dikendalikan dari jarak jauh maupun secara *autonomous*. Pengguna UAV tersebar dari kalangan militer, ilmuwan, hingga keperluan sipil lain. UAV secara umum dibagi menjadi 2 macam yaitu *fixed-wing* dan *rotary-wing*.

Quadrotor merupakan salah satu jenis UAV tipe *rotary-wing* yang mempunyai penggerak berupa 4 buah rotor yang disusun secara simetris. Pesawat ini dapat lepas landas dan mendarat secara vertikal atau biasa disebut *Vertical Take-off and Landing* (VTOL). Rancangan *quadrotor* cukup sederhana karena tidak memerlukan penggerak lain untuk dapat melakukan berbagai gerakan yaitu *roll*, *pitch*, dan *yaw*. Kesederhanaan rancangan mekanik ini memberi dampak yang cukup besar dalam hal kerumitan kendalinya [1]. Perbedaan gaya dorong sekecil apapun pada salah satu rotor dapat mempengaruhi gerakannya. Selain itu karakteristik motor yang berbeda-beda menambah tingkat kesulitan dalam memodelkan kendali *quadrotor*.

Kesederhanaan rancangan mekanik *quadrotor* memiliki keunggulan dalam pembuatan dan pengaplikasiannya. Sehingga *quadrotor* dapat dirancang sesuai keinginan untuk menjalankan suatu misi. Pada saat menjalankan misi tertentu, terkadang *quadrotor* memerlukan suatu mode seperti menahan ketinggian. Tujuan menahan ketinggian antara lain untuk menghindari halangan. Pada proses ini *quadrotor* masih tetap bisa bergerak bebas secara horizontal. Dalam mempertahankan ketinggian *quadrotor* memerlukan kendali yang stabil agar dapat mempertahankan ketinggian apabila menerima gangguan.

Untuk memudahkan pengendalian *quadrotor* diperlukan teknik kendali yang baik. Ada berbagai macam teknik kendali yang dapat diterapkan untuk mengendalikan kestabilan ketinggian, salah satunya adalah PID (*Proportional Integral Derivative*). Kendali PID merupakan salah satu teknik kendali yang sudah banyak digunakan dalam berbagai bidang. Teknik ini banyak digunakan karena kita bisa mengatasi berbagai masalah kendali hanya dengan mengubah nilai *gain* K_p , K_i , dan K_d PID. Penalaan nilai koefisien yang tepat akan menghasilkan kendali yang stabil. Akan tetapi, kendali PID ditujukan pada sistem yang linier untuk dapat bekerja dengan optimal [2]. Hal ini tentu merupakan salah satu kekurangan PID jika diterapkan pada *quadrotor* yang pada kenyataannya memiliki dinamika nonlinier [3]. Ada beberapa metode nonlinier yang dapat digunakan untuk melakukan penalaan konstanta K_p , K_i , dan K_d agar dapat memenuhi kebutuhan kendali *quadrotor*. Salah satu metode penalaan nonlinier yaitu dengan memanfaatkan logika *Fuzzy*. Logika *fuzzy* bekerja dengan meniru logika manusia dalam hal penalaran dan belajar. Sebagai contoh saat kita belajar mengendarai sepeda kita harus mencoba sendiri dengan mempraktekkan secara langsung dan belajar dari kesalahan. Kita belum tentu bisa langsung mengendarai sepeda hanya dengan mengetahui teorinya saja. Dengan memanfaatkan logika *Fuzzy*, sifat nonlinier *quadrotor* dapat diatasi karena tidak terpaku pada model matematika yang pada kenyataannya *quadrotor* mempunyai berbagai faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan terbang [4]. Oleh karena itu, dua metode ini dapat digunakan untuk mengatasi sistem kendali *quadrotor* yang nonlinier.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Analisis Sistem

Quadrotor yang digunakan juga menggunakan logika *fuzzy* untuk mengoptimalkan konstanta PID. Logika *fuzzy* akan bertugas sebagai penala otomatis konstanta PID yang

digunakan sistem berdasarkan umpan balik berupa nilai *error* dan *delta error*. Sistem ini memiliki konfigurasi (+) sehingga pergerakan *roll* dan *pitch*-nya dipengaruhi oleh dua buah rotor yang disusun secara simetris.

