

# Perancangan Sistem Kendali *Self Balancing* Pada *Twin Rotor Propeller* Berbasis *Hybrid PD-Fuzzy Controller*

Eka Andila Putri Khusnul Khotimah<sup>1</sup>, MuhamadSyarieffuddienZuhrie<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, 60231, Indonesia  
([eka.17050874043@mhs.unesa.ac.id](mailto:eka.17050874043@mhs.unesa.ac.id))

(<sup>4</sup>Jurusan TeknikElektroFakultasTeknikUniversitasNegeri Surabaya)

## Abstrak

*Unmanned Aerial Vechine (UAV) adalah sebuah rancangan kapal udara dimana di dalamnya tidak lagi menggunakan pilot untuk mengoperasikannya dan umumnya dikendalikan menggunakan remot kontrol. Pesawat tak berawak tipe helicopter yang hanya mempunyai dua baling-baling biasa disebut twin rotor atau twin copter. Permasalahan dalam pengaplikasian twin rotor adalah ketidakstabilan sistem ketika diberikan beban yang dapat mempengaruhi sikap terbang hingga dapat menyebabkan terjatuhnya pesawat dari ketinggian tertentu. Tujuan pengkajian gagasan ini adalah membuat sistem kendali self balancing pada twin rotor propeller berbasis hybrid PD-fuzzy controller agar mampu menyeimbangkan sikap terbang pada twin rotor saat diberikan gangguan berupa beban pada motor. Metode yang digunakan yaitu dengan melakukan simulasi plant menggunakan software Matlab 2018a. Simulasi dilakukan dengan menggunakan data sekunder sebagai acuan untuk mengisi nilai parameter-parameter dari tiap komponen. Dalam penelitian ini mendapatkan hasil bahwa sistem kendali hybrid PD-fuzzy dapat bekerja dengan baik dalam sistem self balancing pada twin rotor propeller. Berdasarkan hasil simulasi dapat diketahui kendali hybrid PD-fuzzy dapat mempercepat rise time dan settling time dibandingkan dengan menggunakan kendali Fuzzy dan kendali PID. Didapatkan hasil  $t_d = 0,11$  detik,  $t_r = 0,11$  detik,  $t_s = 0,81$  detik,  $M_p = 25,9\%$ ,  $ess = 0\%$ .*

**Kata kunci:**Hybrid PD-Fuzzy,Self balancing, Twin rotor.

## Abstract

*Unmanned Aerial Vechine (UAV) is an aircraft design which is the pilot no longer uses to operate it and is generally controlled using a remote control. A helicopter type drone that only has two propellers is called a twin rotor or twin copter. The problem in the application of twin rotors is the instability of the system, given a load which can affect flight attitude so that it can cause the plane to fall from a certain height. The purpose of this research is to design a self balancing control system on a twin rotor propeller based on hybrid PD-fuzzy controller in order to balance the flying attitude of the twin rotors when disturbed in the form of a load on the motor. The method used is to carry out a plant simulation using the Matlab 2018a software. The simulation is carried out using secondary data as a reference for filling in the parameter values of each component. In this paper, the PD-fuzzy hybrid control system can work well in a self balancing system on a twin rotor propeller. From simulation results, its show hybrid PD-fuzzy control can accelerate the rise time and settling time compared to using Fuzzy control and PID control. The results obtained were  $t_d = 0.11$  seconds,  $t_r = 0.13$  seconds,  $t_s = 0.81$  seconds,  $M_p = 25.9\%$ ,  $ess = 0\%$ .*

**Keyword:**Hybrid PD-Fuzzy, Self balancing, Twin rotor.

## I. PENDAHULUAN

Dalam dunia penerbangan telah banyak peneliti mengkaji tentang perkembangan teknologi pesawat tak berawak atau *Unmanned Aerial Vechine (UAV)*. UAV merupakan rancangan kapal udara dimana di dalamnya tidak lagi menggunakan pilot untuk

mengoperasikannya dan umumnya dikendalikan menggunakan remot kontrol. Yang mulanya pesawat tanpa awak ini hanya sebagai komersil dalam fotografi udara kini telah berevolusi secara bertahap dan menjadi alat industri seperti, mengirimkan kargo, inspeksi jalan raya hingga misi pencarian dan penyelamatan. (Boyang dkk, 2018).

Dua tipe pesawat yang umum digunakan yaitu tipe *fixed wing* and *multi rotor* baik dengan kelebihan dan kekurangan dari masing-masing pesawat. Terdapat perbedaan untuk daya angkat dari *fixed wing* and *multi rotor*. Dimana untuk menghasilkan daya angkat tipe *fixed wing* menggunakan sayap dan tipe *multi rotor* menggunakan baling-baling yang berputar. UAV tipe *fixed wing* dapat terbang dengan waktu yang lebih lama dengan aerodinamika yang efisien, tetapi membutuhkan ruang yang luas untuk landasan pacu atau peluncur. Sebaliknya untuk UAV tipe *multi rotor* tidak membutuhkan dukungan infrastruktur tambahan seperti peluncur dan landasan pacu, disisi lain *multi rotor* tidak dapat melakukan misi dengan ketahanan yang lama dan kecepatan terbang yang rendah. *Multi rotor* banyak digunakan untuk kebutuhan darurat di tempat-tempat yang tidak memiliki landasan pacu. Karena memiliki kecepatan rendah saat terbang bahkan diam di udara *multi rotor* banyak digunakan untuk mengukur, menyurvei, mendeteksi dan operasi penyelamatan. (Prajwal dkk, 2018)

Jenis pesawat tak berawak tipe *multi rotor* memiliki sistem VTOL (*Vertikal Take-Off Landing*). *Multi rotor* atau disebut juga *multi copter* merupakan sebuah perangkat terbang yang paling tidak menggunakan dua motor dan posisi rotor tidak berubah terhadap poros putar. Pesawat jenis ini disegani karena kemampuannya yang unik yaitu dapat lepas landas dan mendarat secara vertikal. (Wenhu dkk, 2020).

