

PERANCANGAN SISTEM PENGENDALIAN *SELF BALANCING* PADA *PROPELLER DUAL-MOTOR* BERBASIS FLC-PID

Eka Andila Putri Khusnul Khotimah

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : eka.17050874038@mhs.unesa.ac.id

Muhamad Syarieffuddin Zuhrie, I Gusti Putu Asto B, Lilik Anifah

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia
e-mail : zuhrie@unesa.ac.id, asto@unesa.ac.id, lilikanifah@unesa.ac.id

Abstrak

Kendaraan udara tak berawak atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) adalah desain pesawat di mana pilot tidak lagi digunakan untuk mengoperasikannya, dan biasanya dikendalikan oleh *remote control*. Sebuah pesawat tak berawak jenis helikopter dengan dua baling-baling disebut dengan *dual-motor* atau *dual-copter*. Masalah pada saat penggunaan *dual-motor* adalah ketidakstabilan sistem atas perubahan beban yang akan mempengaruhi sikap terbang, sehingga mengakibatkan pesawat terjatuh dari ketinggian tertentu. Tujuan dari penelitian ini adalah menggunakan FLC-PID untuk merancang sistem kendali *self-balancing* pada *propeller dual-motor*. Sehingga pada saat terjadi gangguan beban, sistem dapat menyeimbangkan sikap terbang dari *dual-motor*. Metode yang digunakan adalah dengan menggunakan *software* Matlab 2018a untuk simulasi sistem *self balancing*. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari peneliti sebelumnya sebagai acuan nilai parameter setiap komponen. Pada penelitian ini diperoleh hasil bahwa sistem kendali FLC-PID dapat bekerja dengan baik pada sistem *self balancing propeller dual-rotor*. Hal ini dapat dilihat dari hasil simulasi bahwa, dibandingkan dengan kontrol fuzzy, kontrol FLC-PID dapat mempercepat respon waktu sistem. Hasil yang diperoleh adalah *delay time* = 0.10 s, *rise time* = 0.12 s, *settling time* = 0.82 s, *maximum peak* = 26.1%, dan *error steady state* = 0.0014%.

Kata kunci: *Dual-rotor*, FLC-PID, *self-balancing*.

Abstract

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) is an aircraft design which the pilot is no longer used to operate it, and is usually controlled by a remote control. A helicopter type drone with two propellers is called a dual-motor or dual-copter. The problem when using the dual-motor is the instability of the system due to load changes that will affect flight attitude, resulting in the plane falling from a certain height. The purpose of this research is to design a self-balancing control system on the dual-motor using FLC-PID. So that when there is a load disturbance, the system can balance the flying attitude of the dual-motor. The method used is to use the Matlab 2018a software to simulate a dual-motor system. The data used are secondary data obtained from previous researchers as a reference for the parameter values of each component. In this study, the results show that the FLC-PID control system can work well in a dual-motor propeller self balancing system. It can be seen from the simulation results that, compared to fuzzy control and PID control, FLC-PID control can speed up the system response time. The results obtained are delay time = 0.10 s, rise time = 0.12 s, settling time = 0.82 s, maximum peak = 26.1%, and error steady state = 0.0014%.

Keywords: *Dual-motor*, FLC-PID, *self-balancing*.

PENDAHULUAN

Di dalam dunia penerbangan, banyak peneliti telah mempelajari perkembangan teknologi pesawat tak berawak atau *unmanned aerial vehicle* (UAV). UAV adalah desain pesawat, di mana pilot tidak lagi dipergunakan untuk mengoperasikannya, dan biasanya menggunakan *remote control* untuk kendali. Diawali sebagai *drone* komersial dalam fotografi udara kini secara bertahap berkembang menjadi alat dalam industri, seperti mengangkut barang dan melakukan inspeksi jalan untuk misi pencarian dan penyelamatan. (Li, dkk., 2018).

Sebuah *drone* jenis helikopter dengan dua baling-baling disebut dengan *dual-motor* atau *dual-copter*. Baling-baling pada *dual-motor* terletak di sisi kanan dan kiri badan pesawat. Pesawat jenis *dual-rotor* menggunakan sistem VTOL (*vertical take-off and landing*) layaknya *helicopter* pada umumnya. Sebagai sistem dinamis, jika kecepatan motor berubah maka posisi motor juga akan berubah. Karena karakteristik khusus *dual-motor* sulit untuk diterapkan melalui mekanisme dan struktur lain, hal ini menyebabkan meningkatnya minat dalam penelitian di industri dan akademisi, dan

meningkatnya permintaan untuk aplikasi jenis pesawat ini. (Shlok, dkk., 2013).

