

## RANCANG SISTEM PENGENDALIAN *SELF BALANCING PLANT* MENGGUNAKAN *DUAL MOTOR PROPELLER* BERBASIS *ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM*

**Aida Azka**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail: aida.17050874005@mhs.unesa.ac.id

**Muhamad Syariffuddien Zuhrie, I Gusti Putu Asto Buditjahjanto, Lilik Anifah**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya  
e-mail: zuhrie@unesa.ac.id, asto@unesa.ac.id, lilikanifah@unesa.ac.id

### Abstrak

Pesawat tanpa awak atau UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) telah berkembang dengan pesat di berbagai bidang. Sistem tak berawak adalah platform otonom yang dapat dengan mudah diprogram untuk menjalankan misi dengan atau tanpa campur tangan pilot. Salah satu jenis UAV berdasarkan penggerakannya yang digunakan dalam penelitian ini adalah UAV *multirotor* di mana sistem penggerak terdiri dari dua buah motor beserta *propeller* yang biasa disebut dengan *dual motors* atau *twin rotors*. Sehubungan dengan ketahanan mekanik dan bahan bakar, kemampuan melayang, dan kegunaannya yang dapat digunakan di dalam ruangan maka UAV jenis ini memiliki peranan yang cukup penting dalam penelitian stabilisasi UAV apabila terdapat beban berlebih, untuk menghindari kecelakaan di udara maupun untuk mencapai tingkat presisi dan akurasi posisi UAV dengan tepat. Pengontrolan stabilisasi dual motor diterapkan dalam kajian penelitian ini dengan mengontrol kecepatan *brushless DC* motor agar dapat menyetimbangkan posisi UAV itu sendiri. Metode yang diterapkan adalah metode simulasi *plant* dengan data sekunder sebagai acuan pengaturan parameter komponen menggunakan aplikasi Matlab 2018a. Pengujian *plant* secara simulasi menghasilkan nilai ANFIS yang cukup baik dengan nilai waktu naik ( $t_r$ ) = 4.145 s, waktu tunak ( $t_s$ ) = 7.5439 s, simpangan maksimum ( $M_p$ ) = 0.489 %, dan  $Ess = 0.000741$  %.

**Kata Kunci:** ANFIS, *dual motor*, *self balancing*.

### Abstract

Unmanned aircraft or UAV has developed rapidly in various fields. The unmanned system is an autonomous platform that can be easily programmed to carry out missions with or without pilot intervention. One type of UAV based on its propulsion used in this study is a *multirotor* UAV in which the drive system consists of two motors and propellers which are commonly referred to as *dual motors* or *twin rotors*. In connection with mechanical and fuel resistance, levitation capability, and its usefulness that can be used indoors, this type of UAV has an important role in UAV stabilization research when there is an overload, to avoid accidents in the air and to achieve a level of precision and position accuracy. UAV with precision. Dual motor stabilization control is applied in this research study by controlling the brushless DC motor speed in order to balance the position of the UAV itself. The method applied is the plant simulation method with secondary data as a reference for setting component parameters using the Matlab 2018a application. The simulation of plant testing resulted in a fairly good ANFIS value with an increase in time value ( $t_r$ ) = 4.145 s, steady time ( $t_s$ ) = 7.5439 s, maximum peak ( $M_p$ ) = 0.489%, and  $Ess = 0.000741$ %.

**Keywords:** ANFIS, *dual motor*, *self balancing*.

### PENDAHULUAN

Baru-baru ini, minat terhadap pesawat tanpa awak atau yang umumnya disebut dengan UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) semakin meningkat secara signifikan (Tiwari, 2017). Meningkatnya minat terhadap UAV telah berkembang dengan pesat dalam bidang militer, industri, maupun sipil (Poksawat *et al.*, 2017; Singandhupe *et al.*, 2018). Misalnya, pengawasan, lokalisasi, dan pemetaan di area yang sulit dijangkau atau berisiko tinggi maupun penyemprotan pestisida/air, pengiriman logistik, dan jurnalistik untuk efisiensi pekerjaan manusia sehari-hari (Wang *et al.*, 2020). Fungsi pesawat tanpa awak yang dapat menggantikan pilot manusia terbilang lebih murah

dari segi bahan baku dan bahan bakar, mudah dibuat, serta mudah dioperasikan oleh semua kalangan (Betran and Sanchez-Cerda, 2016; Gemilang, 2016). Sistem tak berawak adalah *platform* otonom yang dapat dengan mudah diprogram untuk menjalankan misi dengan atau tanpa campur tangan pilot (Hidayat dan Mardiyanto, 2016; Koubaa *et al.*, 2019). UAV diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama yaitu *Fixed Wing* UAV, *Vertical Take-Off and Landing* (VTOL) UAV, dan *Hybrid* UAV (Nam *et al.*, 2020). Salah satu jenis UAV berdasarkan penggerakannya yang digunakan dalam penelitian ini adalah UAV *multirotor* di mana sistem penggerak terdiri dari dua buah motor beserta baling-baling atau *propeller* yang biasa disebut dengan *dual*

*motors* atau *twin rotors* (Abdelmaksoud *et al.*, 2020; Agarwal *et al.*, 2013).