Pesawat tak berawak tipe *helicopter* yang hanya mempunyai dua baling-baling biasa disebut *twin rotor* atau *twincopter*. Baling-baling pada *twin rotor* terletak di samping kanan dan juga samping kiri badan pesawat. Seperti *helicopter* pada umumnya *twin rotor* menggunakan sistem VTOL (*Vertikal Take-Off Landing*). Sebagai sistem dinamika copel, jika kecepatan motor berubah maka akan berubah pula posisi motor. Karena karakteristik khusus dari *twin rotor* yang sulit diterapkan melalui mekanisme dan struktur lain, hal ini menyebabkan meningkatnya minat dalam penelitian, baik dalam industri maupun akademik dan juga meningkatnya permintaan

aplikasi kendaraan udara jenis ini. (Shlok dkk, 2013).

Apapun pengaplikasiannya, *twin rotor* harus mampu terbang dengan seimbang saat ada perbedaan beban pada motor agar misi dapat diselesaikan sesuai dengan yang diharapkan. Jika saat terbang pesawat tidak dalam keadaan seimbang dan stabil dapat menyebabkan terjatuhnya pesawat dari ketinggian tertentu. Sebelumnya telah dilakukan penelitian perancangan sistem *self balancing* pada *dual motor propeller* menggunakan metode PID dengan tuning *Ziegler-Nichols*. Dalam penelitian ini disimpulkan bahwa kendali PID dengan tuning *Ziegler-Nichols* dapat bekerja dengan baik dengan parameter  $K_p$  sebesar 1.2,  $K_i$  sebesar 0.045,  $K_d$  sebesar 0.89, *error steady state* sebesar 1.23% dan *overshoot* sebesar 3.16%. (Hudha, 2019).

Penelitian tentang *self balancing* pada *dual motor propeller* dengan metode kendali logika fuzzy sebelumnya juga telah dilakukan dan respon dapat menyeimbangkan sistem dengan baik dengan nilai hasil respon sistem yaitu *error steady state* sebesar 0.362, *overshoot* sebesar 24%, waktu tunda sebesar 1,013 detik, waktu puncak sebesar 1,501 detik, waktu tunak (5%) sebesar 0,954 detik, dan waktu naik sebesar 0,954 detik. (Armanda, 2019).

Pada penelitian ini dikembangkan penelitian *self balancing* pada *twin motor propeller* berbasis *hybrid PD-fuzzy controller*. Sistem *hybrid PD-fuzzy controller* merupakan sebuah pengendali dengan *loop* tertutup gabungan antara pengendali proporsional, integral, derivatif dan juga logika fuzzy. Tujuan dari penggabungan dua kontroler tersebut adalah untuk mendapatkan keuntungan dari setiap kontroler dan menghasilkan kontrol yang memiliki respon lebih baik daripada hanya menggunakan kontrol PID atau FLC. Diharapkan dari gabungan kedua pengendali ini bisa menjadi salah satu alternatif untuk menciptakan kendali yang adaptif sesuai dengan kondisi *plant*.

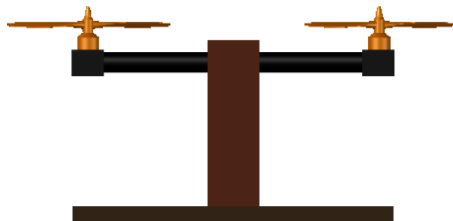
Mengacu pada penelitian-penelitian sebelumnya yang telah disebutkan diatas, penulis melakukan penelitian untuk mengkaji penerapan kontroler PD dengan *fuzzy logic controller* (FLC) pada sistem *self-balancing twin rotor propeller*. Diharapkan perancangan ini

dapat mempercepat respon sistem saat terjadi gangguan.

## II. TEORI

### A. Pemodelan Dinamik *Twin Rotor Propeller*

*Twin rotor* merupakan tipe helikopter yang penggerakannya menggunakan dua buah motor. *Twin rotor* adalah sebuah helikopter laboratorium nonlinier dan multivariat yang dirancang khusus untuk menguji dan mengevaluasi algoritma kontrol dengan cara disimulasikan pada *software* Matlab atau Simulink. Sistem ini memiliki sikap dinamis yang sama seperti helikopter yang sesungguhnya. Seperti yang dapat dilihat pada gambar 3, *twin rotorpropeller* terdiri dari dua motor DC *brushless* yang menggerakkan *propeller* di sisi kanan dan sisi kirinya. Perputaran baling-baling bergerak pada arah yang berlawanan. Jika kecepatan putar motor berubah maka akan menyebabkan perubahan pada posisi sudutnya. Karena karakteristik khusus dari *twin rotor* yang sulit diterapkan melalui mekanisme dan struktur lain. Hal ini menyebabkan meningkatnya minat dalam penelitian, baik dalam industri maupun akademik dan juga meningkatnya permintaan aplikasi kendaraan udara jenis ini. (Shlok dkk, 2013).