Terlepas dari apapun penggunaannya, ketika terdapat perbedaan beban pada motor, maka *dual-motor* harus dapat terbang secara seimbang agar dapat menyelesaikan tugas sesuai dengan yang diharapkan. Kondisi pesawat yang tidak seimbang dan tidak stabil selama penerbangan dapat menyebabkan pesawat jatuh dari ketinggian tertentu. Sebelumnya telah dilakukan penelitian tentang perancangan sistem *self balancing propeller dual-motor* dengan metode PID tuning Ziegler-Nichols. Simpulan dari penelitian tersebut yaitu kontrol PID menggunakan tuning Ziegler-Nichols dapat diatur pada parameter K_p senilai 1.2, K_i senilai 0.45, K_d senilai 0.89, *error steady-state* 1.23%, *overshoot* 3.16%, dan *rise time* bekerja dengan baik dalam 0.836 detik. *Delay time* 1.04 detik dan kondisi stabil (5%) berlangsung selama 1.73 detik. (Hudha, 2019)

Penelitian tentang kontrol fuzzy *self balancing* pada *propeller dual-motor* juga telah dilakukan sebelumnya, dan respon tersebut dapat menyeimbangkan sistem dengan baik. Nilai hasil respon sistem adalah 0.362% *error steady state*, *overshoot* 24%, *delay time* 1.013 detik, waktu tunak 0.954 detik (5%) dan waktu pertambahan 0.954 detik. (Setiyawan, 2019).

Pada penelitian ini dilakukan studi *self-balancing propeller dual-motor* menggunakan FLC-PID. Sistem pengendali FLC-PID adalah pengendali loop tertutup yang menggabungkan pengendali proporsional, integral, turunan dan logika fuzzy. Tujuan penggabungan dua kontroler adalah untuk mendapatkan keunggulan masing-masing kontroler dan menghasilkan kontrol yang merespon lebih baik daripada hanya menggunakan kontrol PID atau FLC.

Dengan mengacu pada penelitian di atas maka penulis melakukan penelitian untuk mempelajari penerapan pengontrol FLC-PID pada sistem *self-balancing propeller dual-motor*. Perancangan ini diharapkan dapat mempercepat kecepatan respon sistem saat terjadi gangguan.

METODE

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini ditulis dengan menggunakan metode penelitian eksperimental. Berdasarkan buku Siyoto (2015: 23) yang berjudul "Metode Penelitian Dasar", penelitian eksperimental adalah penelitian kausalitas yang bertujuan untuk menggambarkan hubungan sebab dengan akibat. Kausalitas harus dijelaskan dengan mengontrol dan mengukur variabel penelitian komparatif secara hati-hati. Data yang digunakan adalah data skunder yang diperoleh dari penelitian kepustakaan berupa jurnal, buku teks, karangan dan makalah. Penggunaan data skunder sebagai

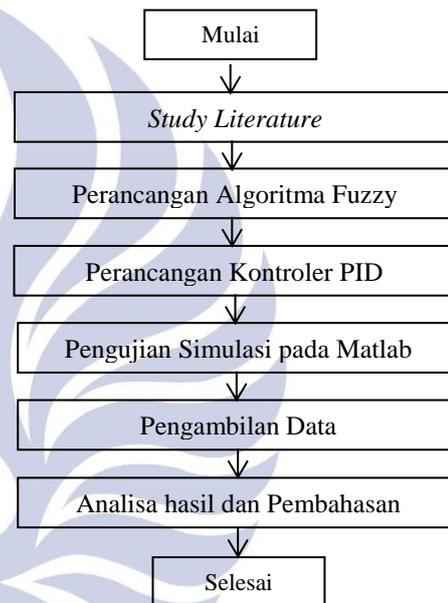
acuan untuk mengisi nilai parameter setiap komponen untuk simulasi.

Instrumen Pengumpulan Data

Instrumen penelitian dapat digunakan sebagai alat bantu penulisan penelitian untuk memperoleh data yang dibutuhkan (Black, 2006). Dalam penelitian ini penulis menggunakan *software* Simulink pada Matlab 2018a untuk melakukan simulasi hingga didapatkannya hasil respon dari sistem.

Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian pada penelitian ini digambarkan pada diagram alir Gambar 1.

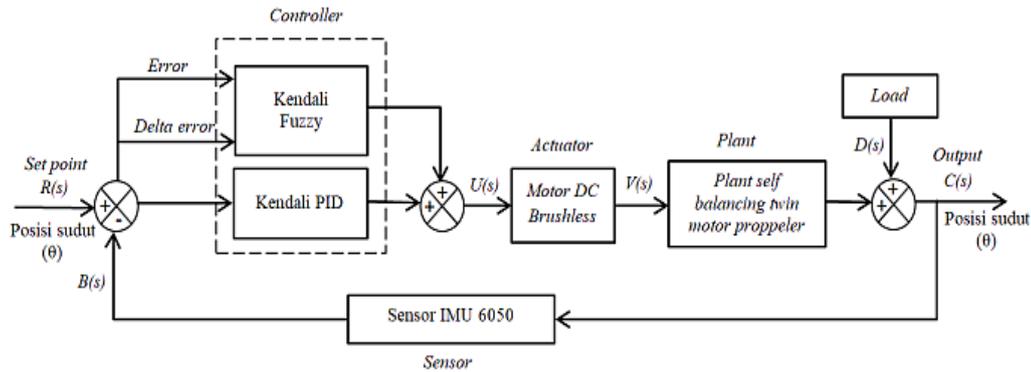


Gambar 1. Skema rancangan penelitian

Berdasarkan Gambar 1, persiapan penelitian diawali dengan penelitian literatur dari berbagai referensi, seperti jurnal, makalah, dan *e-book*. Selanjutnya dilakukan perancangan algoritma FLC dan perancangan pengendali PID. Setelah mendapatkan perancangan algoritma FLC dan pengontrol PID, dilanjutkan dengan menggunakan *software* Matlab 2018a untuk menguji simulasi pada beberapa kondisi, kemudian mendapatkan data dari simulasi yang dieksekusi. Langkah terakhir adalah mengamati dan menganalisis data respon pengendalian FLC-PID pada masing-masing kasus.