Sehubungan dengan ketahanan mekanik dan bahan bakar, kemampuan melayang, dan kegunaannya yang dapat digunakan di dalam ruangan maka UAV *multirotor* memiliki peranan yang cukup penting dalam penelitian stabilisasi UAV apabila terdapat beban berlebih, untuk menghindari kecelakaan di udara maupun untuk mencapai tingkat presisi dan akurasi posisi UAV dengan tepat (Franchi *and* Mallet, 2017). Pengontrolan stabilisasi *dual motor* diterapkan dengan mengontrol kecepatan brushless DC motor yang bersifat nonlinear (Zhao *and* Yu, 2014). Dibantu dengan Arduino sebagai mikrokontroler dan MPU6050 sebagai sensor untuk mengukur sudut kemiringan yang diakibatkan adanya beban berlebih saat mengudara maupun meminimalisir *error* yang cukup besar (Haratiannejadi *and* Selmic, 2020; Putra, 2019). Sebelumnya, penelitian pada *dual motor* telah dilakukan menggunakan metode *fuzzy logic controller*, dimana metode tersebut memiliki keunggulan dalam pengerjaan yang lebih sederhana dibandingkan dengan metode lainnya (Hosseializade *et al.*, 2016; Qonitah dan Sutijo, 2012). Oleh karena itu, peneliti hendak meninjau hasil pengontrolan stabilisasi *dual motor* menggunakan metode *fuzzy logic controller* atau *fuzzy inference system* (FIS) dengan *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) (Fajriani dkk, 2018; Fatkhurrozi dkk, 2012; Jagtap, 2014; Khoirudin, 2020; Sahin *et al.*, 2020; Sarhan *and* Hafez, 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil respon sistem *self balancing plant* menggunakan *dual motor propeller* berbasis ANFIS secara simulasi dengan pemodelan dan analisis data berdasarkan *fuzzy logic controller* yang telah diketahui dalam penelitian sebelumnya (Setiyawan dan Zuhrie, 2019).

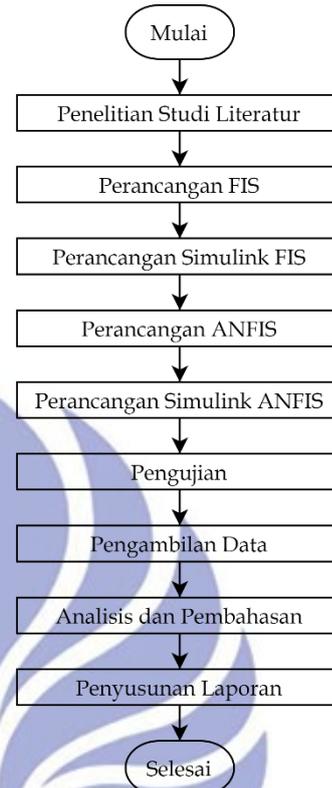
## METODE

### Pendekatan Penelitian

Pendekatan yang diterapkan pada penelitian ini adalah metode penelitian kuantitatif. Berdasarkan pemaparan Kasiram (2008:149), penelitian kuantitatif didefinisikan sebagai suatu proses menemukan pengetahuan yang menggunakan data berupa angka sebagai alat menganalisis keterangan mengenai apa yang hendak diketahui (Setiyawan dan Zuhrie, 2019). Guna memenuhi tujuan dari pada penelitian ini, penulis menggunakan aplikasi Matlab 2018a yang telah tersedia pada laptop penulis untuk menjalankan simulasi kendali ANFIS yang diterapkan pada *plant*.

## Rancangan Penelitian

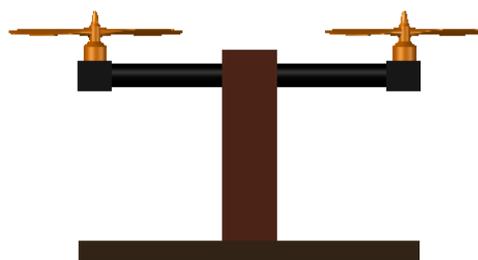
Susunan rancangan penelitian *self balancing dual motor propeller* dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian *Self Balancing Dual Motor Propeller*

