

Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Menggunakan Hybrid PD-Fuzzy Controller

Muhammad Faishol Hasib

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : muhammad.17050874040@mhs.unesa.ac.id

Endryansyah, Puput Wanarti Rusimamto, Muhamad Syariffuddien Zuhrie

Dosen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
e-mail : endryansyah@unesa.ac.id, puputwanarti@unesa.ac.id, zuhrie@unesa.ac.id

Abstrak

Permasalahan pada UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) tipe *single rotor* adalah pada stabilitas terbangnya seperti bergetar, tidak terkendali, dan bahkan bisa jatuh saat terbang di udara. *Aero pendulum* merupakan implementasi nyata pada pengendalian sikap terbang UAV. *Aero pendulum* adalah pendulum dengan baling-baling di salah satu ujungnya, di mana baling-baling tersebut digerakkan oleh motor arus searah (DC) yang menghasilkan gaya dorong untuk menyesuaikan posisi pendulum sesuai dengan besar tegangan yang diberikan. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang *hybrid PD-Fuzzy controller* untuk mengontrol sistem *aero pendulum* dengan menggunakan *software* Matlab. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, *hybrid PD-Fuzzy controller* dapat bekerja dengan baik dan dapat menyeimbangkan posisinya pada saat terjadi gangguan sehingga dapat kembali menuju *setpoint* dengan cepat. Pengujian dilakukan dengan *setpoint* 40°, 60°, dan 90°, respon terbaik diperoleh pada *setpoint* 60° dengan karakteristik respon sistem: *rise time* (T_r) = 0.09 s, *settling time* (T_s) = 0.15 s, *peak time* (T_p) = 0.32 s, *overshoot maximum* (M_p) = 0.003%, dan *error steady state* (E_{ss}) = 0.004%.

Kata Kunci: *Aero pendulum*, *Hybrid PD-Fuzzy*, Matlab, UAV.

Abstract

The problem with the single rotor type UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) is its flight stability such as vibrating, uncontrolled, and it even could fall while flying in the air. *Aero pendulum* is a real implementation of UAV flight attitude control. *Aero pendulum* is a pendulum with a propeller on one of it's side, where the propeller is driven by a direct current (DC) motor which generates a thrust to adjust the pendulum position according to the applied voltage. The purpose of this research is to design a hybrid PD-Fuzzy controller to control the *aero pendulum* system using the Matlab software. Based on the research that has been done, the Hybrid PD-Fuzzy controller can work well and can balance its position, when a disturbance occurs it immediately return to the set point. The test was carried out with a setpoint of 40°, 60°, and 90°, the best response was obtained at a setpoint of 60° with the characteristics of the system response: *rise time* (T_r) = 0.09 s, *settling time* (T_s) = 0.15 s, *peak time* (T_p) = 0.32 s, *overshoot maximum* (M_p) = 0.003%, and steady state error (E_{ss}) = 0.004%.

Keyword: *Aero pendulum*, *Hybrid PD-Fuzzy*, Matlab, UAV.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi kini telah mengalami kemajuan yang semakin pesat. Kemajuan teknologi ini telah banyak memberikan manfaat dan dampak yang besar dalam sektor kehidupan. Demikian halnya dengan teknologi kedirgantaraan yang terus menunjukkan perkembangan yang luar biasa, salah satunya yang terjadi pada UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

UAV merupakan pesawat tanpa awak yang sebagian besar digunakan dalam bidang militer, Perkembangan teknologi membuat UAV juga digunakan dalam bidang non-militer seperti pemetaan lokasi pertanian, pengawasan infrastruktur, fotografi, bahkan juga digunakan untuk melakukan pencarian dan penyelamatan pada saat terjadi bencana. Berdasarkan penggunaan daya angkatnya, UAV

dibedakan menjadi dua tipe yaitu *fixed wing* dan *single rotor* atau *multirotor*. Tipe *fixed wing* menggunakan sayap sedangkan tipe *single rotor* atau *multirotor* menggunakan baling-baling sebagai daya angkatnya. Permasalahan pada UAV *single rotor* adalah pada stabilitas terbangnya, di mana permasalahan tersebut merupakan masalah mendasar dalam kendaraan udara pada umumnya (Tiep dan Ryoo, 2017), seperti bergetar, tidak terkendali, dan bahkan bisa jatuh saat terbang di udara (Liu dkk, 2018). Dari hal tersebut dibutuhkan pengaturan kecepatan motor agar memberikan kestabilan yang lebih baik pada UAV. Salah satu pengujiannya yaitu dengan menggunakan perangkat *aero pendulum*.

Aero pendulum merupakan pendulum dengan baling-baling di salah satu ujungnya. Baling-baling tersebut

digerakkan oleh motor arus searah (DC) yang menghasilkan gaya dorong untuk menyesuaikan posisi pendulum sesuai dengan besar tegangan yang diberikan (Job dan Jose, 2015). Dibutuhkan suatu kendali agar dapat menyesuaikan serta dapat mengendalikan respon sistem pada perangkat *aero pendulum*. Beberapa Penelitian dan pengembangan sistem pengaturan posisi sudut *aero pendulum* ini telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai metode kendali juga telah dikembangkan, seperti kendali PID, kendali PID dengan Genetic Alghorithm, kendali *Fuzzy*, dan kendali ANFIS.

Fandik Agung Kurniawan (2020) melakukan penelitian yang berjudul "Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut *Aero pendulum* Berbasis *Fuzzy Logic Controller* dengan *Software Labview*". Dari hasil simulasi menghasilkan respon sistem yang bekerja dengan baik, di mana pada pengujian dengan *setpoint* 40° memiliki nilai parameter *peak time* 0,71 detik, *delay time* 0,32 detik, *rise time* 0,46 detik, *sattling time* 0,6 detik, dan nilai *error steady state* 0,001%.