Desain Sistem

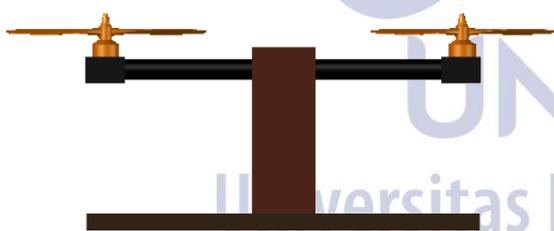
Perancangan sistem *self-balancing propeller dual-motor* menggunakan FLC-PID ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem tersebut merupakan sistem loop tertutup.



Gambar 2. Diagram blok sistem

Pemodelan Dinamik Propeller Dual-Motor

Dual-motor adalah helikopter yang menggunakan dua buah motor listrik sebagai penggerak. Dual-motor adalah helikopter laboratorium non-linier yang dirancang khusus untuk pengujian algoritma pengendalian menggunakan simulasi pada perangkat lunak. Sistem ini memiliki sikap dinamis yang sama dengan helicopter pada aslinya. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3, propeller dual-motor terdiri dari dua motor DC brushless, yang membuat propeller dapat bergerak. Arah putaran baling-baling berlawanan. Jika kecepatan motor berubah, hal itu akan menyebabkan posisi sudutnya berubah. Karena karakteristik khusus dari dual-motor, sulit untuk menerapkannya melalui mekanisme dan struktur lain. Hal ini menyebabkan meningkatnya minat penelitian di bidang industri dan akademisi, serta meningkatnya permintaan akan aplikasi pesawat jenis ini. (Agarwal, dkk., 2013).



Gambar 3. Propeller Dual-Rotor (Sumber: Agarwal, dkk., 2013)

Model Matematika Propeller Dual-Motor

Dalam metode Newton, diasumsikan bahwa persamaan gaya dan torsi didasarkan pada prinsip kerja tuas. Dalam penelitian ini, sistem self-balancing dari propeller dual-motor dimodelkan menggunakan metode Newton. Sistem dimodelkan sebagai benda tegar, dengan balok-balok dengan massa yang sama di kedua ujung lengan. Massa total motor dan massa balok di ujung lengan diwakili oleh M_1 dan M_2 . Sedangkan untuk momen inersia dilambangkan dengan j , setengah panjang balok

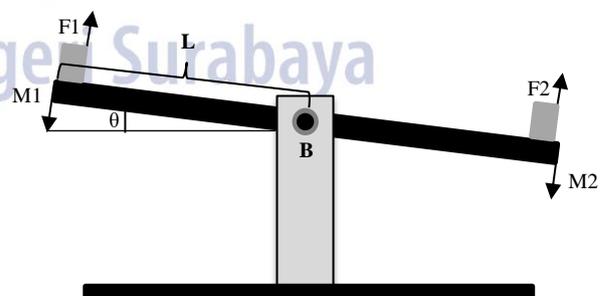
dilambangkan dengan L dan koefisien redaman dilambangkan B . Oleh karena itu, persamaan berikut dapat diperoleh dari model di atas.

$$j\ddot{\theta} = \Sigma T = F_1L - F_2L - M_1Lg\cos\theta + M_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta} \quad (1)$$

Di mana:

- j (kg.m²) – momen inersia
- T (Nm/kg) – torsi
- F_1 (kg) – gaya dorong (thrust) motor 1
- F_2 (kg) – gaya dorong (thrust) motor 2
- L (cm) – panjang lengan
- θ (rad) – posisi sudut
- $\dot{\theta}$ (rad/s) – perubahan posisi sudut
- g (m/s²) – gaya tarik bumi
- B (g/mL) – koefisien redaman
- M_1 (kg) – massa ujung kiri
- M_2 (kg) – massa ujung kanan

Nilai parameter yang diberikan pada persamaan (1) dapat dilihat pada diagram skematik yang ditunjukkan pada Gambar 4



Gambar 4. Skematik Gaya Sistem (sumber: Hosseializade, dkk., 2016)

Untuk melinierkan persamaan pada sistem, penulis menetapkan 2 variabel keadaan:

$$\begin{aligned} x_1 &= \theta \\ x_2 &= \dot{\omega} = \dot{\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

Dimana:

θ (rad) – posisi sudut,

$\dot{\theta}$ (rad/s) – perubahan posisi sudut.

Sesuai diagram sistem yang ditunjukkan pada Gambar 4, dapat diperoleh persamaan nonlinier berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x_2 = f_1(t) \\ \ddot{x}_2 &= \ddot{\theta} = \frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta}) = f_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Kemudian linierisasi persamaan (3) dan menggunakan metode Jacobian untuk menyelesaikannya:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} = J_x(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j} & \frac{-B}{j} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial F} \\ \frac{\partial f_2}{\partial F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Perhitungan penjabaran dari Persamaan (5) di mana $\partial\omega$ diturunkan terhadap $\partial\theta$.