Quadrotor yang akan dibuat memiliki 4 buah rotor dengan konfigurasi (+) yang disusun simetris. Perbedaannya terdapat pada kemampuan sistem untuk menahan ketinggian. Untuk memberikan umpan balik nilai ketinggian pesawat dibutuhkan sebuah sensor ketinggian. Untuk memudahkan pengujian di ruangan yang terbatas maka akan digunakan sensor ultrasonik yang dipasang tegak lurus dengan sumbu horisontal pesawat. Sensor yang digunakan adalah sensor ultrasonik tipe HC-SRF04. Pancaran sinyal sensor ini adalah sebesar 15 derajat. Sehingga dapat mentoleransi $\pm 7,5$ derajat sudut kemiringan *quadrotor*. Sensor ini mempunyai kemampuan mengukur jarak dari 2 hingga 400 cm. namun akurasi sensor paling optimal dari sensor ini ada pada rentang 15 hingga 200 cm.

Metode pengendalian yang akan digunakan adalah kendali PID yang terbukti keandalannya untuk penerapan pada berbagai bidang. Penggunaan metode ini pada *quadrotor* sudah banyak dijumpai karena kemampuannya mengatasi sifat dinamis sistem *quadrotor* seperti yang dilakukan oleh [1]. Kinerja kendali PID ini akan optimal dengan penalaan yang baik. Penalaan dilakukan untuk memperoleh konstanta PID yang akan mempengaruhi karakteristik sistem seperti *rise time*, *settling time*, *overshoot*, dan *steady state error*. Untuk memperoleh nilai konstanta PID suatu sistem dapat dilakukan dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols (ZN). Metode ini digunakan karena mudah diterapkan pada sistem yang rumit seperti *quadrotor* tanpa memerlukan model matematikanya karena bisa langsung diuji coba pada sistem yang akan ditala. Nilai *gain* yang didapat mungkin akan menghasilkan tanggapan yang kurang baik sehingga memerlukan *fine tuning* sampai mendapatkan tanggapan sistem yang diinginkan[5].

Kekurangan metode ini untuk digunakan pada *quadrotor* adalah karena PID bekerja optimal pada sistem linier yang mengacu pada persamaan matematis, sedangkan *quadrotor* merupakan sistem non linier. Ketidaklinieran sistem *quadrotor* dipengaruhi hal-hal seperti karakteristik motor, baterai, kelembaman rangka, dan sebagainya. Untuk mengatasi hal tersebut pada penelitian ini dibuat sistem kendali PID *fuzzy* yang dapat membantu mengatasi ketidaklinieran sistem dengan pendekatan pola pikir manusia dalam mengatasi berbagai persoalan dalam kehidupan sehari-hari[6]. Logika *fuzzy* adalah metode komputasi dengan variabel kata-kata yang dikemukakan oleh Dr. Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965. Logika ini menggunakan pendekatan alamiah layaknya manusia dalam menentukan suatu keputusan [7]. Logika *fuzzy* dapat digunakan untuk mengoptimalkan respon dari sistem kendali PID dengan merujuk pada karakteristik konstanta K_p , K_i , dan K_d [8].

Tabel 1 Karakteristik efek K_p , K_i , dan K_d pada kendali PID [9]

Closed Loop Response	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-State Error	Stability
Increasing K_p	Decrease	Increase	Small Increase	Decrease	Degrade
Increasing K_i	Small Decrease	Increase	Increase	Large Decrease	Degrade
Increasing K_d	Small Decrease	Decrease	Decrease	Minor Change	Improve

Dengan melihat Tabel 1 di atas maka dapat diformulasikan aturan *fuzzy* untuk mengoptimalkan kinerja sistem dengan dasar-dasar sebagai berikut:

1. Jika *steady-state* besar maka naikan konstanta proporsional
2. Jika respon beresilasi maka naikan konstanta derivatif
3. Jika respon lambat maka naikan konstanta proporsional
4. Jika *steady-state error* terlalu besar maka sesuaikan konstanta integral
5. Jika *overshoot* terlalu besar maka turunkan konstanta proporsional

Aturan *fuzzy* yang dibuat diproses dengan membaca sudut dan ketinggian *quadrotor*. Berdasarkan *setpoint* sudut dan ketinggian yang telah ditentukan maka akan didapat nilai *error* dan *delta error* yang merupakan indikator keadaan *quadrotor*. Sistem *fuzzy* kemudian akan menala secara mandiri agar respon sistem dapat lebih optimal.