Sebelumnya, Aris Dwi Romadhon (2019) juga melakukan penelitian tentang desain pengaturan posisi sudut pada *aero pendulum* menggunakan PID dengan *tuning* Ziegler-Nichols sebagai pengendalinya. Hasil penelitian dengan *setpoint* 45° memiliki nilai parameter *peak time* 8,264 detik, *delay time* 1,71 detik, *rise time* 5,421 detik, *sattling time* 7,403 detik, dan *error steady state* 0.017%.

Metode yang digunakan sebagai kontroler *aero pendulum* pada penelitian ini adalah *hybrid PD-Fuzzy controller*. *Hybrid PD-Fuzzy* merupakan sebuah metode pengontrol yang menggabungkan kendali *Fuzzy* dengan kontroler Proporsional-Derivatif (PD), di mana penggabungan dari dua kontroler tersebut berfungsi untuk mendapatkan keuntungan dari masing-masing kontroler sehingga menghasilkan respon sistem yang lebih baik dibandingkan dengan hanya menggunakan salah satu dari kontroler tersebut (Srivastava, 2014). Tujuan dari penelitian ini adalah merancang pengendali *hybrid PD-Fuzzy* untuk mengontrol sistem *aero pendulum* dengan menggunakan *Software Matlab*. Desain sistem kontrol pada penelitian ini diharapkan memiliki hasil yang lebih baik dengan respon sistem yang lebih cepat dari penelitian sebelumnya.

METODE

Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif yang merupakan teknik pengumpulan dan analisis data dalam bentuk angka dan sifatnya obyektif. Variabel penelitian kuantitatif dapat ditentukan serta hubungan antar variabel dapat diukur. Penelitian kuantitatif bertujuan

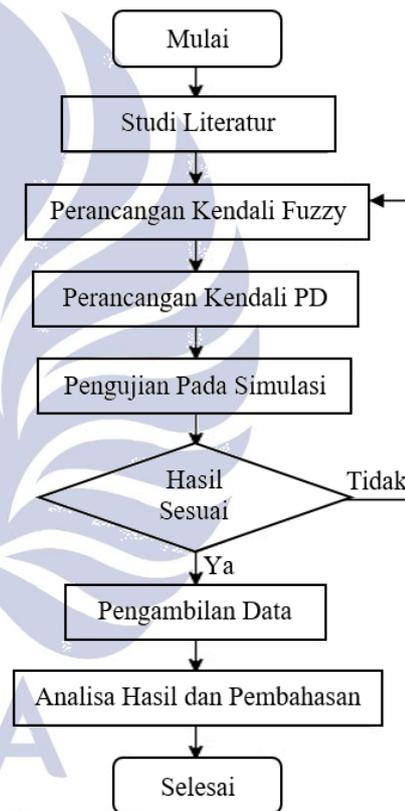
untuk merangkum hasil penelitian agar dapat digunakan untuk memprediksi kondisi yang sama pada populasi yang berbeda (Abdullah, 2015).

Instrumen Pengumpulan Data

Penulis menggunakan *software* Matlab 2018a sebagai instrumen pengumpulan data pada penelitian ini. *Software* Matlab 2018a digunakan untuk mendapatkan nilai parameter dari kendali PD, mendesain nilai parameter dari kendali *Fuzzy*, serta menampilkan nilai respon sistem pada simulasi pengaturan posisi sudut *aero pendulum*.

Rancangan Penelitian

Tahapan rancangan penelitian ini dijelaskan dalam *flowchart* pada Gambar 1.

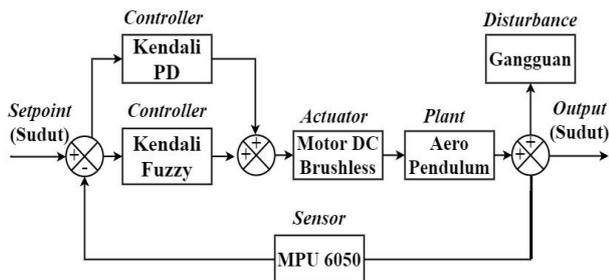


Gambar 1. Flowchart Rancangan Penelitian

Berdasarkan *flowchart* penelitian pada Gambar 1, penyusunan penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur yang diperoleh dari berbagai sumber referensi. Pada langkah selanjutnya yaitu melakukan perancangan logika *Fuzzy* dan kendali PD. Setelah mendapatkan nilai parameter dari logika *Fuzzy* dan kendali PD, maka selanjutnya melakukan pengujian pada simulasi menggunakan *software* Matlab 2018a, dan dilanjutkan dengan mengambil data dari simulasi yang sudah dilakukan. Langkah terakhir yaitu menganalisa data respon sistem dari kendali *hybrid PD-Fuzzy* pada berbagai kondisi.

Desain Sistem

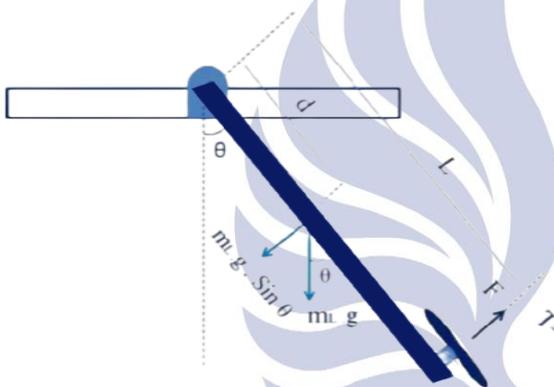
Desain sistem pada Aero pendulum menggunakan kendali hybrid PD-Fuzzy ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Blok Sistem

Model Matematika Aero pendulum

Diagram skema dari Aero pendulum ditampilkan pada Gambar 3. Di mana pendulum memiliki baling-baling di salah satu ujungnya yang digerakkan oleh sebuah motor untuk menarik pendulum.