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1} = \frac{\partial\omega}{\partial\theta} = 0 \quad (6)$$

Kemudian nilai dari ∂f_2 diturunkan terhadap $\partial\theta$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{\partial\left(\frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta})\right)}{\partial\theta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{Lg\sin(\theta)(m_1 - m_2)}{j} \end{aligned} \quad (7)$$

Nilai dari ∂f_1 diturunkan terhadap ∂x_2 .

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_2} = \frac{\partial x_2}{\partial x_2} = 1 \quad (8)$$

Dan untuk mendapatkan nilai dari Persamaan (5) pada matrik baris dua kolom dua maka nilai dari ∂f_2 diturunkan terhadap ∂x_2 .

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \frac{\partial\left(\frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta})\right)}{\partial\omega} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \frac{-B}{j} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\frac{\partial f_1}{\partial F} = \frac{\partial\omega}{\partial F} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial F} &= \frac{\partial\left(\frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta})\right)}{\partial F} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \frac{L}{j} \end{aligned} \quad (10)$$

Di mana:

∂f_1 – diferensial gaya dorong motor

∂f_2 – diferensial gaya dorong motor 2

∂x_1 – diferensial posisi sudut 1

∂x_2 – diferensial posisi sudut 2.

Kemudian didapatkan persamaan linear *state space* sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{x} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{Lg\sin(\theta)(m_1 - m_2)}{j} & \frac{-B}{j} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \\ y &= Cx + Du \\ y &= [1 \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

Fungsi transfer sistem ($G(s)$) yaitu:

$$\begin{aligned} G(s) &= [1 \ 0] \begin{bmatrix} s & -1 \\ \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j} & \frac{B}{j} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j} & -1 \\ s & \frac{B}{j} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} \begin{bmatrix} \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j} & 1 \\ s & \frac{B}{j} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{s + \frac{B}{j}}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} & \frac{1}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} \\ \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} & \frac{s}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{s + \frac{B}{j}}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} & \frac{1}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} \\ \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} & \frac{s}{s\left(s + \frac{B}{j}\right) + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{L}{j} \\ s^2 + \frac{B}{j}s + \frac{Lg\sin(0)(m_1 - m_2)}{j} \end{bmatrix} \\ G(s) &= \frac{L}{js^2 + Bs} = \frac{\frac{L}{j}}{s^2 + \frac{Bs}{j}} \end{aligned} \quad (12)$$

Dari konstanta yang telah didapatkan dari parameter fisik plant yaitu dengan:

$$L = 3,15 \text{ m}$$

$$J = 0,33 \text{ Kg/m}^2$$

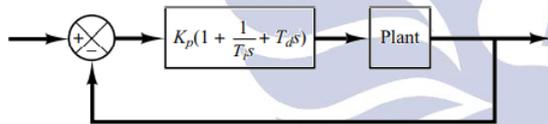
$$B = 1$$

Maka dapat dituliskan fungsi transfer dari sistem *self-balancing* pada *propeller dual-motor* dengan mendistribusikan nilai parameter fisik ke dalam Persamaan (12) sehingga didapatkan Persamaan (13)

$$G(s) = \frac{\frac{L}{J}}{s^2 + \frac{Bs}{J}} = \frac{\frac{3.15}{0.33}}{s^2 + \frac{1}{0.33}s} = \frac{9.5}{s^2 + 3.0303s} \quad (13)$$

Kendali PID

PID merupakan kombinasi dari pengontrol *Proportional* (P), *Integral* (I) dan *Derivative* (D). Hasil perhitungan dari ketiga pengontrol tersebut menghasilkan satu nilai. Kontroler P adalah hasil perkalian nilai kesalahan dengan K_p yang ditentukan. Kontroler I adalah hasil perkalian K_i dan kesalahan integral. Pengontrol D adalah produk dari K_d dan perubahan *error*. Jika diinterpretasikan dari segi waktu, P menggunakan kesalahan waktu saat ini, I menggunakan kesalahan kumulatif (masa lalu), dan pengontrol D menggunakan prediksi kesalahan masa depan berdasarkan laju perubahan untuk mendapatkan nilai respon sama dengan nilai *set point*. (Pambudi, dkk., 2018).

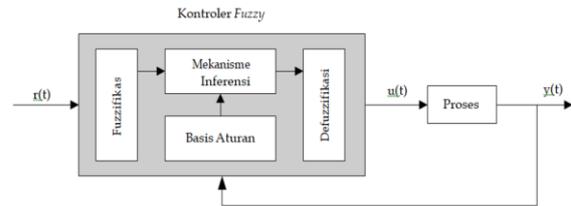


Gambar 5. Kontrol PID pada *Plant*
(Sumber: Ogata, Khatsuhiko., 1996)

Fuzzy Logic Controller (FLC)

Secara umum, struktur kendali logika fuzzy (FLC) terdiri dari fuzzifikasi, yang dapat digunakan sebagai bentuk untuk memodifikasi sinyal masukan berupa nilai-nilai yang jelas untuk membentuk himpunan fuzzy dengan operator fuzzifikasi. Yang kedua adalah aturan fuzzy, yang berisi aturan yang mendeskripsikan sinyal *input* dan *output* fuzzy. Format yang paling umum digunakan adalah format aturan *IF-THAN*, format relasional, dan format tubular. Tipe ketiga dari struktur kendali logika fuzzy adalah logika keputusan. Interpretasi fuzzy adalah proses pemetaan *input* ke *output* menggunakan logika fuzzy. Metode Takagi-Sugeno dan metode Mamdani adalah metode interferensi yang paling umum digunakan. Struktur kendali logika fuzzy terakhir adalah defuzzifikasi. Defuzzifikasi adalah langkah untuk mengubah variabel fuzzy kembali menjadi variabel yang

jelas. Struktur kendali logika fuzzy ditunjukkan pada gambar di bawah ini:

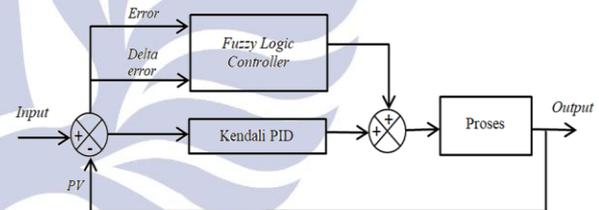


Gambar 6. Struktur Kendali Fuzzy
(Sumber: Prayogo, 2016)

Kendali FLC-PID

Kerugian utama dari pengontrol PID konvensional adalah tidak dapat memberikan kinerja yang memadai untuk sistem dengan keluaran tidak stabil, memiliki waktu tunda dan tidak linier, oleh karena itu perlu penyesuaian parameter PID untuk mendapatkan respon yang dibutuhkan. Logika fuzzy dapat diterapkan pada penyesuaian adaptif dari pengontrol PID.

Kendali FLC-PID adalah sebuah gagasan yang dilakukan agar mendapatkan manfaat dari kedua kontroler. Kontrol PID menjadi kontroler utama dalam sistem sedangkan kontrol fuzzy adalah kontroler yang membantu untuk mereduksi *overshoot* dan *disturbance* di dalam sistem. (Purnama, 2016)



Gambar 7. Struktur Kendali FLC-PID
(Sumber: Prabowo, 2018)

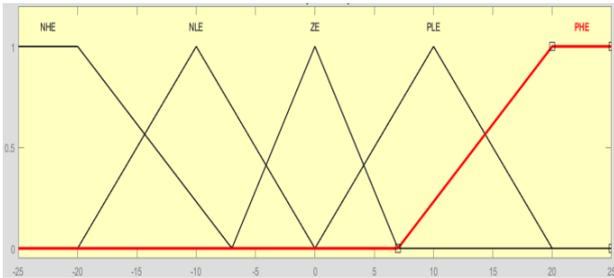
Perancangan Sistem Kendali

Kontroler PID merupakan salah satu kontroler yang digunakan untuk menjaga keseimbangan motor pada sistem *self balancing*. Aturan penyesuaian kedua metode Ziegler-Nichols diimplementasikan agar mendapatkan nilai untuk K_p , K_i dan K_d . Berdasarkan hasil yang diperoleh peneliti sebelumnya diperoleh nilai K_p senilai 1.2, K_i senilai 0.45 dan K_d senilai 0.89. (Hudha, 2019).

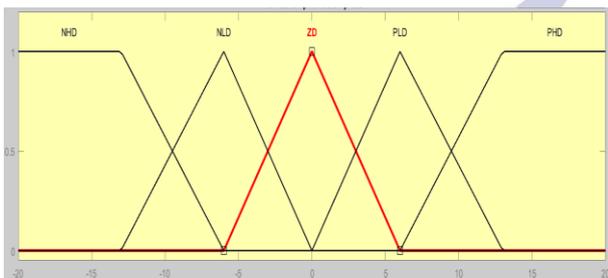
Kontrol logika fuzzy digunakan untuk mengoptimalkan respon yang dihasilkan oleh kontrol PID. (Randhy, 2018). Masukan untuk logika fuzzy adalah *error* dan perubahan *error*. Kesalahan adalah selisih antara nilai keluaran sensor IMU 6050 dan pembacaan sudut, dan kesalahan tambahan adalah selisih antara nilai perubahan kesalahan. (Armanda, 2019).

Dalam penelitian ini penulis menggunakan 2 masukan dan 1 keluaran. Fungsi keanggotaan dibagi menjadi 5

himpunan fuzzy, yang diwakili oleh kurva segitiga dan kurva trapesium. Nilai fungsi keanggotaan yang digunakan saat mendesain himpunan *error* ditunjukkan pada Gambar 8 dan perubahan *error* ditunjukkan pada Gambar 9.

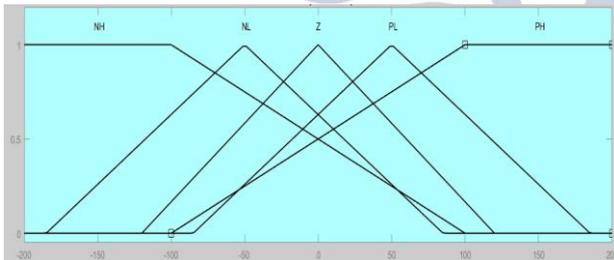


Gambar 8. Himpunan *input error*



Gambar 9. Himpunan *input delta error*

Gambar 10 merupakan keluaran dari sistem *self balancing* berupa nilai PWM yang akan menggerakkan motor untuk berputar. Rancangan himpunan keluaran fuzzy menggunakan lima nilai linguistik