Berdasarkan uraian di atas maka dapat dirumuskan pokok-pokok sistem yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut:

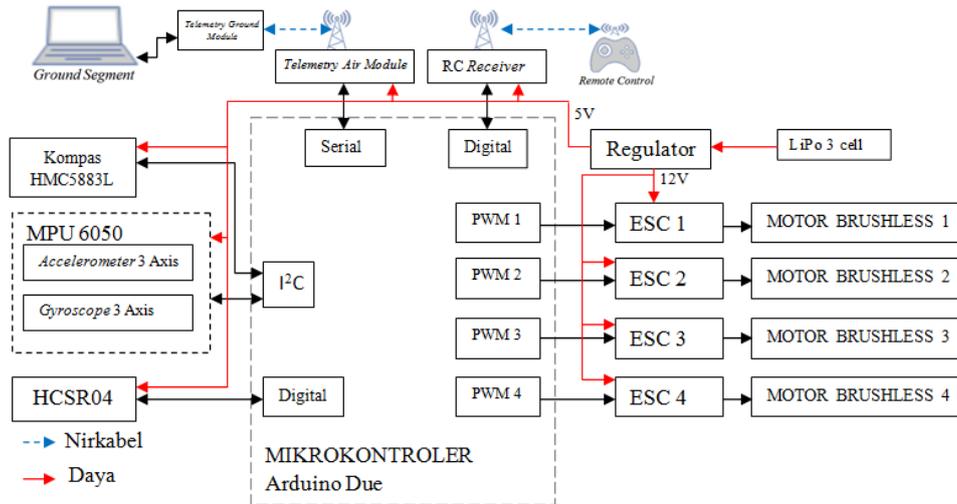
1. Sistem kendali yang akan dibuat dapat membantu *quadrotor* mempertahankan kestabilan ketinggiannya dengan baik berdasarkan jarak dengan permukaan tanah dengan nilai *steady-state error* maksimum sebesar 5 cm. Kendali tersebut juga harus mempertahankan *steady state error* sudut *roll* dan *pitch*nya sebesar 5% agar pembacaan sensor ultrasonik masih dapat bekerja dengan baik.
2. *Risetime* yang dihasilkan untuk sudut *pitch* dan *roll* lebih cepat atau sama dengan 1 detik dan untuk sudut *yaw* dan ketinggian lebih cepat dari 4 detik.
3. *Settling time* untuk sudut *pitch* dan *roll* ≤ 3 detik, dan sudut *yaw* serta *altitude* ≤ 6 detik.
4. *Maximum overshoot pitch* dan *roll* $\leq 10\%$, dan *yaw* serta *altitude* $\leq 20\%$.
5. Metode kendali yang akan digunakan diptimalkan dengan logika *fuzzy* yang dapat menala secara mandiri nilai konstanta K_p , K_i , dan K_d pada PID sehingga respon sistem lebih baik.

2.2 Rancangan Sistem

Sistem yang dirancang pada penelitian ini adalah sistem kendali sikap terbang quadrotor serta kendali kestabilan ketinggian quadrotor. Rancangan sistem secara keseluruhan meliputi rancangan perangkat keras dan rancangan perangkat lunak, serta rancangan pengujian terhadap sistem kestabilan ketinggian.

2.2.1 Rancangan arsitektur sistem

Dalam penelitian ini, mikrokontroler Arduino Due bertugas sebagai unit pemroses masukan dan keluaran sistem. Arduino Due digunakan karena memiliki kapasitas penyimpanan yang cukup besar serta mampu bekerja dengan clock yang tinggi agar metode fuzzy yang digunakan dapat berjalan dengan baik. Terdapat 3 buah sensor masukan yaitu IMU 6 DOF yang terdiri dari Accelerometer dan Gyroscope yang berfungsi untuk memberikan masukan kondisi *pitch* dan *roll*, Magnetometer atau kompas HMC5883L sebagai penunjuk arah atau heading, serta sensor ultrasonik HC-SR04 sebagai penunjuk ketinggian quadrotor terhadap permukaan tanah. Untuk keperluan kendali dan pemantauan data digunakan Remote Control (RC) dan Ground Segment berupa sebuah komputer yang terhubung menggunakan modul telemetri. Daya yang diperoleh sistem ini berasal dari baterai LiPo 3 sel. Gambar 1 adalah rancangan arsitektur sistem secara keseluruhan.