## Desain Plant

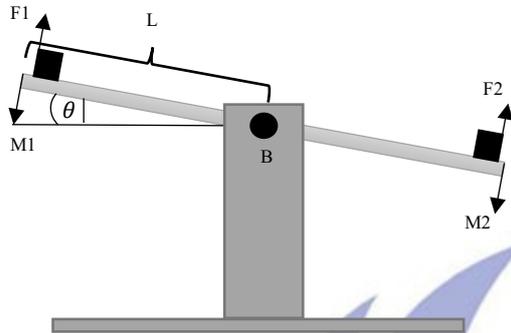
UAV *dual motor propeller* adalah jenis UAV *multirotor* di mana sistem penggerak terdiri dari dua buah motor beserta baling-baling atau *propeller* yang ditunjukkan pada Gambar 2. Baling-baling berputar dalam arah yang berlawanan dengan memantau derajat kemiringan jungkat-jungkit sebagai tanda kesetimbangan. Kecepatan motor dapat mempengaruhi posisi kesetimbangan jungkat-jungkit. Sehingga sistem ini digerakkan dengan sangat dinamis dan tidak stabil (Setiyawan dan Zuhrie, 2019). Oleh karena itu, untuk menciptakan posisi jungkat-jungkit menjadi *balance* maka sistem harus seminimum mungkin untuk menimbulkan gerakan yang besar untuk gerakan vertikal *dual motor propeller*.



Gambar 2. Dual Motor Propeller  
(Sumber : Agarwal dkk, 2013)

### Model Plant

Metode Newton adalah salah satu metode dalam pemodelan sistem *plant* ini. Berdasarkan metode ini, dapat ditulis persamaan gaya dan torsi yang diterapkan dalam sistem. Di mana sistem dilihat sebagai benda tegar dengan distribusi massa seragam.



Gambar 3. Skema Gaya *Plant*  
(Sumber : Hosseializade, 2016)

Berdasarkan sumber studi literatur, diasumsikan bahwa massa total balok terpusat di masing-masing sisi balok M1 dan M2. M1 dan M2 berupa total massa motor dan massa balok yang terpusat di masing-masing sisi. B, j, dan L adalah koefisien redaman, momen inersia dan setengah Panjang balok (Setiyawan dan Zuhrie, 2019). Di lihat dari Gambar 3 maka dapat ditulis persamaan sebagai berikut.

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

Persamaan linier dari sistem menggunakan 2 variabel keadaan sebagai berikut :

$$x_1 = \theta \quad (2)$$

$$x_2 = \omega = \dot{\theta} \quad (3)$$

Keterangan :

$\theta$  = Sudut terbentuk dari kemiringan lengan (rad)

$\dot{\theta}$  = Kecepatan perubahan sudut dari kemiringan (rad/s)

Pada Gambar 3 adalah skema gaya pada sistem, berdasarkan prinsip jungkat-jungkit kemudian didapat persamaan sistem nonliniernya sebagai berikut.

$$\dot{x} = x_2 = f_1(t) \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{\theta} = \frac{1}{j}(F_1L - F_2L - m_1Lg\cos\theta + m_2Lg\cos\theta - B\dot{\theta}) = f_2(t) \quad (5)$$

Selanjutnya, persamaan 3 dilinierkan dengan metode jacobian seperti pada persamaan 4 :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \end{bmatrix} = J_x(0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{Lg\sin(\theta)(m_1-m_2)}{j} & \frac{-B}{j} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial F} \\ \frac{\partial f_2}{\partial F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{L}{j} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Sehingga, dari transfer fungsi di atas didapatkan

$$G(s) = \frac{L}{Js^2 + Bs} = \frac{\frac{L}{j}}{s^2 + \frac{Bs}{j}} \quad (9)$$

Agar mendapatkan respon sistem dari *plant* tanpa melakukan uji alat maka diperlukan identifikasi *plant* guna mencari fungsi alih menggunakan pemodelan sistem dengan meninjau nilai berdasarkan parameter fisik *plant* (Ogata, 2010). Diketahui parameter fisik berdasarkan hukum Newton dengan menggunakan persamaan gaya beserta torsi yang diterapkan dalam sistem yang ditunjukkan pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Parameter Desain Fisik *Plant*

Parameter	Simbol	Nilai
Koefisien Redaman	B	1
Momen Inersia	J	0.33
Panjang Lengan	L	31.5

(Sumber : Setiyawan dan Zuhrie, 2019)

Oleh karena itu didapatkan fungsi ahli dari sistem sebagai berikut.

$$G(s) = \frac{\frac{L}{j}}{s^2 + \frac{Bs}{j}} = \frac{\frac{31.5}{0.33}}{s^2 + \frac{1s}{0.33}} = \frac{9.5}{s^2 + 3.0303s} \quad (10)$$

Keterangan :

$j$  = Momen inersia turunan kecepatan (kg/m<sup>2</sup>)

$T$  = Gaya dorong yang disediakan oleh motor brushless DC (N)

$F_1$  = Gaya angkat (thrust) pada motor 1 (N)

$F_2$  = Gaya angkat (thrust) pada motor 2 (N)

$L$  = Jarak titik pusat lengan ke ujung lengan (cm)

$\theta$  = Sudut kemiringan lengan (rad)

$\dot{\theta}$  = Perubahan sudut dari kemiringan (rad/s)

$g$  = Gaya gravitasi bumi (m/s<sup>2</sup>)

$M_1$  = Massa benda kiri (kg)