Gambar 3. Diagram Sistematis Aero Pendulum (Sumber: Job dan Jose, 2015)

Model matematika dari Persamaan pendulum yang berlandaskan teori momentum sudut dan hukum Newton, di jelaskan dalam Persamaan berikut.

$$J \cdot \ddot{\theta} + c \cdot \dot{\theta} + m_L \cdot g \cdot d \cdot \theta = T \tag{1}$$

Dari Persamaan 1 selanjutnya di Laplace menggunakan domain (s) sehingga menghasilkan :

$$J \cdot s^2 \theta(s) + c \cdot s \theta(s) + m_L \cdot g \cdot d \theta(s) = T(s) \tag{2}$$

Dari Persamaan 2 menghasilkan fungsi alih :

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{J \cdot s^2 + c \cdot s + m_L \cdot g \cdot d} \tag{3}$$

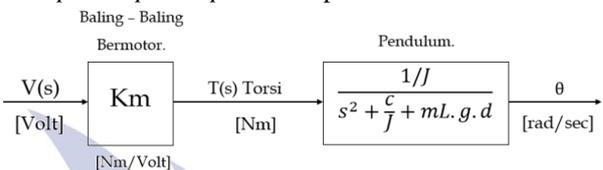
Selanjutnya, Persamaan 3 disederhanakan menjadi :

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1/J}{s^2 + \frac{c}{J} \cdot s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}} \tag{4}$$

Persamaan 4 menghasilkan Persamaan gaya dorong pada aero pendulum, tetapi Persamaan tersebut belum dapat dikatakan variabel yang dimanipulasi. Dibutuhkan Persamaan untuk menyesuaikan tegangan yang diberikan pada sistem kontrol pendulum, sehingga didapatkan persamaan berikut :

$$T(s) = K_m \cdot V(s) \tag{5}$$

Dari Persamaan 4 dan 5, dapat dituliskan diagram blok open loop aero pendulum pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Blok Aero pendulum (Sumber: Job dan Jose, 2015)

Sehingga dapat dituliskan Persamaan fungsi alih dari sistem aero pendulum sebagai berikut :

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{K_m/J}{s^2 + \frac{c}{J} \cdot s + \frac{m_L \cdot g \cdot d}{J}} \tag{6}$$

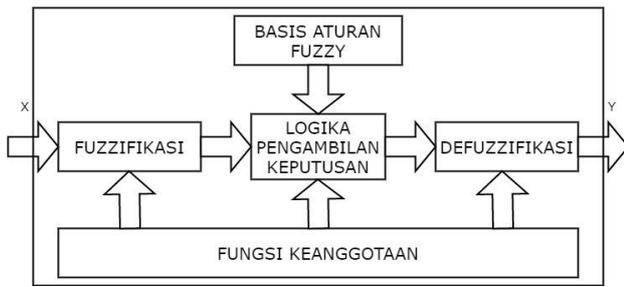
Keterangan:

- θ = Posisi sudut (derajat)
- T = Torsi yang diberikan oleh motor DC (Nm/kg)
- K_m = Parameter baling-baling motor (Nm/Volt)
- V = Tegangan yang diberikan pada motor DC (Volt)
- s = Hasil dari Laplace (domain waktu)
- J = Momen inersia (kg.m²)
- c = Koefisien redaman (kg.m²/s)
- m_L = Berat pendulum (kg)
- d = Jarak antara pusat massa ke titik gantung (m)
- g = Percepatan gravitasi (m/s²)

Kendali Fuzzy

Pada umumnya kendali logika Fuzzy terdapat 5 bagian yang diantaranya adalah:

1. fuzzifikasi berfungsi untuk mengubah nilai masukan menjadi nilai Fuzzy untuk selanjutnya dikirim ke basis aturan,
2. basis aturan fuzzy merupakan sekumpulan aturan if-then berdasarkan pengetahuan yang telah ditentukan sebelumnya,
3. defuzzifikasi berfungsi untuk mengubah nilai keluaran dari basis aturan menjadi nilai crisp.
4. Fungsi keanggotaan merupakan jenis fungsi yang digunakan dalam kontrol Fuzzy, seperti MF segitiga, MF trapesium dan lainnya,
5. Logika pengambilan keputusan digunakan untuk menentukan nilai keluaran (Hussein, 2015).



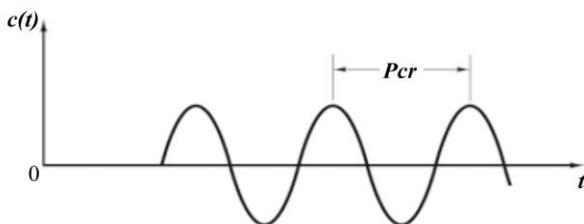
Gambar 5. Struktur Kendali Fuzzy
(Sumber: Hussein, 2015)

Kendali PD dengan Tuning Ziegler Nichols

Kendali PD merupakan gabungan dari kendali proporsional (P) dan derivatif (D). Kendali proporsional mempunyai nilai keluaran yang sama atau sebanding dengan besarnya nilai kesalahan, dengan kata lain keluaran dari kendali proporsional adalah perkalian antara nilai masukan dengan nilai konstanta proporsional (Kp) (Prayogo, 2016). Sedangkan sistem kendali derivatif merupakan hasil perkalian dari nilai konstanta derivatif (Kd) dengan selisih antara nilai error sebelumnya dengan nilai error yang terjadi pada saat diberikan nilai konstanta derivatif (Priambodo dkk, 2017).