Gambar 10. Himpunan *output*

Terdapat 25 aturan fuzzy akan diterapkan dalam bagian antarmuka. FIS yang digunakan adalah metode mamdani dan menggunakan basis aturan *IF-THAN*. Variabel linguistik yang digunakan untuk himpunan *input error* diantaranya NHE (*Negative High Error*), NLE (*Negative Low Error*), ZE (*Zero Error*), PLE (*Positive Low Error*), PHE (*Positive High Error*) dan untuk variabel linguistik pada himpunan *input delta error* menggunakan NHD (*Negative High Delta*), NLD (*Negative Low Delta*), ZD (*Zero Delta*), PLD (*Positive Low Delta*), PHD (*Positive High Delta*). Sedangkan untuk variabel linguistik *output* menggunakan NH (*Negative High*), NL (*Negative Low*), Z (*Zero*), PL (*Positive Low*), PH (*Postive High*). Dengan menggabungkan *rule base*

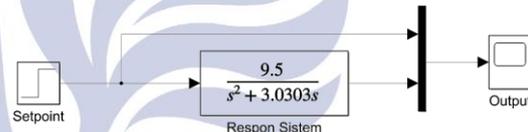
atau *IF-THEN rule base* dengan metode implikasi MIN, kemudian menggunakan metode MAX untuk meringkas hasil dari setiap *rule fuzzy*, maka matriks *rule base* yang dihasilkan dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Basis aturan fuzzy

OUTPUT	DELTA ERROR				
	NHD	NLD	ZD	PLD	PHD
NHE	NH	NH	NL	NL	Z
NLE	NH	NH	NL	Z	Z
ZE	NL	NL	Z	PL	PL
PLE	Z	Z	PL	PH	PH
PHE	Z	PL	PL	PH	PH

HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk dapat mengetahui desain dan analisis respon sistem pada penelitian ini, dilakukan simulasi dengan menggunakan Simulink pada Matlab 2018a. Uji analisis dilakukan pada sistem *self balancing* pada *propeller dual-motor*, yaitu pada saat sistem tanpa pengendali, dengan sistem kendali, dan pada saat sistem dengan pemberian sinyal *disturbance*. Model matematika yang diperoleh pada Persamaan (13) akan digunakan untuk simulasi Matlab. Rangkaian sistem *self-balancing propeller dual-motor* terdapat pada gambar 11 dan respon tanpa pengendali terdapat pada Gambar 12.



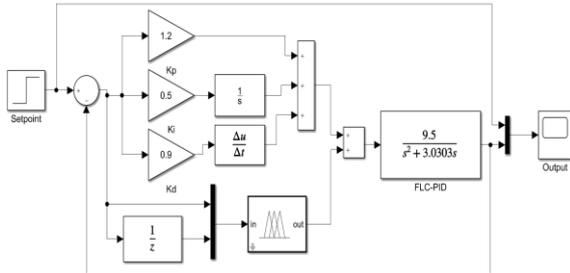
Gambar 11. Rangkaian pada Simulasi Tanpa Pengendali



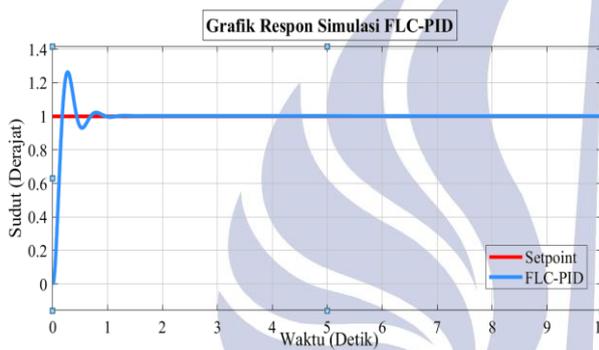
Gambar 12. Grafik respon Simulasi Tanpa Pengendali

Dalam penelitian ini penulis menggunakan kendali FLC-PID. Setelah didapatkan nilai PID dengan metode tuning kedua Ziegler-Nichols dan kontroler fuzzy dengan metode mamdani, langkah selanjutnya adalah menggabungkan kedua kontroler tersebut ke dalam sistem *self balancing* untuk mengatur kecepatan motor *DC brushless* sesuai dengan *set point*. *Set point* yang

diberikan dalam simulasi adalah 1 derajat, dan waktu simulasi adalah 10 detik. Gambar 13 menunjukkan rangkaian pengendali FLC-PID, dan diagram respon rangkaian pengendali FLC-PID *self-balancing* pada *propeller dual-motor* ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 13. Rangkaian FLC-PID pada Simulink



Gambar 14. Grafik Respon Simulasi FLC-PID

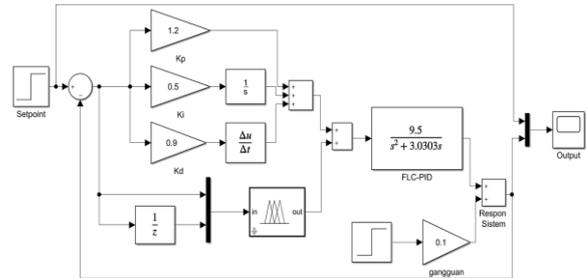
Berdasarkan hasil simulasi respon sistem dengan menggunakan kontroler FLC-PID, Gambar 14 menunjukkan bahwa respon sistem lebih stabil dibandingkan tanpa kontroler. Terlihat bahwa walaupun masih terjadi *overshoot*, respon sistem dapat dengan cepat mencapai *set point*. Namun, respon tersebut menunjukkan bahwa tidak banyak osilasi dan kesalahan kondisi tunak (Ess) yang bernilai kecil. Untuk pemahaman yang lebih detail mengenai karakteristik hasil respon dari FLC-PID, lihat Tabel 2.