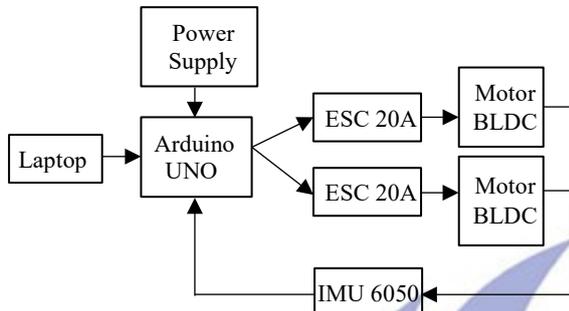
$M_2$  = Massa benda kanan (kg)

$B$  = Koefisien redaman (Ns/m)

### Desain Sistem

*Toolbox* ANFIS dari aplikasi Matlab pada laptop penulis akan digunakan untuk proses prediksi *self balancing controller* berdasarkan referensi data FIS penelitian ini. Nilai masukan sistem dimisalkan posisi sudut jungkat-jungkit. Nilai keluaran kontroler berupa tegangan yang

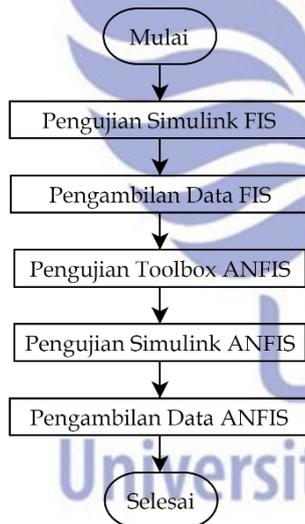
akan masuk ke ESC 20 Ampere yang dikonversi menjadi nilai PWM untuk mengatur kecepatan motor BLDC. Senso MPU-6050 digunakan untuk mengukur nilai dari derajat kemiringan jungkat-jungkit atau *plant* akibat adanya beban berlebih sebagai nilai umpan balik dari nilai pembacaan sudut.



Gambar 4. Desain Sistem *Self Balancing Dual Motor Propeller*  
(Sumber : Setiyawan dan Zuhrie, 2019)

**Pengambilan Data**

Pengambilan beberapa data akan dilakukan menggunakan aplikasi Matlab 2018a yang telah tersedia pada laptop penulis. Matlab tersebut digunakan untuk menjalankan atau mensimulasikan dan mengamati respon hasil dari sistem *self balancing* penelitian ini.

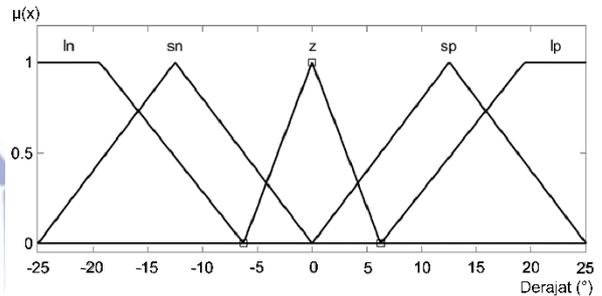


Gambar 5. Diagram Alir Proses Pengambilan Data

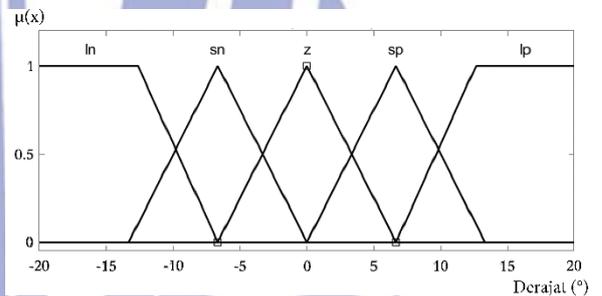
**Kontroler Fis**

Sebelum melangkah dalam penggunaan ANFIS, dibutuhkan kontroler FIS atau *fuzzy inference system* sebagai acuan dalam kontroler ANFIS. Keunggulan *fuzzy logic* dibandingkan dengan metode lainnya adalah pengerjaannya lebih sederhana dan mudah (Qonitah dan Sutijo, 2012). Penelitian ini menggunakan satu *output* serta dua *input fuzzy logic* berupa *error* dan *delta error* dengan metode Mamdani. Perbedaan nilai *output* dengan nilai pembacaan sudut adalah *error*, sedangkan

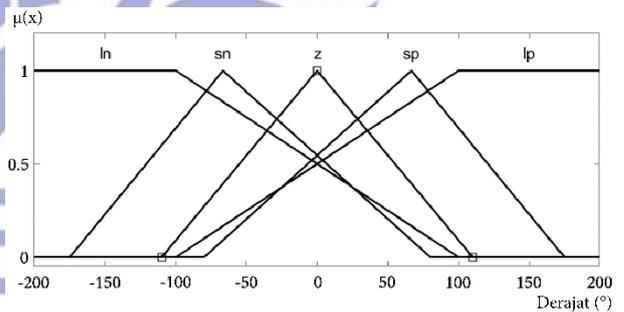
perbedaan nilai *error* dengan nilai *error'* adalah *delta error* (Jagtap, 2014). Masing-masing fungsi keanggotaan terdiri dari lima himpunan dengan kurva segitiga dan trapesium. Himpunan tersebut terdiri dari *long negative* (ln), *small negative* (sn), *zero* (z), *small positive* (sp), dan *long positive* (lp). Keanggotaan dari masing-masing elemen dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8 berikut ini.