Gambar 1. *Twin Rotor Propeller*  
(Sumber: Shlok dkk, 2013)

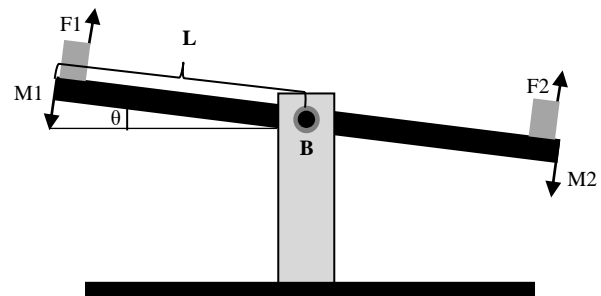
### B. Model Matematika *Plant Twin Motor Propeller*

Dalam penelitian ini, sistem *self-balancing* pada *twin rotor propeller* dimodelkan dengan menggunakan *Newton method*. Di metode Newton diasumsikan persamaan gaya dan torsi dengan menggunakan dari prinsip kerja tuas. Plant digambarkan sebagai sebuah benda tegar dengan massa balok sama berada pada kedua ujung sisi balok. Total massa motor dan massa balok yang berada di sisi ujung balok dilambangkan dengan  $M_1$  dan  $M_2$ . Sedangkan untuk momen inersia, setengah panjang balok, dan koefisien redaman dinotasikan dengan  $j$ ,  $L$ , dan  $B$ . Sehingga didapatkan persamaan dari model diatas sebagai berikut:

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

Dimana:  $j$  ( $\text{kg/m}^2$ ) - momen inersia turunan kecepatan,  $T$  ( $\text{Nm/kg}$ ) - gaya dorong dari motor *brushless* DC,  $F_1$  ( $\text{kg}$ ) - gaya dorong (*thrust*) motor 1,  $F_2$  ( $\text{kg}$ ) gaya dorong (*thrust*) motor 2,  $L$  ( $\text{cm}$ ) - panjang lengan,  $\theta$  ( $\text{rad}$ ) - posisi sudut,  $\dot{\theta}$  ( $\text{rad/s}$ ) - perubahan posisi sudut,  $g$  ( $\text{m/s}^2$ ) - gaya tarik bumi,  $B$  ( $\text{g/mL}$ ) - koefisien redaman,  $M_1$  ( $\text{kg}$ ) - massa ujung kiri,  $M_2$  ( $\text{kg}$ ) - massa ujung kanan.

Nilai paramater yang diberikan pada persamaan (1) dapat dilihat pada diagram skematik yang ditunjukkan pada gambar 2



Gambar 2. Skematik Gaya Sistem  
(sumber: Hosseinalizade, 2016)

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

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

Dimana:  $\theta$  ( $\text{rad}$ ) - posisi sudut,  $\dot{\theta}$  ( $\text{rad/s}$ ) - perubahan posisi sudut.

Dari skematik sistem yang ditunjukkan oleh gambar 4, didapatkan persamaan nonlinearnya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 = f_1(t) \\ \dot{x}_2 &= \ddot{\theta} = \frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta}) = f_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Kemudian untuk melinierkan persamaan (3) digunakan metode jacobian sehingga didapatkan:

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \frac{\partial f_1}{\partial x_2} &= J_x(0) \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ Lg\sin(0)(m_1 - m_2) & -B \end{bmatrix} \\ \frac{\partial f_1}{\partial F} &= \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Perhitungan penjabaran dari persamaan (5) dimana  $\partial\omega$  diturunkan terhadap  $\partial\theta$ .

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{j} (F_1 L - F_2 L - m_1 L g \cos\theta + m_2 L \cos\theta - B\dot{\theta}) \right)}{\partial\theta} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} &= \frac{L g \cos(\theta)(m_1 - m_2)}{j} \end{aligned} \quad (7)$$

Nilai dari  $\partial f_1$  diturunkan terhadap  $\partial x_2$ .

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

Dan untuk mendapatkan nilai dari persamaan lima (5) pada matrik baris 2 kolom dua maka nilai dari  $\partial f_2$  diturunkan terhadap  $\partial x_2$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{j} (F_1 L - F_2 L - m_1 L g \cos\theta + m_2 L \cos\theta - B\dot{\theta}) \right)}{\partial\omega} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \frac{-B}{j} \\ \frac{\partial f_1}{\partial F} &= \frac{\partial\omega}{\partial F} = 0 \\ \frac{\partial f_2}{\partial F} &= \frac{\partial \left( \frac{1}{j} (F_1 L - F_2 L - m_1 L g \cos\theta + m_2 L \cos\theta - B\dot{\theta}) \right)}{\partial F} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} &= \frac{L}{j} \end{aligned} \quad (9)$$

Dimana:  $\partial f_1$  - Diferensial gaya dorong motor 1,  $\partial f_2$  - diferensial gaya dorong motor 2,  $\partial x_1$  - diferensial posisi sudut 1,  $\partial x_2$  - diferensial posisi sudut 2.