Tabel 2. karakteristik hasil respon FLC-PID controller

Parameter	Nilai
Waktu Naik (Tr)	0.12 s
Waktu Tunda (Td)	0.10 s
Waktu Tunak (Ts)	0.82 s
Simpangan Maksimum (MP)	26.1%
Error Steady State (Ess)	0.0014

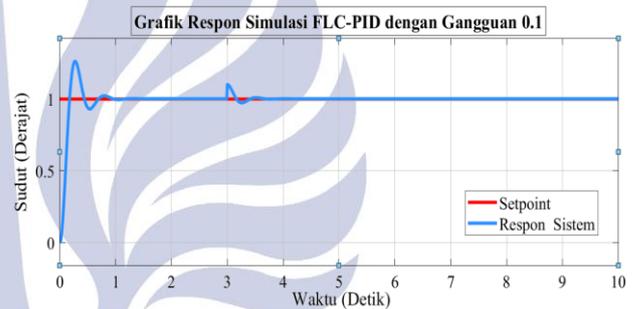
Untuk pengujian selanjutnya dengan menambahkan gangguan pada sistem yang telah diberikan pengendali. Gangguan pada motor DC disebabkan oleh perubahan beban (Darmawan, 2020). Gangguan sistem adalah 0,1, 0,2, dan 0,3 dan waktu simulasi untuk setiap gangguan

adalah detik ketiga dari total waktu simulasi selama 10 detik. Gambar 15 merupakan rangkaian pengendali FLC-PID ketika diberikan gangguan.

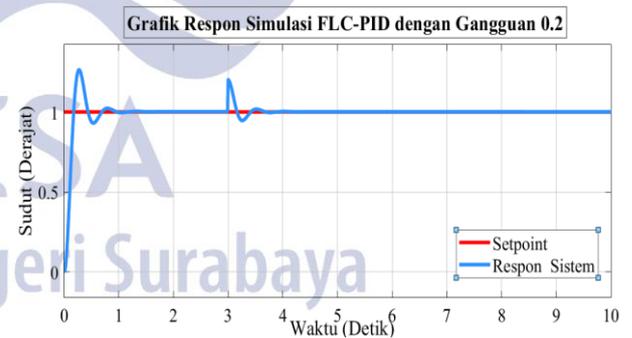


Gambar 15. Rangkaian FLC-PID dengan Gangguan pada Simulink

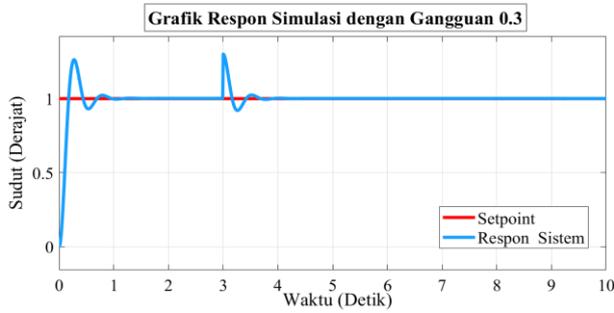
Gambar 16 merupakan hasil respon dari sistem yang mengalami gangguan 0,1, Gambar 17 merupakan hasil respon dari sistem yang mengalami gangguan 0,2 dan Gambar 18 merupakan hasil respon dari sistem yang mengalami gangguan 0,3.



Gambar 16. Grafik Respon Simulasi dengan Gangguan 0.1



Gambar 17. Grafik Respon Simulasi dengan Gangguan 0.2



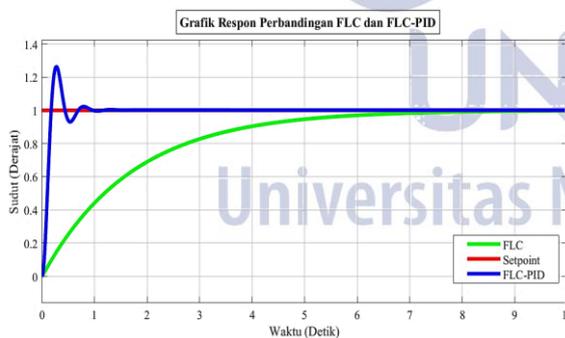
Gambar 18. Grafik Respon Simulasi dengan Gangguan 0.3

Dari grafik respon yang ditunjukkan pada Gambar 16, Gambar 17 dan Gambar 18 dapat disimpulkan bahwa ketika diberikan gangguan pada sistem *self balancing* berbasis FLC-PID, sistem masih terdapat *overshoot* namun lengan *propeller dual-motor* dapat kembali seimbang dan mencapai *set point*. Tabel 3 merupakan hasil analisis grafik respon dengan gangguan sebesar 0.1, 0.2 dan 0.3.

Tabel 3. Analisa grafik respon dengan gangguan sebesar 0.1, 0.2 dan 0.3.