Gambar 6. Keanggotaan *Input Error*



Gambar 7. Keanggotaan *Input DeltaError*



Gambar 8. Keanggotaan *Output*

Konfigurasi pengendali *fuzzy* yang sesuai dengan *plant* akan diterapkan pada pengendali ANFIS. Ditinjau dari fungsi keanggotaan yang diterapkan maka aturan *if-then* terbentuk sebanyak 25 aturan seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Basis aturan matrik fuzzy

	ln	sn	z	sp	lp
ln	ln	ln	sn	sn	z
sn	ln	ln	sn	z	z
z	sn	sn	z	sp	sp
sp	z	z	sp	lp	lp
lp	z	sp	sp	lp	lp

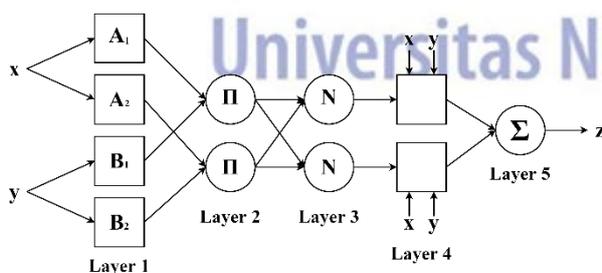
(Sumber : Setiyawan dan Zuhrie, 2019)

### Desain Kontroler Anfis

ANFIS atau *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* ialah sistem cerdas *hybrid* yang menggabungkan ANN dan logika *fuzzy* atau dapat dikatakan metode jaringan saraf tiruan berbasis sistem inferensi fuzzy. ANFIS bekerja dengan menerapkan teknik pembelajaran saraf untuk mengidentifikasi dan menyetel parameter dari *Fuzzy Inference System* (FIS). Jaringan dapat dianggap sebagai sistem inferensi fuzzy adaptif dengan kemampuan mempelajari aturan fuzzy berdasarkan data penelitian sebelumnya.

ANFIS memiliki fitur untuk menentukan aturan yang akan digunakan dalam pemecahan permasalahan. Beberapa fitur menarik dari ANFIS meliputi: implementasi yang mudah, pembelajaran yang cepat dan akurat, kemampuan generalisasi yang lebih baik, representasi pengetahuan yang sangat baik dalam bentuk aturan fuzzy, dan menggabungkan pengetahuan linguistik serta numerik untuk pemecahan masalah. Sehingga, ANFIS dapat digunakan dalam memprediksi berbagai masalah. Pada proses prediksi tersebut terbagi menjadi tiga yaitu proses inialisasi mula, proses pembelajaran, dan proses prediksi. Penentuan periode *input* maupun periode *training* diproses saat inialisasi mula di mana setiap periode *input* memiliki pola tertentu mengikuti model FIS yang diterapkan pada *plant*. Data *input*, parameter ANFIS, dan data *test* dibutuhkan untuk proses pembelajaran pada fase *training* ANFIS. Metode *training* ANFIS adalah menggunakan algoritma belajar hybrid, di mana metode *Error Backpropagation* (EBP) pada alur mundur dan *Least Square Estimator* (LSE) pada alur maju dikombinasikan. Algoritma tersebut, nilai parameter premis tidak akan berubah saat alur maju namun sebaliknya parameter konsekuen akan terbaru saat alur maju (Fatkhurrozi dkk, 2012; Khoirudin, 2020).

Menurut Jagtab (2014), dalam disertasinya memaparkan bahwa, struktur ANFIS terdiri dari 5 *layer* (lapisan) yang ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Struktur ANFIS (Sumber : Sarhan, 2019)

#### Layer 1 – Fuzzifikasi

Fuzzifikasi dilakukan pada lapisan ini untuk membentuk himpunan keanggotaan. *Output* dari setiap *node* adalah

$O_i^1$  dan disebut *node* adaptif dengan fungsi *node* sebagai berikut :

$$O_i^1 = \mu A_i(x) \quad \text{untuk } i = 1, 2; \quad (11)$$

$$O_i^1 = \mu B_i(y) \quad \text{untuk } i = 1, 2; \quad (12)$$

dengan  $x$  adalah *input* ke *node*  $i$  dan  $A_i$  adalah label linguistik.

Fungsi keanggotaan dalam ANFIS terdapat 2 bentuk yaitu Bell (lonceng) dan Gaussian.