Kendali Proporsional dan derivatif memiliki karakteristik dan keunggulannya masing-masing, di mana kendali proporsional memiliki karakteristik yaitu dapat menambah ataupun mengurangi kestabilan yang dihasilkan oleh sistem, sedangkan kendali derivatif memiliki karakteristik yaitu memberi efek redaman pada respon sistem yang tidak stabil (berosilasi) dan dapat meningkatkan pemberian nilai konstanta proporsional (Kp), selain itu kendali derivatif beraksi ketika terjadi perubahan error, sehingga kendali derivatif ini harus digunakan bersama dengan kendali proporsional (Pratama dkk, 2013).

Kendali PD dengan Tuning Ziegler-Nichols ini menggunakan Tuning metode dua. langkah pertama yang dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter dari PD yaitu menggunakan kontroler proporsional (Kp) pada sistem loop tertutup pada plant, pemberian nilai Kp dimulai dari angka 0 hingga nilai kritis (Kcr) di mana hasil repon sistem pertama menunjukkan osilasi yang berkelanjutan. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. (Ogata, 1985).

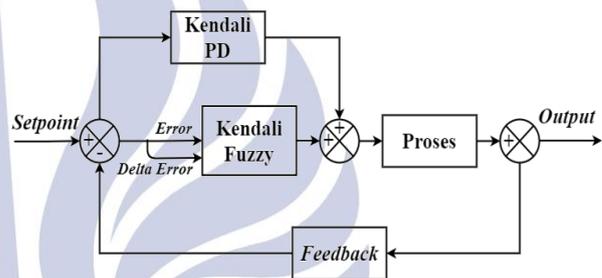


Gambar 6. Osilasi Berkelanjutan
(Sumber: Ogata, 1985)

Pada Tuning Ziegler-Nichols ini nilai parameter konstanta proporsional (Kp) dan konstanta derivatif (Kd) disesuaikan dengan rumus yaitu : $K_p = 0,6 K_{cr}$ dan $T_d = K_p/K_d = 0,125 P_{cr}$. Di mana T_i merupakan waktu parameter derivatif dan P_{cr} merupakan waktu kritis.

Kendali Hybrid PD-Fuzzy

Hybrid merupakan sebuah konsep mengkombinasikan antara dua bagian yang berbeda menjadi satu kesatuan (Purnama, 2016). Hybrid PD-Fuzzy adalah sebuah metode kendali yang menggabungkan kendali Fuzzy dengan kendali proporsional (P) dan derivatif (D). Penggabungan dari dua kendali tersebut dibutuhkan untuk mendapatkan keutungan dari kedua kendali sehingga menghasilkan respon sistem yang lebih baik dibandingkan dengan hanya meggunakan salah satu dari kendali tersebut (Srivastava, 2014).



Gambar 7. Struktur Kendali Hybrid PD-Fuzzy
(Sumber: Salim dan Pambudi, 2015)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini spesifikasi sistem pada *aero pendulum* akan dijelaskan beserta hasil pengujian. Hasil pengujian dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab 2018a.

Permodelan Sistem Aero pendulum

Untuk mendapatkan nilai fungsi alih dari pemodelan sistem, maka dibutuhkan nilai yang didapat dari spesifikasi *hardware* yang digunakan pada *aero pendulum*. Penulis mendapatkan nilai spesifikasi tersebut dari penelitian sebelumnya (Romadhon, 2019).

Tabel 1. Spesifikasi Hardware Aero pendulum

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Massa	m	0,32	Kg
2	Panjang Lengan	L	0,4	m
3	Koefisien Redaman	c	0,0001	Kg.m ² /s
4	Momen Inersia	J	0,0512	Kg.m ²
5	Panjang Pusat Massa	d	0,2	m
6	Percepatan Gravitasi	g	9,8	m/s ²

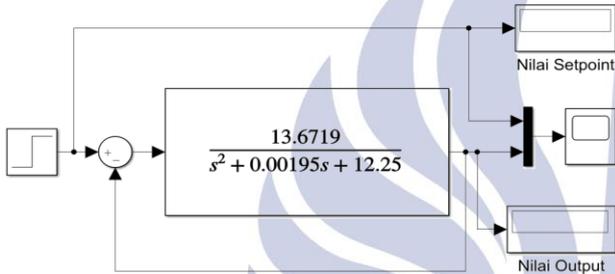
Pada Tabel 1. Ditampilkan spesifikasi dari *hardware aero pendulum* yang digunakan untuk menghitung fungsi alih sistem, yaitu dengan cara memasukkan nilai tersebut kedalam fungsi alih yang telah didapatkan pada Persamaan 6. Sehingga dapat ditulis fungsi alih sistem *aero pendulum*:

$$G(s) = \frac{13,6719}{s^2 + 0,00195s + 12,25} \quad (7)$$

Keterangan: G(s) = Fungsi alih sistem.

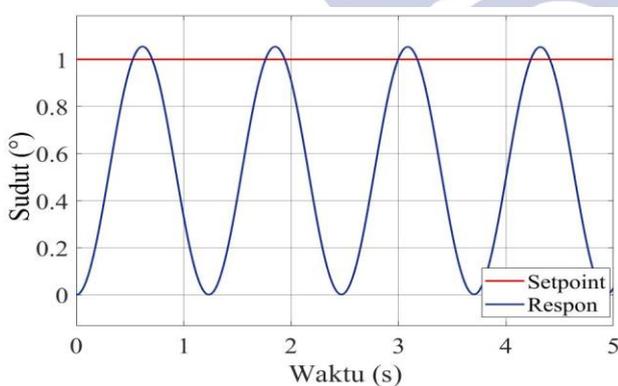
Diagram Blok dan Simulasi Sistem tanpa Kendali

Perancangan diagram blok dan simulasi sistem dilakukan menggunakan simulink pada Matlab 2018a. Pada bagian ini dilakukan pengujian sistem *aero pendulum* tanpa kendali menggunakan fungsi alih dari model matematika yang telah diperoleh pada Persamaan (7).