Gangguan	Ts(s)	Mp(%)	Ess
0.1	0.32	09.9	0.0013
0.2	0.37	19.9	0.0012
0.3	0.56	30.0	0.0010

Hasil respon sistem dengan perbedaan dua kontroler ditunjukkan oleh Gambar 19.



Gambar 19. Grafik Respon Perbedaan FLC dan FLC-PID

Berdasarkan hasil grafik respon pada Gambar 19 dibuktikan bahwa sistem *self balancing propeller dual-motor* berbasis FLC-PID memiliki respon sistem yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan kendali Fuzzy. Hasil analisis terhadap perbedaan dua kontroler yang diaplikasikan pada sistem *self balancing* dapat dilihat pada tabel 4.

Tabel 4. Perbedaan respon sistem terhadap 2 kontroler

Kontroler	Tr(s)	Td(s)	Ts(s)	Mp(%)	Ess
FLC	3.70	1.19	6.45	-	0,0028
FLC-PID	0.12	0.10	0.82	26.1	0.0014

Tabel 4 merupakan hasil perbedaan respon sistem dari kedua kontroler yang dibuktikan dengan simulasi Simulink Matlab 2018a. Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa penggunaan FLC-PID dapat mempercepat sistem untuk mencapai *set point*. Melalui pengujian ini dapat dibuktikan bahwa sistem *self-balancing* pada *propeller dual-motor* dapat merespon lebih baik jika dikomparasikan dengan pengendali Fuzzy.

PENUTUP

Simpulan

Dari penelitian yang telah dilaksanakan dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem *self-balancing* pada *propeller dual-motor* menggunakan kendali FLC-PID dapat bekerja dengan baik. Sistem *self balancing* dapat menyeimbangkan posisi selama gangguan dan dapat dengan cepat kembali ke titik seimbang. Dibandingkan dengan pengendali sebelumnya, kendali FLC-PID memiliki respon sistem yang lebih baik. *Rise time* = 0.12 s, *settling time* = 0.81 s, *time delay* = 0.10 s dan kenaikan *ess* = 0.0014%.

Saran

Dalam studi ini, hasil yang diperoleh dari perancangan sistem kendali FLC-PID pada *self balancing propeller dual-motor* merupakan hasil dari simulasi menggunakan Simulink pada Matlab 2018a. Jika ingin mengetahui hasil sistem yang sebenarnya, harus menggunakan perangkat *self-balancing* nyata pada *propeller dual-motor* untuk pengujian lebih lanjut. Hasil yang didapat dari penelitian ini sebaiknya dijadikan dasar untuk menentukan parameter dari masing-masing komponen yang akan diimplementasikan pada *self balancing propeller dual-motor*.

DAFTAR PUSTAKA

Agarwal, S., Mohan, A., Kumar, K., 2013. *Design and Fabrication of Twinrotor UAV*. Computer Science & Information Technology (CS & IT) Computer Science Conference Proceedings, pp. 369-377.

Black, N. 2006. *Consensus development methods*. Oxford: Blackwell Publishing.

Li, B., Zhou, W., Sun, J., Yung Wen, C., Keng Chen, C. 2018. MDPI, 18(9), 28-59.

- Darmawan, Eddy. 2020. *Perancangan Sistem Kendali Hybrid PID dan Fuzzy Logic Pada Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Quater Decay*. Riau: Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
- Setiyawan, Armanda H. 2019. *Rancang Bangun Sistem Pengendalian Self Balancing Pada Dual Motor Propeller Berbasis Fuzzy Logic Controller*. Jurnal Teknik Elektro. Univesitas Negeri Surabaya, 8(3): 469-477.
- Hosseializade, T., Hosseini, S.M.J., Khaloozadeh.,H. 2016. *Design and Implementation Classical, State Feedback and Fuzzy Controllers on Twin Rotor System*. International Conference on Control, Instrumentation, and Automation, pp 126-130.
- Hudha, Mohamad S. 2019. *Rancang bangun sistem pengendalian self balancing pada dual motor propeller menggunakan kontroler PID*. Jurnal Teknik Elektro. Univesitas Negeri Surabaya, 8(2): 241-250.
- Prabowo, Randhy N., Suwandi., Qurtobi, A. 2018. *Perancangan Kontrol Kadar Keasaman Menggunakan Hybrid Fuzzy PID Pada Sistem Hidroponik Untuk Pertumbuhan Tomat*. e-Proceeding of Engineering, 5(1): 923-930.
- Ogata, Katsuhiko., *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1996.
- Prayogo, Rheco A. 2016. *Perancangan Sistem Kendali Gerak Lateral Way-To-Way Point UAV Quadcopter Menggunakan Kontroler PID Fuzzy*. Surabaya: Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh November.
- Priambodo., Ardy S, Cahyadi., Adha I, Herdjunanto., S. 2017. *Perancangan Sistem Kendali PD Untuk Kestabilan Terbang Melayang UAV Quadcopter*. CITEE, pp 117-121.
- Purnama, Aditya C. 2016. *Pengendalian Tegangan Output Generator DC Penguat Terpisah Menggunakan Kontrol Hybrid PID-Fuzzy Berbasis Arduino Uno R3*. Jember: Fakultas Teknik, Universitas Jember.
- Siyoto, Sandu. Sodik, M, Ali. 2015. *Dasar Metodologi Penelitian*. Literasi Media Punlishing. Yogyakarta: 23.