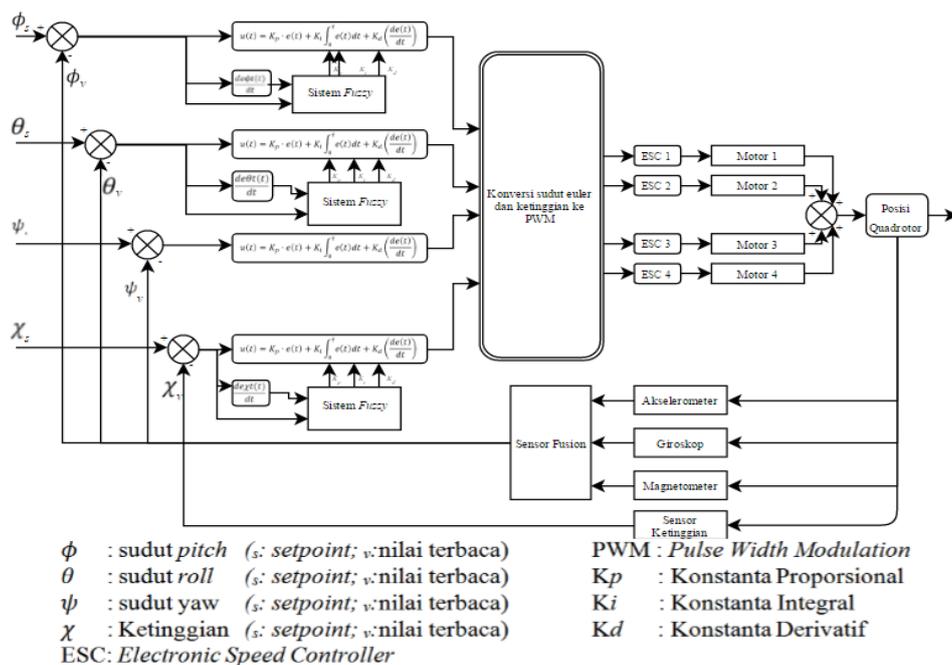


Gambar 1 Rancangan Arsitektur Sistem

4.3.2 Rancangan sistem kendali

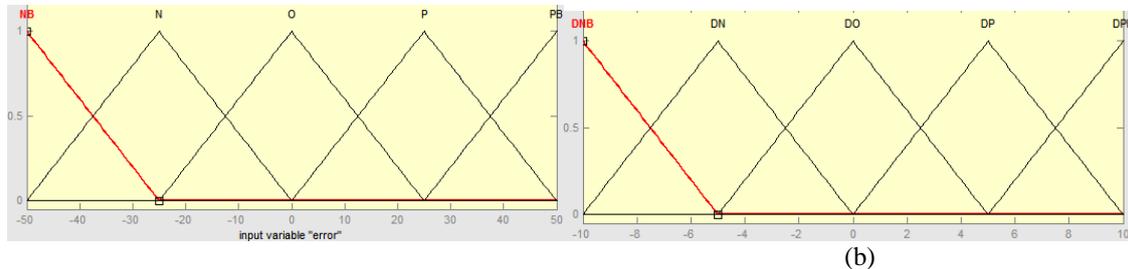
Pada penelitian ini, terdapat masukan tambahan untuk sistem *quadrotor* yang berupa sensor ketinggian. Dengan sensor ini, kendali ketinggian akan dilakukan dengan cara menghitung selisih nilai ketinggian *quadrotor* dan *setpoint* ketinggian yang diinginkan. Kendali ini untuk memudahkan pengendalian kestabilan ketinggian *quadrotor* sehingga pilot tidak perlu mengatur *throttle*.