Kemudian didapatkan persamaan linear *state space* sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

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

Transfer fungsi sistem ( $G(s)$ ) yaitu:

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

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

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

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

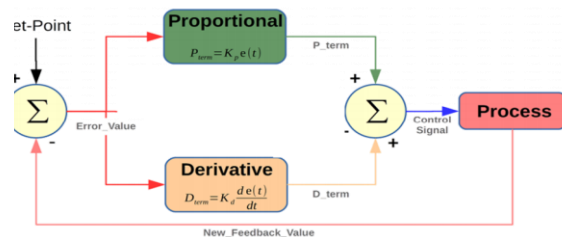
$$B = 1$$

Maka dapat dituliskan fungsi transfer dari sistem *self-balancing* pada *twin motorpropeller* dengan mendistribusikan nilai parameter fisik ke dalam persamaan (12) sehingga didapatkan persamaan (13)

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

### C. Kendali PD

Kendali PD merupakan terdiri dari 2 komponen kendali yaitu kendali Proporsional ( $P$ ) dan Kendali Derivatif ( $D$ ). Dalam kontrol proporsional nilai input sistem ekuivalen terhadap nilai output. Sinyal keluaran adalah sinyal hasil penguatan  $K_p$  (Konstanta Proporsional) dari sistem.  $K_p$  memiliki aksi yang cepat dan tinggi. Pada aksi kontrol integral, *output* yang dihasilkan selalu berubah-ubah selama ada transisi nilai dari *setpoint* pada sistem dan laju transisi sinyal keluaran berbanding lurus terhadap transisinya. Untuk kontrol *derivative* (turunan) pengaplikasian kendali tersebut biasa diaplikasikan dengan kontrol proporsional dan kontrol integral. Konstanta derivatif atau yang dinyatakan dengan  $K_d$  mempengaruhi kestabilan sistem dengan cara mereduksi *error*. (Alva, 2020).



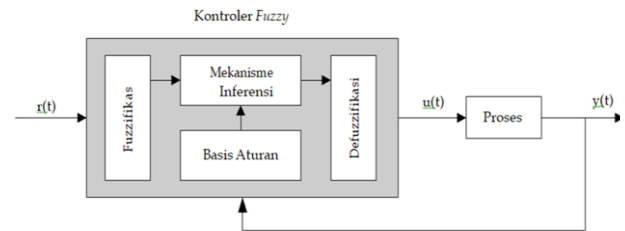
Gambar 3. Kontrol PD pada Plant  
(Sumber: Priambodo, 2017)

### D. Kendali Fuzzy Logic

Konsep logika fuzzy yaitu dengan mengubah logika klasik ke dalam bentuk logika yang memetakan variabel kemungkinan yang bukan eskak hingga diperoleh sistem linguistik dari keadaan yang tidak pasti. (Prayogo, 2016).

Secara umum sruktur kendali *fuzzy logic* terdiri dari fuzzifikasi yang berguna sebagai pengubah sinyal *input* berupa nilai tegas (*crisp*) sehingga membentuk himpunan *fuzzy* dengan operator fuzzifikasi. Yang kedua yaitu basis aturan *fuzzy* yang memuat *rule* untuk mendeskripsikan himpunan *fuzzy* dari sinyal *input* dan *output*. Format yang paling umum digunakan yaitu format aturan *IF-THEN*, format hubungan dan format tubular. Sruktur kendali *fuzzy logic* yang ketiga adalah logika pengambil keputusan. Intefernsi *fuzzy* merupakan proses memetakan *input* dengan *output* menggunakan logika *fuzzy*. Metode *Takagi-Sugeno* dan metode *Mamdani* merupakan metode interferensi yang sering digunakan . Sruktur kendali *fuzzy logic* yang terakhir yaitu defuzzifikasi. Defuzzifikasi merupakan sebuah langkah pengubahan kembali variabel *fuzzy* menjadi variabel *crisp*. Sruktur

kendali *fuzzy logic* tampak seperti gambar dibawah ini:

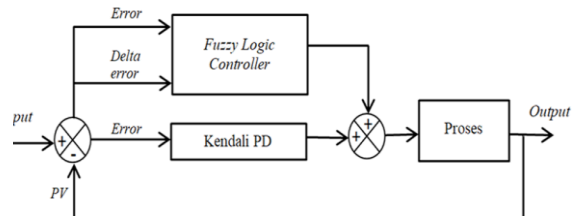


Gambar 4. Struktur Kendali Fuzzy  
(Sumber: Prayogo, 2016)

### E. Hybrid PD-Fuzzy Controller

Secara umum sistem *hybrid* merupakan penggabungan lebih dari satu elemen berlainan menjadi satu kesatuan sistem. Pada sistem kontrol terdapat kemajuan teknologi hingga terciptanya kendali *hybrid* yang mana dalam sistem kendali ini mengintegrasikan lebih dari satu kontroler ke dalam suatu sistem (Randhy, 2018).