Gambar 8. Diagram Blok Sistem tanpa Kendali

Gambar 8. Menampilkan diagram blok sistem *close loop* tanpa kendali menggunakan simulink pada *software* Matlab 2018a dan grafik respon sistem tanpa menggunakan kendali ditampilkan pada Gambar 9.



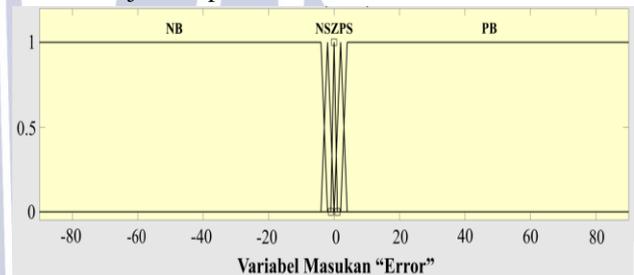
Gambar 9. Grafik Respon Sistem tanpa Kendali

Grafik respon tanpa menggunakan kendali pada sistem *aero pendulum* menunjukkan osilasi yang terus menerus dan cukup besar sehingga tidak dapat menjaga posisinya dalam keadaan stabil, selain itu respon yang dihasilkan tidak mengikuti *setpoint* yang ditentukan. Maka diperlukan sebuah kontroler pada *aero pendulum* untuk mencapai *setpoint* yang ditentukan dengan respon sistem yang stabil.

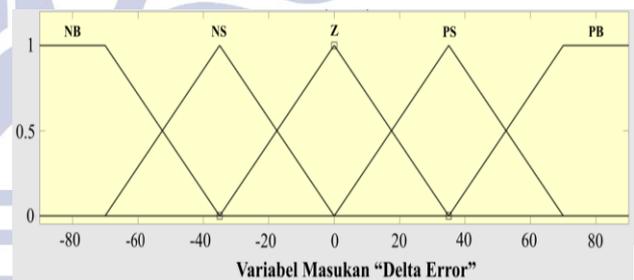
Perancangan Sistem Kendali

Kendali logika *Fuzzy* dirancang terlebih dahulu pada perancangan sistem kendali *hybrid Pd-Fuzzy* dalam penelitian ini. Dalam merancang pengendali logika *Fuzzy* dibutuhkan parameter nilai masukan dan keluaran sistem. Pada penelitian ini penulis menggunakan 2 Masukan pada logika *Fuzzy* berupa *error* dan *delta error*. *Error* yaitu selisih nilai masukan dengan nilai aktual, yang merupakan nilai pembacaan sudut oleh sensor, sedangkan *delta error* merupakan nilai selisih perubahan *error*.

Fungsi keanggotaan pada masukan *Fuzzy error* dan *delta error* terbagi menjadi 5 himpunan *Fuzzy* yang mana direpresentasikan menggunakan kurva segitiga dan trapesium. Untuk himpunan masukan *Fuzzy error* dan *delta error* berupa *Negative Big (NB)*, *Negative Small (NS)*, *Zero (Z)*, *Positive Small (PS)* dan *Positif Big (PB)*. Nilai fungsi keanggotaan yang digunakan dalam merancang himpunan masukan *error* ditunjukkan pada Gambar 10 dan *delta error* ditunjukkan pada Gambar 11.

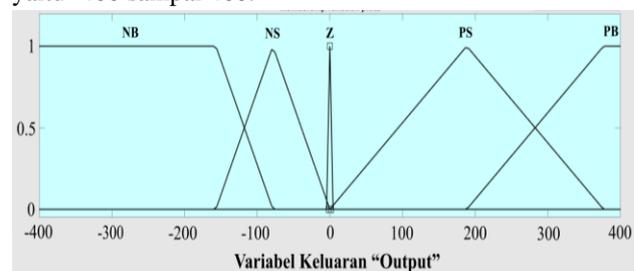


Gambar 10. Fungsi Keanggotaan Masukan *Error*



Gambar 11. Fungsi Keanggotaan Masukan *Delta Error*

Fungsi keanggotaan keluaran ditunjukkan pada Gambar 12. Nilai rentang keluaran pada sistem *aero pendulum* adalah nilai *pwm* yang digunakan untuk menggerakkan motor DC dengan nilai semesta pembicaran yaitu -400 sampai 400.



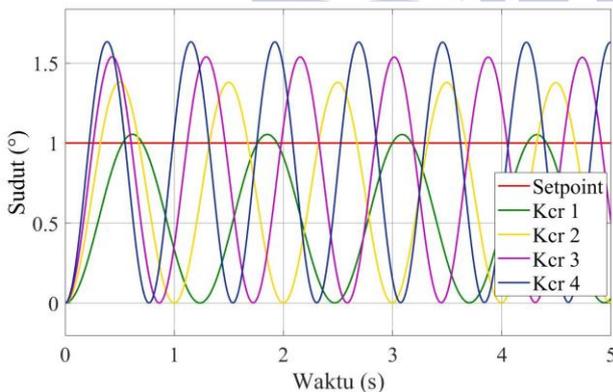
Gambar 12. Fungsi Keanggotaan Keluaran

Fuzzy Inference System menggunakan metode mamdani dengan basis aturan *IF-THAN*. Terdapat 25 aturan Fuzzy yang dirancang untuk diterapkan pada tahap *interface* yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Basis aturan Fuzzy