Fungsi keanggotaan Bell :

$$f(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \frac{(x-c)^2}{a}} \quad (13)$$

Fungsi keanggotaan Gaussian :

$$A(x) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2a^2}} \quad (14)$$

#### Layer 2 – Produk

Di lapisan 2, operasi aturan dilakukan dengan mengalikan entri di lapisan pertama untuk menghasilkan produk yang akan dikirim keluar. Layer ini mendeskripsikan jumlah aturan deduksi logika fuzzy pada tipe Sugeno. Produk *output* dapat ditulis dengan :

$$O_{2,i} = W_i = \mu A_i(x) \mu B_i(y) \quad (15)$$

#### Layer 3 – Normalisasi

Setiap *node* menormalisasi fungsi bobot dari nilai produk yang masuk. *Output* normalisasi dinyatakan dengan :

$$O_{3,i} = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad (16)$$

#### Layer 4 – Defuzzifikasi

Pengklasifikasian nilai hasil perhitungan berbobot dari aturan yang diberikan di setiap *node* dilakukan pada lapisan ini dengan *output* :

$$O_{4,i} = O_{3,i}(\alpha_i x + \beta_i y + \gamma_i) \quad (17)$$

dengan  $\alpha_i$ ,  $\beta_i$ , dan  $\gamma_i$  adalah linier parameter konsekuen keselarasan *node*  $i$ .

#### Layer 5 – Penjumlahan Output

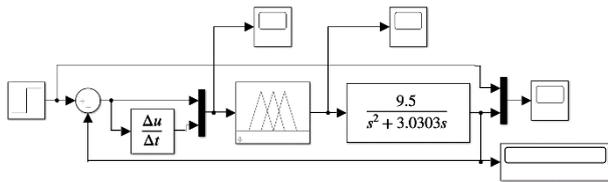
Sebuah *node* sebagai titik pengumpulan setiap nilai keluaran untuk dijumlahkan sehingga menghasilkan nilai sebenarnya dari sistem ANFIS dengan rumus :

$$O_{5,i} = \frac{\sum W_i y_i}{\sum W_i} \quad (18)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

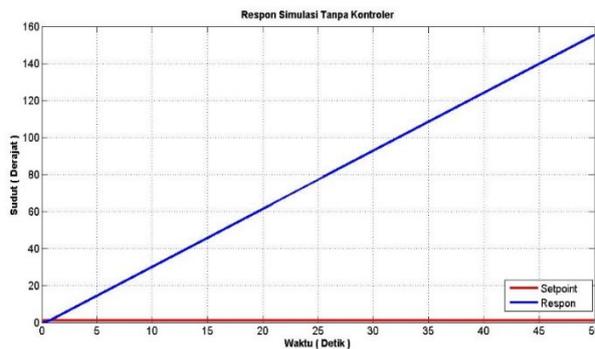
Penelitian dilakukan secara simulasi menggunakan aplikasi Matlab 2018a dengan menggunakan Simulink dan toolbox ANFIS yang telah tersedia dalam aplikasi tersebut. Pengujian *plant* dilakukan dengan beberapa

tahap, yaitu: (1) *plant* tanpa kontroler; (2) *plant* dengan kontroler FIS; (3) dan *plant* dengan kontroler ANFIS. Berikut adalah Simulink *plant* penulis yang ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Rangkaian Simulink *Plant* Berbasis FIS

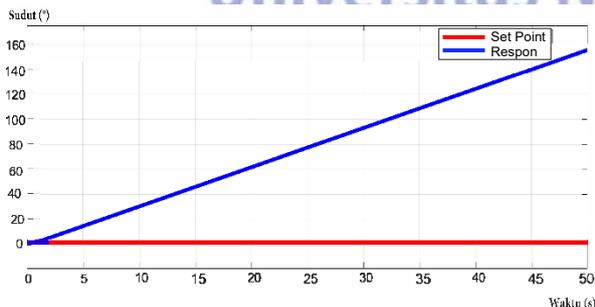
Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, hasil respon sistem dapat ditinjau pada gambar berikut ini dengan perbandingan grafik berdasarkan grafik hasil respon sistem studi literatur penelitian sebelumnya.



Gambar 11. Perbandingan Grafik Sistem Tanpa Kontroler

(Sumber : Setiyawan dan Zuhrie, 2019)

Pada Gambar 11 dapat dilihat bahwa sistem yang tidak menggunakan kontroler akan menghasilkan respon naik menuju tak hingga sehingga tidak dapat mengikuti nilai set point sistem ataupun membuat *plant* dalam keadaan setimbang. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem dari *self balancing* menggunakan dual motor propeller tidak dapat mempertahankan posisi agar setimbang.