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



Gambar 5. Struktur Kendali Hybrid Fuzzy-PD  
(Sumber: Randhy, 2018)

## III. METODE

### Pendekatan Penelitian

Penelitian ini disusun menggunakan metode penelitian eksperimen. Berdasarkan buku tulisan Siyoto (2015:23) dengan judul “Dasar Metode Penelitian” dijelaskan bahwa penelitian eksperimen adalah penelitian kausalitas yang mana penelitian ini bertujuan menjelaskan hubungan sebab dan akibat. Hubungan kausalitas harus dijelaskan dengan melakukan kontrol dan pengukuran yang cermat terhadap variabel penelitian penbandingnya. Data yang digunakan adalah data skunder yang didapatkan dari studi literatur berupa jurnal, buku teks, skripsi dan tesis. Simulasi dilakukan dengan menggunakan data sekunder sebagai acuan

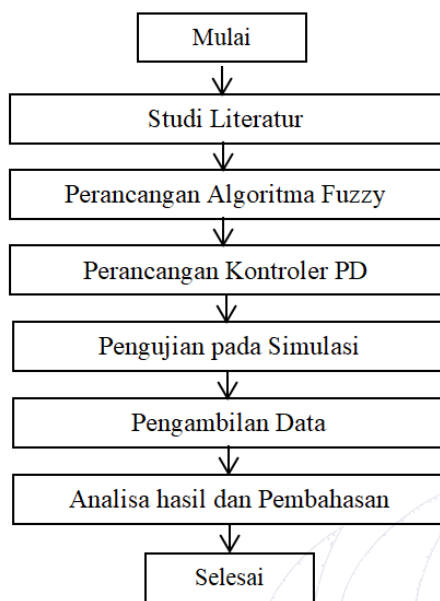
untuk mengisi nilai parameter-parameter dari tiap komponen.

### Instrumen Pengumpulan Data

Instrumen penelitian berfungsi sebagai alat bantu penulisan penelitian untuk memperoleh data yang dibutuhkan (Black, 2006). Penulis menggunakan *Software* Matlab 2018a yang telah terinstal pada laptop. Matlab 2018a digunakan untuk menjalankan simulasi dan menampilkan respon dari sistem *self balancing* pada *twin rotor propeller*.

### Rancangan Penelitian

Rancangan penelitian dapat dilihat dari *flowchart* pada gambar 6



Gambar 6. Skema *flowchart* rancangan penelitian  
(Sumber: Dokumen pribadi, 2021)

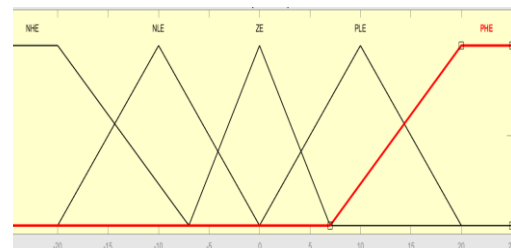
Berdasarkan pada gambar 6 penyusunan penelitian dimulai dengan studi literatur dari berbagai referensi seperti jurnal, skripsi, tesis dan *ebook*. Kemudian langkah selanjutnya yaitu membuat perancangan algoritma fuzzy dan perancangan kontroler PD. Setelah didapatkan rancangan algoritma fuzzy dan kontroler PD maka dilanjutkan dengan pengujian pada simulasi dalam beberapa kondisi menggunakan *software* matlab 2018a, kemudian mengambil data dari simulasi yang dilakukan. Langkah terakhir yaitu mengamati dan menganalisis data respon *hybrid PD-fuzzy controller* pada tiap kondisi.

### Perancangan Sistem Kendali

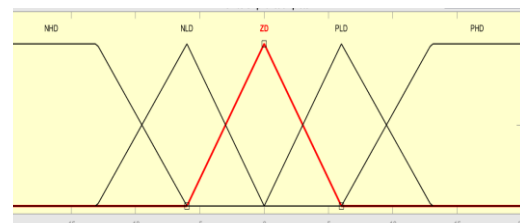
Salah satu kontroler yang digunakan untuk menjaga keseimbangan motor dalam sistem *self balancing* yaitu kontroler PD. Nilai dari parameter  $K_p$  dan  $K_d$  didapatkan dengan menggunakan aturan *tuning* dari *second method Ziegler-Nichols*. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari peneliti terdahulu didapatkan nilai untuk  $K_p = 1$  dan  $K_d = 1.84$  (Hudha, 2019).

Kendali logika fuzzy dalam kendali *hybrid* digunakan agar respon yang dihasilkan oleh kendali PD dapat lebih optimal. (Randhy, 2018). Masukan untuk logika fuzzy berupa *error* dan *deltaerror*. *Error* yaitu selisih nilai keluaran dengan nilai pembacaan sudut oleh sensor IMU 6050. Dan untuk *deltaerror* merupakan nilai selisih perubahan *error*. (Armanda, 2019).

Dalam penelitian ini penulis menggunakan 2 *input* dan 1 *output*. Fungsi keanggotaan terbagi menjadi 5 himpunan fuzzy yang mana direpresentasikan menggunakan kurva segitiga dan trapesium. Untuk himpunan fuzzy *error* berupa *Negative High Error (NHE)*, *Negative Low Error (NLE)*, *Zero Error (ZE)*, *Positive Low Error (PLE)* dan *Positive High Error (PHE)*. Sedangkan untuk himpunan fuzzy *delta error* terdiri atas *Negative High Delta Error (NHD)*, *Negative Low Delta Error (NLD)*, *Zero Delta Error (ZD)*, *Positive Low Delta Error (PLD)* dan *Positive High Delta Error (PHD)*. Nilai fungsi keanggotaan (*membership function*) yang digunakan dalam merancang himpunan masukan *error* ditunjukkan pada gambar 7 dan *delta error* ditunjukkan pada gambar 8.