OUTPUT	DELTA ERROR				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	Z
NS	NB	NB	NS	Z	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	Z	PS	PB	PB
PB	Z	PS	PB	PB	PB

Selanjutnya kontroler PD dirancang dengan menggunakan *tuning* Ziegler-Nichols metode dua. Langkah pertama yang dilakukan yaitu dengan memberi nilai Kcr pada sistem dengan transfer function yang telah diketahui hingga nilai ouput pada respon sistem menunjukkan osilasi yang berkelanjutan (Romadhon, 2019). Berikut merupakan hasil respon sistem dari *tuning* Kcr 1, Kcr 2, Kcr 3, dan Kcr 4 dengan *setpoint* 1 yang ditunjukkan pada Gambar 13.



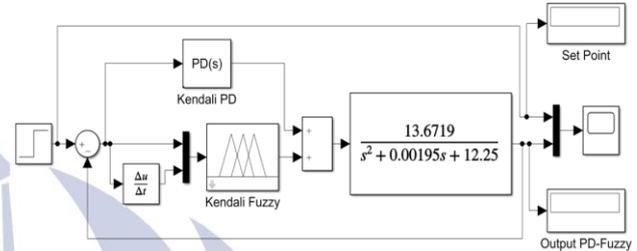
Gambar 13. Respon Sistem dengan Nilai KCR

Dari respon tersebut didapatkan nilai KCR=4 yang digunakan untuk mendapatkan nilai Kp (konstanta proporsional) dan Td (*Derivative Time*) dengan menggunakan rumus Ziegler-Nichols metode dua. Sehingga dari rumus tersebut dapat dihitung dan didapatkan nilai kontroler PD yaitu Kp= 2,4 dan Kd=1,16.

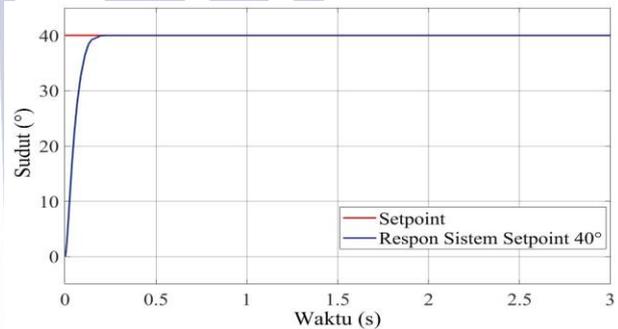
Setelah didapatkan nilai untuk parameter PD dengan menggunakan *tuning* Ziegler-Nichols metode dua dan pengendali Fuzzy dengan metode mamdani maka langkah selanjutnya yaitu dengan menggabungkan kedua kontroler tersebut ke dalam sistem agar dapat mengatur kecepatan putaran motor DC sehingga menghasilkan respon sistem sesuai dengan *setpoint* yang ditentukan.

Pengujian dengan Setpoint Tetap

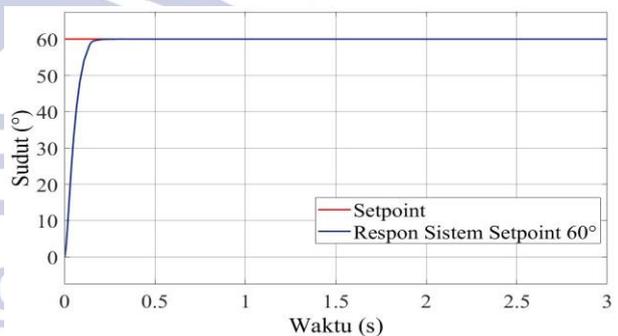
Pada pengujian dengan *setpoint* tetap, terdapat tiga kali pengujian dengan masing-masing nilai *setpoint* yaitu: 40°, 60°, dan 90° dengan waktu pengujian selama 3 detik. Gambar 14 menunjukkan blok diagram sistem *hybrid PD-Fuzzy controller* pada *aero pendulum* dan grafik respon dari *hybrid PD-Fuzzy controller* dengan masing-masing *setpoint* 40°, 60°, dan 90° dapat dilihat pada Gambar 15, Gambar 16, dan Gambar 17.



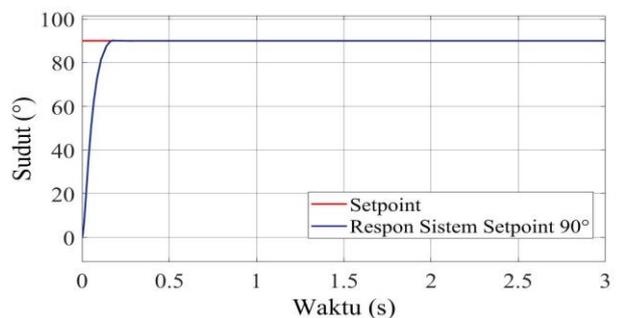
Gambar 14. Diagram Blok Sistem Hybrid PD-Fuzzy Controller