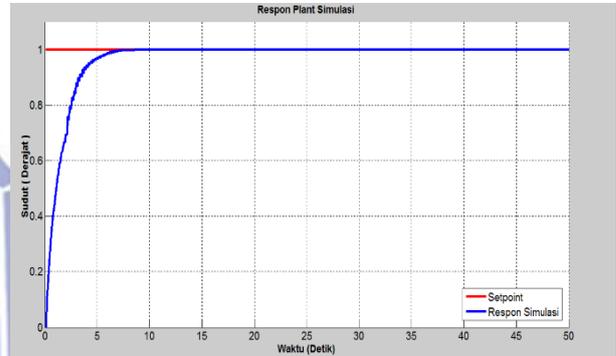


Gambar 12. Grafik Sistem Tanpa Kontroler

Begitu juga dengan hasil pengujian yang dilakukan oleh penulis pada Gambar 12, respon naik menuju tak hingga

sehingga tidak dapat mengikuti nilai set point. Pada keadaan nyata, hal tersebut dapat mengakibatkan kerusakan komponen *plant*. Maka dari itu, kontroler sangat diperlukan untuk mengatur sistem agar dapat bekerja dengan baik.

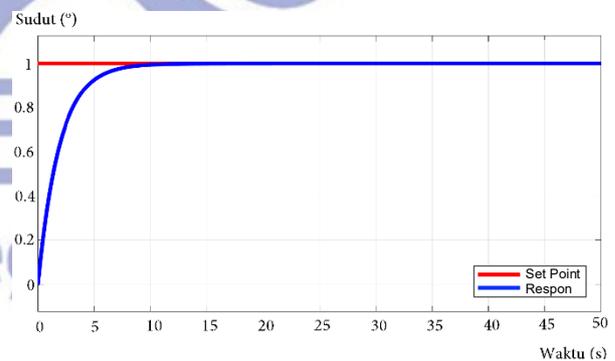
Pengujian yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya dengan sistem yang menggunakan kontroler FIS dapat dilihat seperti pada Gambar 13 berikut ini.



Gambar 13. Perbandingan Grafik Sistem dengan Kontroler FIS

Grafik hasil respon tersebut digunakan untuk mengetahui perbandingan hasil pengujian yang dilakukan oleh penulis. Hasil pengujian sistem dengan kontroler FIS dapat dilihat pada Gambar 14.

Berdasarkan Gambar 13 serta Gambar 14 dapat dikatakan bahwa hasil antara penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai studi literatur penelitian ini dengan pengujian yang dilakukan oleh penulis menghasilkan grafik respon sistem yang serupa. Di mana step info dari respon sistem pengujian dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 14. Grafik Sistem dengan Kontroler FIS

Pengujian yang dilakukan dengan menambahkan kontroler berupa *fuzzy* dapat menekan respon naik menuju tak hingga pada pengujian sebelumnya, sehingga respon sistem dapat mengikuti set point. Parameter pada pengujian tersebut menghasilkan waktu naik 4.143 s, waktu tunak 7.5441 s, simpangan maksimum 0.493 %, dan ess 0.000074 % seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Step Info Respon Sistem menggunakan kontroler FIS

Parameter	Pengujian
Waktu Naik (tr)	4.143 s
Waktu Tunak (ts)	7.5441 s
Simpangan Maksimum (Mp)	0.493 %
Error Steady State (Ess)	0.000074 %

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya, maka didapatkan perbedaan analisis sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 4.

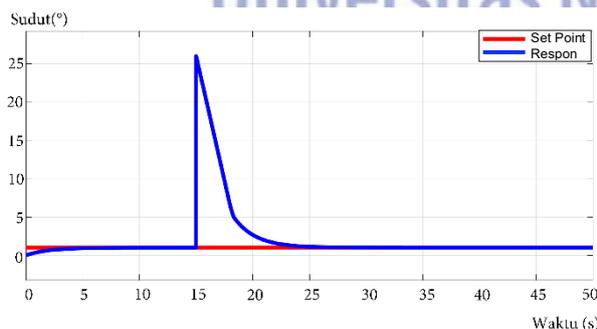
Tabel 4. Perbandingan Step Info Respon Sistem Berdasarkan Analisis Studi Literatur

Parameter	Nilai	
	Literatur FIS	Pengujian FIS
Waktu Naik (tr)	4.545 s	4.143 s
Waktu Tunak (ts)	4.631 s	7.5441 s
Simpangan Maksimum (Mp)	-	0.493 %
Error Steady State (Ess)	0.000121	0.000074

(Sumber : Setiyawan dan Zuhrie, 2019)

Analisis respon sistem menggunakan kontroler FIS dinilai telah cukup baik dalam mengatasi *plant* agar mencapai *set point*. Meskipun ada perbedaan dalam nilai hasil respon sistem yang didapatkan seperti waktu tunak dan simpangan maksimum pengujian dalam merespon sistem yang lebih besar daripada nilai literatur penelitian ini. Sementara itu, seperti nilai waktu naik dan ess pengujian memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan nilai literatur penelitian ini. Hal tersebut dapat disebabkan spesifikasi laptop serta penggunaan kontroler yang digunakan berbeda, sehingga mempengaruhi hasil simulasi yang diuji.