Gambar 7. Himpunan *input error*  
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2021)

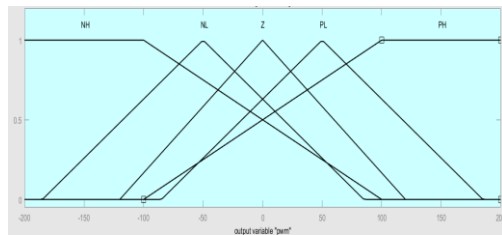


Gambar 8. Himpunan *input delta error*  
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2021)

Gambar 9 merupakan keluaran dari sistem *self balancing* berupa nilai PWM yang akan



mengerakkan motor agar berputar. Perancangan himpunan keluaran fuzzy menggunakan lima nilai linguistik.



Gambar 9. Himpunan output  
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2021)

Terdapat 25 aturan fuzzy yang nantinya akan diterapkan pada tahap *interface*. FIS yang digunakan yaitu metode mamdani dan menggunakan basis aturan IF-THAN.

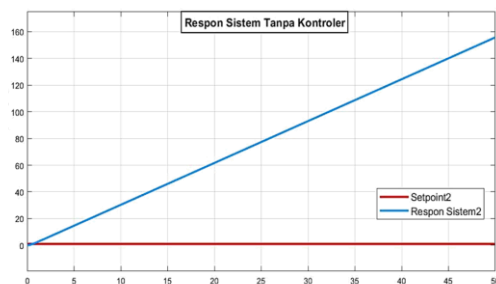
Tabel 1. Basis aturan fuzzy

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

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perancangan dan analisis untuk dapat mengetahui respon sistem dalam penelitian ini dilakukan simulasi dengan menggunakan simulink pada Matlab 2018a. Adapun pengujian analisa dilakukan pada sistem *self balancing* pada *twin rotorpropeller* yaitu ketika tanpa diberikan kontroler, ketika diberikan kontroler *hybrid* dan ketika dengan kontroler dan diberikan gangguan. Model matematika yang telah diperoleh pada persamaan (13) akan digunakan untuk melakukan pengujian pada Matlab.

Hasil respon sistem tanpa menggunakan kontroler diperoleh seperti pada gambar 10.

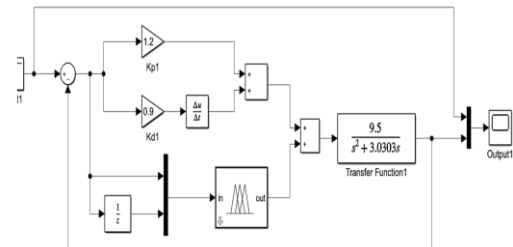


Gambar 10. Grafik respon tanpa menggunakan kontroler  
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2021)

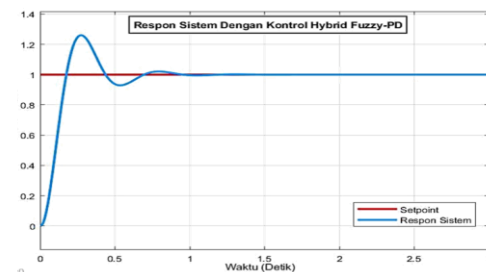
Gambar 10 menunjukkan bahwasannya grafik respon tanpa menggunakan kontroler

terus naik menuju tak terhingga dan tidak dapat mengikuti *set point* yang ditentukan. Hal ini membuktikan jika sistem *self balancing* pada *twin rotorpropeller* tidak dapat mempertahankan posisinya dalam keadaan seimbang. Apabila diterapkan dalam *real plant* dan terjadi osilasi pada sistem maka sistem tidak dapat menyeimbangkan posisinya dan dapat menyebabkan terjadinya kerusakan pada peralatan yang digunakan. Oleh karena itu diperlukan suatu kontroler agar dapat mengatur kecepatan motor sehingga dapat menyeimbangkan *twin rotorpropeller*.

Pada penelitian ini penulis menggunakan *hybrid PD-fuzzy controller*. Setelah didapatkan nilai untuk parameter PD dengan menggunakan *tuningsecond method Ziegler-Nichols* dan pengendali fuzzy dengan metode mamdani maka langkah selanjutnya yaitu dengan menggabungkan kedua kontroler tersebut ke dalam plant agar dapat mengatur kecepatan putaran motor *DC Brushless* sehingga didapatkan respon sistem sesuai dengan *set point*. Adapun *set point* yang diberikan pada simulasi yaitu 1 derajat dengan waktu simulasi 3 detik. Gambar 11 menunjukkan rangkaian *hybrid PD-fuzzy controller* dapat dilihat dan grafik respon dari *hybrid PD-fuzzy controller self balancing* pada *twin rotorpropeller* terdapat pada gambar 12.