Logika *fuzzy* pada rancangan ini akan menghitung nilai konstanta proporsional (*Kp*), integral (*Ki*), dan derivatif (*Kd*) terbaik yang diharapkan dapat memperbaiki respon sistem. PID *fuzzy* merupakan kombinasi kendali PID dengan logika *fuzzy*. Logika *fuzzy* digunakan untuk menala besaran konstanta PID agar diperoleh respon sistem yang lebih baik. Diagram kerja keseluruhan sistem PID *Fuzzy* dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram kerja PID Fuzzy

Masukan *crisp* merupakan masukan hasil penghitungan sensor *fusion* yang berupa *error* dan *delta error*. *Error* merupakan nilai selisih dari nilai bacaan sensor dan nilai *setpoint*. *Delta error* merupakan perubahan nilai *error* atau selisih nilai *error* sekarang dan nilai *error* sebelumnya. Masukan *crisp* ini kemudian akan masuk ke tahap fuzzifikasi dimana nilai-nilai tersebut akan dimasukkan ke dalam himpunan *fuzzy* yang berupa lima buah variabel linguistik.



(a)
Gambar 3 Himpunan fuzzy input pitch dan roll (a) error dan (b) delta error

Variabel-variabel linguistik yang digunakan pada *pitch* dan *roll* yaitu NB(Negatif Besar), N (Negatif), O (Nol), P (Positif), dan PB (Positif Besar) untuk masukan *error* yang kemudian disebut himpunan *fuzzy error*. Sedangkan untuk masukan *delta error* menggunakan DNB (Delta Negatif Besar), DN (Delta Negatif), DO (Delta Nol), DP (Delta Positif), dan DPB (Delta Positif Besar) yang kemudian disebut himpunan *fuzzy delta error*. Pada setiap variabel nantinya akan mempunyai rentang-rentang nilai tersendiri. Penentuan rentang didapat dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Pogran [10]. Gambar 3 merupakan rancangan himpunan fuzzy error dan delta error yang dibuat pada software MATLAB menggunakan toolbox fuzzy yang tersedia.

Nilai *input* ini dianalisa oleh FIS (*Fuzzy inference system*) dengan menggunakan aturan *fuzzy (rule-base)* yang telah disusun. Aturan *fuzzy (rule base)* memiliki bentuk dasar “if” X = A, “Then” Y = B, sehingga aturan *fuzzy* sering disebut juga aturan “If-then”. Pada sistem *quadrotor* ini *rule base* yang digunakan berdasarkan rancangan himpunan *fuzzy* untuk *error*, *delta error*, *Kp*, *Ki* dan *Kd*. Tabel 2 menunjukkan aturan *fuzzy* yang digunakan untuk menentukan nilai *Kp* dan *Ki*. Sedangkan Tabel 3 menunjukkan aturan *fuzzy* yang digunakan untuk menentukan nilai *Kd*. Dengan begitu terdapat 25 aturan *fuzzy (rule base)* yang digunakan.

Aturan dibuat berdasarkan pada pengaruh perubahan konstanta kendali proporsional, integral, dan derivatif terhadap nilai *error* dan *deltaerror*. Tabel hubungan nilai *Kp*, *Ki*, dan *Kd* dan dampaknya terhadap respon sistem dapat dilihat pada Tabel 1. Aturan untuk *Kp* dan *Ki* dibuat sama karena memang dampak kedua kendali terhadap nilai yang dihasilkan sama.

Tabel 1 *Fuzzy rule* untuk *Kp* dan *Ki*

		<i>Error</i>				
		NB	N	O	P	PB
<i>Delta Error</i>	DNB	H	B	M	B	H
	DN	B	M	S	M	B
	DO	M	S	T	S	M
	DP	B	M	S	M	B
	DPB	H	B	M	B	H

Tabel 2 *Fuzzy rule* untuk K_d

		<i>Error</i>				
		NS	N	O	P	SP
<i>Delta Error</i>	DNS	T	S	M	S	T
	DN	S	M	B	M	S
	DO	M	B	H	B	M
	DP	S	M	B	M	S
	DPS	T	S	M	S	T

Keterangan:

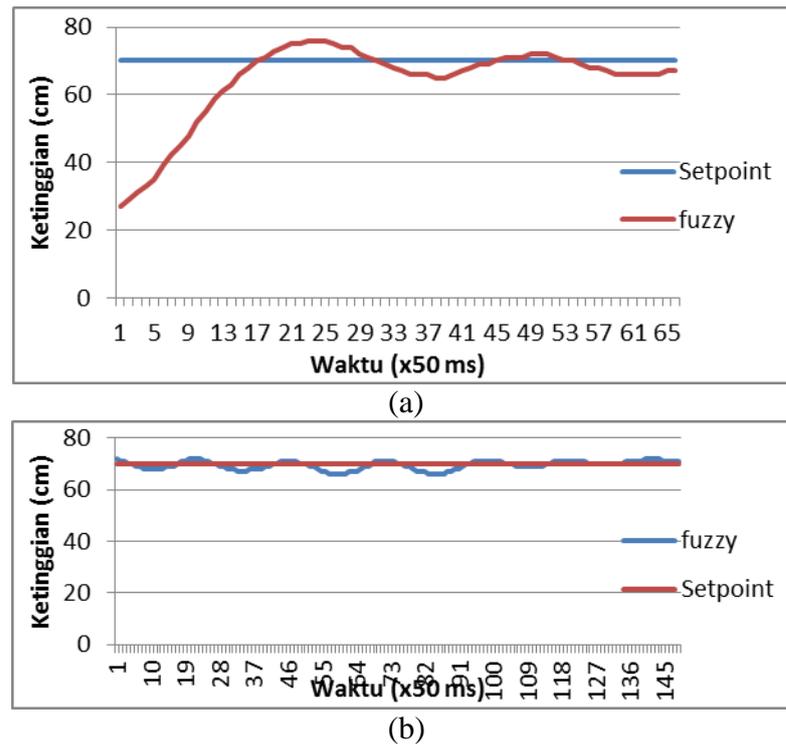
NB : Negatif Besar T : Sangat Kecil
 N : Negatif S : Kecil
 O : Tengah M : Sedang
 P : Positif B : Besar
 PB : Positif Besar H : Sangat Besar

Nilai negatif dan positif pada *error* dan *deltaerror* menghasilkan nilai K_p dan K_i yang sama untuk digunakan karena hal tersebut bergantung pada orientasi *quadrotor*. Jika nilai *error* besar (NB dan PB) maka nilai K_p dan K_i yang digunakan yang paling besar (H). Nilai *deltaerror* yang terbaca menunjukkan kecepatan respon sistem. Apabila semakin besar nilai *deltaerror* berarti telah terjadi perubahan *error* dalam waktu singkat. Nilai K_p dan K_i akan diperkecil ketika nilai *error* dan *deltaerror* semakin mengecil sehingga respon sistem melemah pada saat mendekati titik *steady state*. Nilai *steady state* ditunjukkan ketika *error* dan *deltaerror* bernilai O (Tengah), pada keadaan ini diharapkan tidak terjadi perubahan pada sistem sehingga nilai K_p dan K_i menggunakan yang paling kecil (T).

Pada Tabel 2 K_p dan K_i memiliki aturan yang sama namun berbeda dengan aturan yang digunakan untuk K_d pada Tabel 3. Hal tersebut dikarenakan karakteristik K_p dan K_i memiliki kesamaan dan berbeda dengan karakteristik K_d . K_p dan K_i akan memberikan nilai osilasi yang semakin besar bila konstanta yang digunakan semakin besar pula dan osilasi semakin kecil bila konstanta semakin kecil. Sebaliknya K_d akan meredam osilasi sehingga semakin besar konstanta semakin kecil osilasi karena teredam dan semakin kecil konstanta, maka semakin besar osilasi. Selain itu, rumus yang digunakan K_p dan K_i sama sama dikalikan dengan nilai *error* sistem, sedangkan K_d dikalikan dengan *delta error*, sehingga karakter keluaran dari setiap konstanta berbeda. Nilai K_i sangat kecil (T) pada saat *error* besar (NB dan PB) agar sistem tidak mendapat nilai redaman sehingga respon yang dihasilkan semakin cepat. Sedangkan pada saat mendekati *steady state*, nilai K_d sangat besar (H) sehingga redaman sistem akan mencegah terjadinya perubahan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada sistem kendali kestabilan ketinggian ini, dilakukan seperti halnya pengujian pada sudut *pitch* dan *roll* dimana dilakukan variasi terhadap rentang nilai konstanta PID yang akan ditala dengan metode *fuzzy*. Dari hasil variasi rentang didapatkan hasil terbaik yang ditunjukkan dengan respon sistem pada Gambar 4. Pengujian dilakukan dengan memberikan gangguan sebesar kurang lebih 43 cm dari *setpoint* ketinggian sebesar 70,00 cm. *Risetime* yang didapat sebesar 0,6 detik, *settling time* sebesar 2,05 detik, dan dengan *overshoot* sebesar 6 cm atau sebesar 14% dari total gangguan. Sementara untuk pengujian tanpa gangguan didapatkan nilai pembacaan rata-rata nilai *steady-state* sebesar 69,02 cm dengan simpangan baku sebesar $\pm 1,775$ cm.