Gambar 15. Grafik Respon Sistem dengan Setpoint 40°



Gambar 16. Grafik Respon Sistem dengan Setpoint 60°



Gambar 17. Grafik Respon Sistem dengan Setpoint 90°

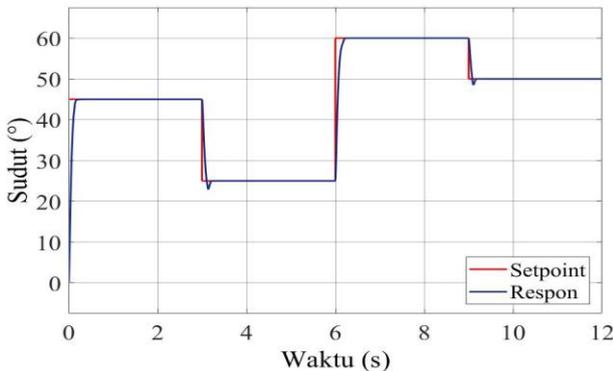
Dari hasil Simulasi menggunakan *hybrid PD-Fuzzy controller*, menunjukkan bahwa respon sistem dapat dengan cepat mengikuti nilai *setpoint* yang diberikan dan respon sistem yang lebih stabil dibandingkan dengan respon sistem tanpa menggunakan kontroler. Dari hasil pengujian, data menunjukkan bahwa respon sistem memiliki nilai *rise time* yang cepat dengan *overshoot* dan nilai *error* yang kecil, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik Hasil Respon *Hybrid PD-Fuzzy Controller*

Parameter	Setpoint			Satuan
	40°	60°	90°	
Rise time (Tr)	0.09	0.09	0.09	Detik
Settling time (Ts)	0.15	0.15	0.15	Detik
Peak time (Tp)	0.25	0.32	0.18	Detik
Overshoot maximum (Mp)	0.003	0.003	0.28	%
Error steady state (Ess)	0.032	0.004	0.02	%

Pengujian dengan Perubahan Setpoint

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan cara merubah nilai *setpoint* pada simulasi sistem. Pengujian ini ditujukan untuk mengetahui respon sistem pada *hybrid PD-Fuzzy controller* mampu untuk mengikuti perubahan *setpoint* yang diberikan. Hasil pengujian ditunjukkan pada gambar 18. Dengan melakukan perubahan *setpoint* yang dimulai dari sudut 45°, 25°, 60°, dan 50° dengan waktu simulasi selama 12 detik.

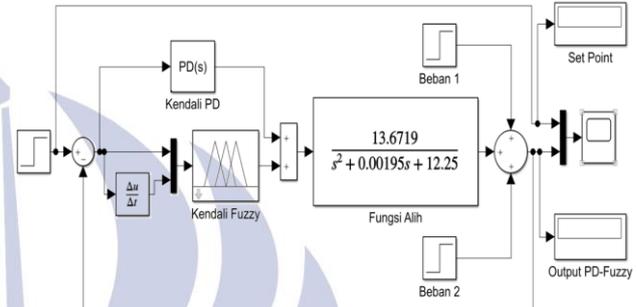


Gambar 18. Respon Sistem dengan Perubahan *Setpoint*

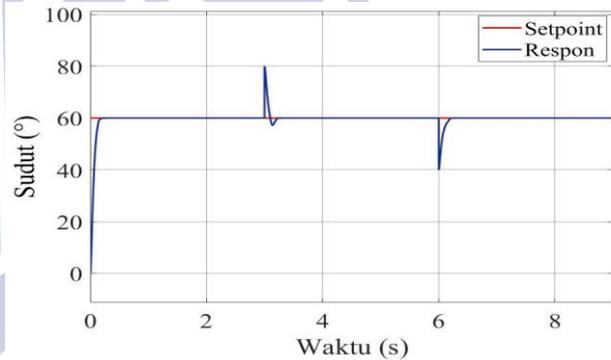
Hasil pengujian dengan melakukan perubahan *setpoint* yang ditampilkan pada Gambar 18. Menunjukkan bahwa respon sistem pada saat *setpoint* dinaikkan mengikuti nilai dari *setpoint* yang ditentukan dengan baik, dan pada saat nilai *setpoint* diturunkan maka respon sistem dapat mengikuti penurunan *setpoint* dengan cepat tetapi memiliki nilai *overshoot* yang lebih besar.

Pengujian dengan Beban

Pada pengujian berikutnya yaitu dengan memberikan penambahan beban pada sistem yang telah diberikan kontroler dengan cara memberikan sinyal *step* pada rangkaian simulasi. Pengujian ini dilakukan dengan waktu selama 9 detik menggunakan *setpoint* 60°. Diberikan 2 buah sinyal *step* sebagai beban pada sistem dengan nilai masing-masing sinyal yaitu 20° pada detik ke-3 dan -20° pada detik ke-6. Gambar 19 merupakan rangkaian kontroler *hybrid Fuzzy-PD* dengan beban.



Gambar 19. Diagram Blok Sistem dengan Beban



Gambar 20. Grafik Respon Sistem dengan Beban

Hasil pengujian sistem *aero pendulum* dengan beban memiliki nilai *error steady state* sebesar 0,004%. Hal ini menunjukkan bahwa *hybrid PD-Fuzzy controller* dapat menyeimbangkan posisinya dengan baik dan cepat ketika terdapat gangguan berupa sinyal beban pada sistem.

Perbandingan Respon Sistem pada Beberapa Kendali

Perbandingan hasil respon sistem pada beberapa kendali dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan pada penelitian ini. Data perbandingan yang digunakan diperoleh dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya oleh: Aris Dwi Romadhon (2019) dengan menggunakan kendali PID Ziegler-Nichols, Muhammad Eko Prasetyo (2020) dengan menggunakan kendali PID *Genetic Algorithm*, Fandik Agung Kurniawan (2020) dengan menggunakan kendali *Fuzzy*, dan Mochamad Masnur Khoirudin (2020) dengan menggunakan kendali ANFIS.