Gambar 11. Rangkaian kontroler *hybrid Fuzzy-PD*  
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2021)



Gambar 12. Simulasi respon sistem menggunakan kontroler *hybrid Fuzzy-PD*  
(Sumber: Dokumen Pribadi, 2021)

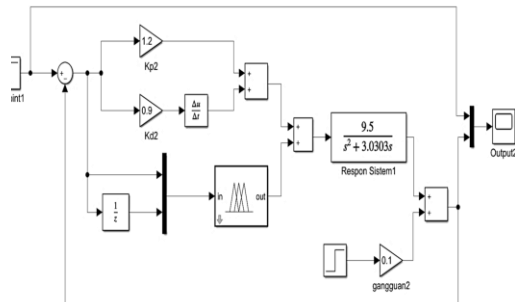
Dari hasil Simulasi respon sistem menggunakan *hybrid PD-fuzzy controller* pada

gambar 13 menunjukkan bahwa respon sistem lebih stabil dibandingkan tanpa menggunakan kontroler. Dapat dilihat bahwa respon sistem dapat dengan cepat mencapai *set point* walaupun masih terdapat *overshoot*. Namun respon menunjukkan bahwa tidak terdapat banyak osilasi dan tidak terdapat *Error Steady State* (Ess). Untuk mengetahui lebih rinci karakteristik hasil respon dari *hybrid PD-fuzzy controller* dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 2. karakteristik hasil respon *hybrid PD-fuzzy controller*

Parameter	Nilai
Waktu Naik (Tr)	0.11 s
Waktu Tunda (Td)	0.11 s
Waktu Tunak (Ts)	0.8065 s
Simpangan Maksimum (MP)	25.9%
Error Steady State (Ess)	0

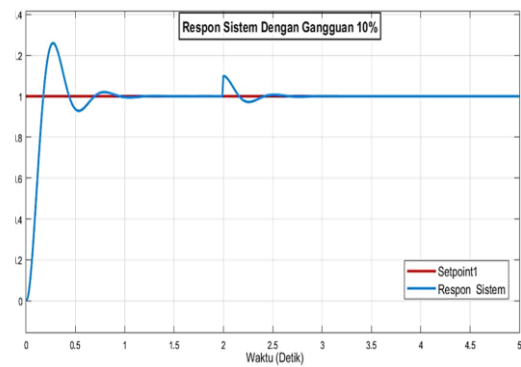
Untuk pengujian berikutnya yaitu dengan menambahkan gangguan pada sistem yang telah diberikan kontroler. Gangguan yang terdapat pada motor DC didefinisikan dengan perubahan beban yang naik maupun turun (Eddy, 2020). Sistem diberikan gangguan sebesar 10%, 20% dan 30% dari *set pointnya* yang mana *set point* adalah 1 derajat maka didapatkan gangguan sebesar 0.1, 0.2, dan 0.3 dengan masing-masing diberikan pada detik 2 dari waktu simulasi 5 detik. Gambar 13 merupakan rangkaian kontroler *hybrid Fuzzy-PD* dengan gangguan.



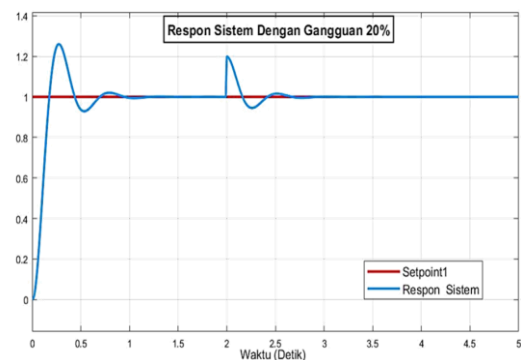
Gambar 13. Rangkaian *hybrid PD-fuzzy controller*

(Sumber: Dokumen pribadi, 2021)

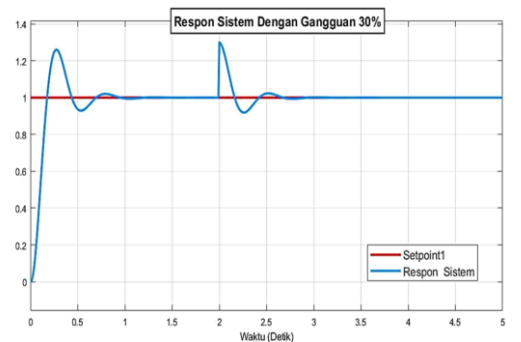
Hasil respon sistem dengan pemberian gangguan ditunjukkan pada gambar 14, gambar 15, dan gambar 16.



Gambar 14. Grafik respon dengan gangguan 10%  
(Sumber: Dokumen pribadi, 2021)



Gambar 15. Grafik respon dengan gangguan 20%  
(Sumber: Dokumen pribadi, 2021)



Gambar 16. Grafik respon dengan gangguan 30%  
(Sumber: Dokumen pribadi, 2021)

Tabel 3 merupakan hasil analisa grafik respon dengan gangguan senilai 10%, 20% dan 30% dari *set point*

**Tabel 3.** Analisa respon sistem *hybrid PD-fuzzy controller* dan pemberian gangguan sebesar 10%, 20% dan 30% dari *set point*.