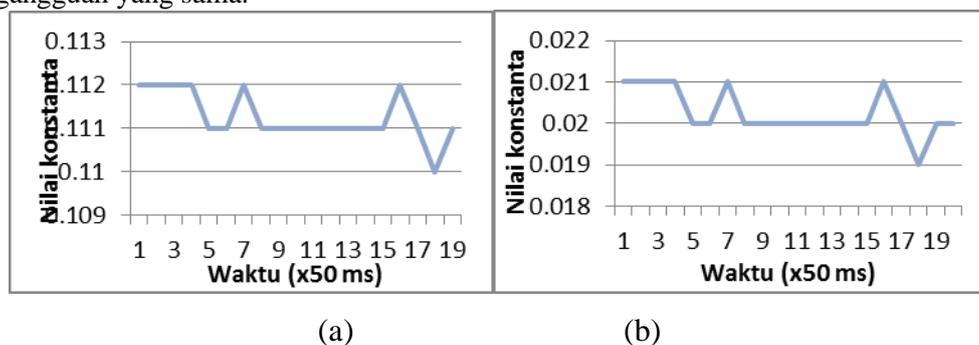
Gambar 4 Hasil pengujian PID Fuzzy kestabilan ketinggian dengan gangguan dan tanpa gangguan

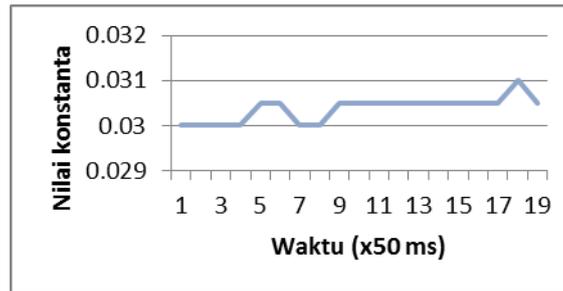
Nilai rentang PID untuk kendali kestabilan ketinggian yang digunakan pada pengujian ini dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Rentang nilai konstanta PID ketinggian

Konstanta	Nilai minimal	Nilai tengah	Nilai maksimal
K_p	0,110	0,112	0,114
K_i	0,019	0,021	0,023
K_d	0,029	0,030	0,031

Penalaan konstanta PID oleh logika *fuzzy* terlihat pada Gambar 5. Pada gambar tersebut merupakan perubahan nilai konstanta yang awal respon terhadap gangguan sebesar ± 43 cm seperti pada Gambar 4 (a). Pada Gambar 5 (a) dan (b) merupakan nilai K_p dan K_d yang bernilai sama karena keduanya akan berubah berdasarkan nilai *error* yang terbaca. Terlihat pada hasil tersebut bahwa kedua konstanta bernilai besar saat mendapatkan gangguan yang besar. Nilai K_p dan K_i kemudian terlihat turun pada saat *error* mendekati 0 cm dan mencapai nilai terendah pada saat *error* bernilai 0. Sedangkan pada Gambar 5 (c) merupakan grafik perubahan nilai K_d pada gangguan yang sama.