Tabel 4. Perbandingan Respon Sistem pada Beberapa Kendali dengan *Setpoint* 60°

Kendali	Tr(s)	Ts(s)	Tp(s)	Mp%	Ess%
PID ZN	4,99	6,81	7,81	3,27	0,196
PID GA	4,26	7,46	5,24	8,33	0,031
Fuzzy	0,7	0,87	-	-	0,057
ANFIS	0,46	1,31	0,94	1,63	-
Hybrid PD-Fuzzy	0,09	0,15	0,32	0,003	0,004

Perbandingan antara kendali *hybrid PD-Fuzzy* dengan kendali yang digunakan pada penelitian sebelumnya dilakukan dengan mengambil *sample* pengujian pada *setpoint* 60°. Berdasarkan data dari Tabel 4. Dapat diketahui bahwa kendali *hybrid PD-Fuzzy* memiliki respon yang lebih baik dibandingkan dengan beberapa kendali sebelumnya dengan catatan waktu Tr, Ts, dan Tp yang lebih cepat, serta nilai Mp dan Ess yang lebih kecil.

PENUTUP

Simpulan

Desain sistem pengaturan posisi sudut *aero pendulum* menggunakan *hybrid PD-Fuzzy controller* ini dapat bekerja dengan baik. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan pada *software* Matlab, sistem dengan kontroler *hybrid PD-Fuzzy* dapat menuju *setpoint* yang ditentukan dan dapat menyeimbangkan posisinya pada saat diberikan gangguan sehingga dapat kembali menuju *setpoint* dengan cepat.

Kontroler *hybrid PD-Fuzzy* pada saat diberikan *setpoint* 60° menghasilkan respon sistem yang lebih baik dibandingkan saat diberikan nilai *setpoint* 40° dan 90°, dengan karakteristik respon sistem yaitu: *Rise time* (Tr) = 0.09 s, *Settling time* (Ts) = 0.15 s, *Peak time* (Tp) = 0.32 s, *Overshoot maximum* (Mp) = 0.003%, dan *Error steady state* (Ess) = 0.004%.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, Adapun saran yang diberikan penulis untuk pengembangan pada penelitian sistem pengaturan posisi sudut *Aero pendulum* selanjutnya, yaitu dengan menggunakan kontroler yang lebih adaptif seperti *hybrid ANFIS-PD* sehingga sistem dapat menyesuaikan *setpoint* dengan lebih baik dan cepat ketika terjadi perubahan kondisi ataupun saat diberikan gangguan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Ma"ruf. 2015. *Metode Penelitian Kuantitatif*. Sleman Yogyakarta: Aswaja Pressindo.
- Hussein. 2015. *Scholarworks At Wmu Hybrid Fuzzy-Pid Controller For Buck-Boost Converter In Solar Energy-Battery Systems*. Western Michigan University.
- Job, Mila Mary dan Jose, Subha Hency. 2015. *Modeling and control of mechatronic aeropendulum*. IEEE Sponsored 2nd International Conference on Innovations in Information Embedded and Communication Systems (CII ECS'15), 3–7.
- Khoirudin, Mochamad Masnur. 2020. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Menggunakan Pengendali Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. Jurnal Teknik Elektro, 09(03), 587-595.
- Kurniawan, Fandik Agung. 2020. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero pendulum Berbasis Fuzzy Logic Controller Dengan Software Labview*. Jurnal Teknik Elektro, 09(03), 625-632.
- Liu, Yunping., Huang, Xijie., Zhang, Yonghong., dan Zhou, Yukang. 2018. *Dynamic stability and control of a manipulating unmanned aerial vehicle*. International Journal of Aerospace Engineering.
- Ogata, Katsuhiko. 1985. *Teknik Kontrol Automatik jilid 1*. Terjemahan Edi Laksono. Jakarta: Erlangga.
- Prasetyo, Muhammad Eko. 2020. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Berbasis PID Metode Genetic Alghorithm Optimization dengan Software LabVIEW*. Jurnal Teknik Elektro, 09(03), 597-604.
- Pratama, I Putu Aditama., Suweden, I Nengah., dan Swamardika, Alit. 2013. *Sistem Kontrol Pergerakan Pada Robot Line Follower Berbasis Hybrid PID-Fuzzy Logic*. Bali: Prosiding Conference on Smart-Green Technology in Electrical and Information Systems.
- Prayogo, Rheco Ari. 2016. *Perancangan Sistem Kendali Gerak Lateral Way-To-Way Point Uav Quadcopter Menggunakan Kontroler Pid Fuzzy*. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri ITS.
- Priambodo, Ardi Seto., Cahyadi, Imam Adha., dan Herdjunanto, Samiadji. 2017. *Perancangan Sistem Kendali PD untuk Kestabilan Terbang Melayang UAV Quadcopter*. Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada.
- Purnama, Aditya Chandra. 2016. *Pengendalian Tegangan Output Generator DC Penguat Terpisah Menggunakan Kontrol Hybrid PID-Fuzzy Berbasis Arduino Uno R3*. Digital Repository Universitas Jember.

- Romadhon, Aris Dwi. 2019. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero pendulum Menggunakan Pengendali Pid Berbasis Labview*. Jurnal Teknik Elektro, 08(03), 637-645.
- Salim, Agus dan Pambudi, Wahyu Setyo. 2015. *Implementasi Metode Hybrid Artificial Neural Network (Ann) – Pid Untuk Perbaikan Proses Berjalan Pada Prototype Robot Material Handling*. Jurnal Ilmiah Mikrotek, 1(3), 155–164.
- Srivastava, Priyanka. 2014. *Hybrid Fuzzy-Pid Controller In Buck-Boost Converter*. International Journal of Advanced Engineering Research and Technology (IJAERT), 41–44.
- Tiep, Do Khac dan Ryoo, Young Jae. 2017. *An Autonomous Control Of Fuzzy-Pd Controller For Quadcopter*. International Journal Of Fuzzy Logic And Intelligent Systems, 17(2), 107–113.