Gangguan	Tr (s)	Td (s)	Ts (s)	Mp (%)	Ess
10%	0.11	0.11	2.32	25.9	0
20%	0.11	0.11	2.36	25.9	0
30%	0.11	0.11	2.56	30	0

**Tabel 4.** Perbedaan respon sistem terhadap 3 kontroler

Kontroler	Tr (s)	Td (s)	Ts (s)	Mp (%)	Ess
PID	0.84	1.04	1.73	3.16	1.23
Fuzzy	4.54	1.07	4.63	-	0.00012
Fuzzy-PD	0.11	0.11	0.81	25.9	0

Berdasarkan tabel 4 dapat dilihat bahwa respon sistem dengan menggunakan *hybrid PD-fuzzy controller* memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan kedua kontroler terdahulu yaitu dengan waktu naik (*rise time*) = 0.11, waktu tunak (*settling time*) = 0.81, waktu tunda (*time delay*) = 0.11, dan ess yang lebih kecil = 0. Dari pengujian ini dapat dibuktikan bahwa *hybrid PD-fuzzy controller* sistem *self balancing* pada *twin rotorpropeller* memiliki respon sistem yang lebih baik dibandingkan dengan kontroler PID maupun kontroler Fuzzy.

## V. SIMPULAN

Simpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu *hybrid PD-fuzzy controller* sistem *self balancing* pada *twin rotorpropeller* dapat bekerja dengan baik. *Twin rotorpropeller* dapat menyeimbangkan posisi saat terjadi gangguan dan dapat kembali menuju *set point* dengan cepat.

*Hybrid PD-fuzzy controller* memiliki respon sistem yang lebih baik dibandingkan dengan kontroler terdahulu. Hal ini dibuktikan dengan didapatkan nilai waktu naik = 0.11, waktu tunak = 0.81, waktu tunda = 0.11, dan ess yang lebih kecil = 0.

## REFERENSI

- Agrawal, S., Apoorva Mohan & Kamlesh Kumar 2013, *Design And Fabrication Of Twinrotor UAV*, Department of Mechatronics Manipal University, India.
- Ashari, Alva 2020, 'Kontrol Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Metode Field Orientation Control (FOC) Berbasis Fuzzy-PID', *Jurnal Teknik Elektro Univesitas Negeri Surabaya*.
- Boyang, Li. Zhou, Weifeng. Sun, Jingxuan 2018, *Development of Model Predictive Controller for a Tail-Sitter VTOL UAV in Hover Flight*, Switzerland, Basel
- Darmawan, Eddy 2020, 'Perancangan Sistem Kendali Hybrid PID dan Fuzzy Logic Pada

Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Quater Decay', *SkripsiTeknik ElektroUniversitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau*.

Guntoro, Prayuda 2021, 'Sistem Kendali Dual Motr Propeller Pada Alat Self Balancing Menggunakan Kontroler PID dengan Tuning CHR', *Jurnal Teknik Elektro Univesitas Negeri Surabaya*.

Hari, Armanda 2019, 'Rancang Bangun Sistem Pengendalian Self Balancing Pada Dual Motor Propeller Berbasis Fuzzy Logic Controller', *Jurnal Teknik Elektro Univesitas Negeri Surabaya*.

Hosseializade, T., S.M.J Hosseini dan H. Khaloozadeh 2016, *Design and Implementation Classical, State Feedback and Fuzzy Controllers on Twin Rotor System*, Department of Control Engineering K.N. Toosi University of Technology, Iran.

Hudha, Mohamad 2019. 'Rancang Bangun Sistem Pengendalian Self Balancing pada Dual Motor Propeller Menggunakan Kontroler PID', *Jurnal Teknik Elektro Univesitas Negeri Surabaya*.

Nofrialdi 2021, 'Rancang Bangun Self Balancing Twinrotor Menggunakan Kontroler PID Tuning Particle Swarm Optimization', *Jurnal Teknik Elektro Univesitas Negeri Surabaya*.

Prabowo, Randhy 2018, 'Perancangan Kontrol Kadar Keasaman Menggunakan Hybrid Fuzzy PID Pada Sistem Hidroponik Untuk Pertumbuhan Tomat', *Jurnal Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom*.

Priambodo, Ardy 2017, 'Perancangan Sistem Kendali PD untuk Kestabilan Terbang Melayang UAV Quadcopter', Departemen *Jurnal Teknik Elektro dan Teknologi InformasiFakultas TeknikUniversitas Gadjah Mada*.

Putra, Nugroho 2021, 'Desain Kendali Twin Rotor Pada Self Balancing Menggunakan Metode Optimasi Genetic Algorithm', *Jurnal Teknik Elektro Univesitas Negeri Surabaya*.

Samsul, Bachri 2004, 'Sistem kendali hybrid PID-Logika Fuzzy pada Pengaturan Kecepatan Motor DC', *Jurnal Teknik Elektro Program Studi Teknik Universitas Jember*.

Shenoy, T.Prajwal. Shenoy, K.Praveen. Khan, Lukhman 2017, *Design and Development of a Novel Triphibian Quadcopter*, Faculty of Department of Mechatronics Engineering, Manipal University and Centre for Avionics, Manipal University.

Siyoto, Sandu. Sodik, M, Ali 2015, *Dasar Metodologi Penelitian, Literasi Media* Punlishing, Yogyakarta.

UNESA 2000, *Pedoman Penulisan Artikel Jurnal*, Lembaga Penelitian Universitas Negeri Surabay, Surabaya.

Zhou, Wenwu. Ning, Zhe. Li, Haixing. Hu, Hui 2017, *An Experimental Investigation on Rotor-to-Rotor Interaction of Small UAV*, Department of Aerospace Engineering, Iowa State University