(c)

Gambar 5 Perubahan nilai terhadap error ketinggian pada (a) Kp (b) Ki (c) Kd

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan, pengujian dan analisis pada hasil yang diperoleh dari penelitian implementasi metode PID untuk menjaga kestabilan ketinggian terbang pada *quadrotor* dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pengujian sistem kendali PID *Fuzzy* untuk menjaga kestabilan ketinggian dihasilkan tanggap sistem terbaik yang diperoleh yaitu *rise time* sebesar 0,6 detik, *settling time* sebesar 2,05 detik, dan *percent overshoot* sebesar 14% pada saat mendapatkan gangguan sebesar 43 cm dan nilai *steady-state* sebesar $(68,6 \pm 1,9)$ cm, menggunakan rentang *input error* sebesar -50 cm hingga 50 cm, dan *input delta error* dari -10 cm hingga 10 cm, serta dengan rentang *output* konstanta PID masing-masing *Kp* dari 0,110 hingga 0,114, *Ki* dari 0,019 hingga 0,023, dan *Kd* dari 0,029 hingga 0,031.
2. Pengujian sistem kendali PID *Fuzzy* untuk menjaga kestabilan sikap terbang *quadrotor* dengan menala mandiri dapat berjalan dengan *rise time* yang dihasilkan sebesar 0,2 detik dan *settling time* 0,75 detik pada saat mendapat gangguan pada sudut *pitch* sebesar $45,05^\circ$ dan sudut *roll* sebesar 31° dengan *overshoot* sebesar $2,62^\circ$ dan rerata *steady state error* sebesar $1,31^\circ$, menggunakan rentang *input error* sebesar -50° hingga 50° dan *input deltaerror* dari -10° hingga 10° , serta rentang *output* konstanta PID pada sudut *pitch* serta *roll* masing-masing *Kp* dari 0,119 hingga 0,121, *Ki* dari 0,007 hingga 0,008, serta *Kd* dari 0,037 hingga 0,040.

Berdasarkan dari hasil penelitian yang disebutkan di atas, telah berhasil diimplementasikan metode penalaan konstanta PID secara mandiri berdasarkan logika *Fuzzy* pada *quadrotor* untuk menjaga kestabilan ketinggian terbang *quadrotor*.

5. SARAN

Ada beberapa hal yang perlu disempurnakan pada penelitian ini. Berikut saran yang dikemukakan untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan penelitian ini:

1. Penggunaan sistem kendali *fuzzy* dapat diuji pada *quadrotor* dengan gangguan dinamis di luar ruangan.
2. Penggunaan sistem kendali *fuzzy* dapat dikembangkan untuk menjalankan misi yang lebih rumit.
3. Penambahan kendali untuk menjaga sikap terbang *quadrotor* agar memudahkan misi kendali ketinggian yang lebih stabil.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberi dukungan moril maupun materil terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bouabdallah, S., Noth, A. & Siegwan, R., 2004. *PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor*.
- [2] Fatan, M., Sefidgari, B. L., & Barenji, A. V. (2013). *An Adaptive Neuro PID for Controlling the Altitude of Quadcopter Robot Output of Plant*, 662–665.
<http://doi.org/10.13140/RG.2.1.2896.0804>
- [3] Mehranpour, M.R., 2013. *A New Fuzzy Adaptive Control for a Quadrotor Flying Robot*.
- [4] Raza, S.A. & Gueaieb, W., 2010. *Intelligent Flight Control of an Autonomous Quadrotor*.
- [5] Ogata, K., 2010, *Modern Control Engineering Fifth Edition*, Fifth, Prentice Hall, New Jersey.
- [6] Naba, A., 2009. *Belajar Cepat Fuzzy Logic Menggunakan Matlab*, ANDI OFFSET, Yogyakarta.
- [7] Zadeh, L.A., 2004. *Fuzzy Logic Systems: Origin, Concepts, and Trends*. University of Carolina, Berkeley.
- [8] Santos, M., Lopez, V., Morata, F., 2010, *Intelligent Fuzzy Controller of Quadrotor*, *Universidad Complutense*, Spain.
- [9] Leong, B.T.M., Low, S.M. dan Ooi, M.P.-L., 2012, *Low-Cost Microcontroller-based Hover Control Design of a Quadcopter*, *Procedia Engineering*, [Online] 41 (Iris), 458–464, tersedia di DOI:10.1016/j.proeng.2012.07.198.
- [10] Pogran, D.F., 2014, *Implementasi Metode Penala Konstanta PID Berdasarkan Logika Fuzzy pada Quadrotor*, *Skripsi*, FMIPA Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.