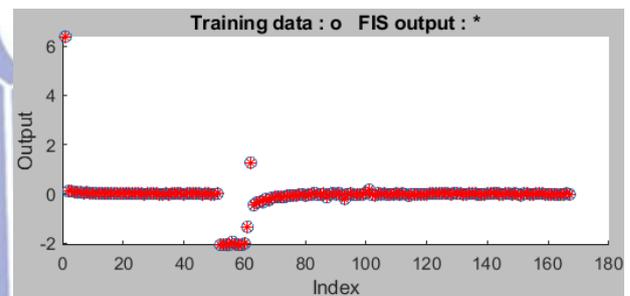
Selanjutnya, dilakukan pengujian dengan menambahkan beban untuk menghasilkan perubahan sudut *plant* terjauh untuk data pemrosesan dalam prediksi ANFIS. Hasil pengujian beban dan proses prediksi secara berurutan dapat ditinjau pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 15. Grafik Sistem dengan Kontroler FIS beserta Beban

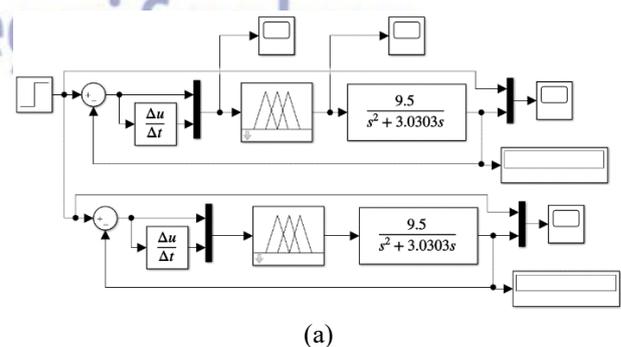
Persimpangan yang menghasilkan perubahan sudut terjauh seperti pada Gambar 15 digunakan untuk proses prediksi yang lebih lengkap. Perubahan sudut terjauh yang dapat diterapkan dalam simulasi tersebut adalah 25° sesuai dengan keanggotaan dalam himpunan *fuzzy*.

Pemodelan ANFIS mengasumsikan struktur model tertentu yang memanfaatkan data *input* serta *output* FIS dalam format yang kompatibel untuk proses prediksi. Data tersebut digunakan dalam proses *training* FIS agar mampu menirukan kelakuan sistem yang sedang dimodelkan (Fajriani dkk, 2018).

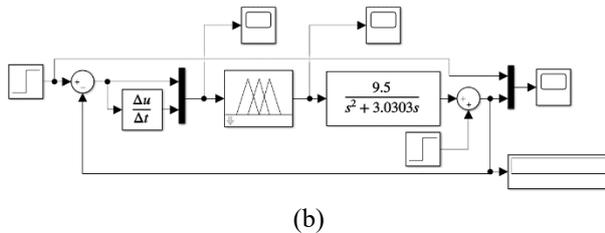


Gambar 16. Proses *Training* ANFIS

Apabila proses prediksi telah mencapai targetnya, maka hasil proses dalam ANFIS dapat digunakan pada *fuzzy logic controller simulink plant*. Menurut Fajriani (2018) dalam penelitiannya mengatakan bahwa semakin tepat posisi hasil *training* data, maka semakin tepat kontroler ANFIS dalam menguji data pengujian. Sebaliknya, semakin jauh posisi hasil *training* data, maka semakin buruk performa kontroler ANFIS dalam menguji data pengujian. Sistem dapat dikatakan berhasil dan siap untuk diaplikasikan apabila *error* rata-rata hasil pengujian mendekati toleransi *error* yang dikehendaki. Ditinjau dari Gambar 16 dengan *error tolerance* sebesar 0.01 dan *average testing error* sebesar 0.0017386, maka sistem berhasil dan siap digunakan pada *self balancing plant* menggunakan *dual motor propeller* dengan rangkaian *simulink plant* seperti pada Gambar 17.



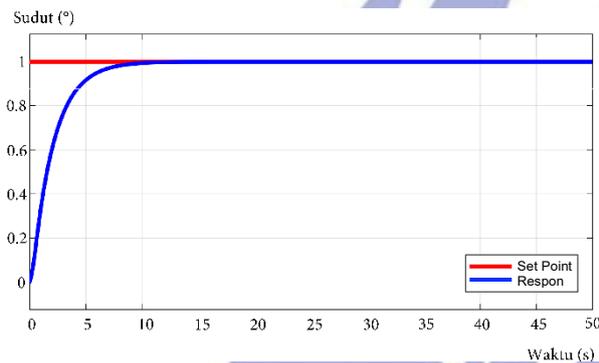
(a)



(b)

Gambar 17. (a) Rangkaian *Simulink Plant* Berbasis FIS dan ANFIS Tanpa Beban Sistem dan (b) Rangkaian *Simulink Plant* Berbasis ANFIS dengan Beban Sistem

Pengujian pertama *plant* menggunakan kontroler ANFIS akan diuji tanpa adanya beban sistem terlebih dahulu untuk mengetahui apakah sistem dapat bekerja dengan baik. Hasil pengujian dapat ditinjau pada Gambar 18.



Gambar 18. Grafik Sistem dengan Kontroler ANFIS

Menurut Fatkhurrozi dkk (2012), prediksi dengan data *time series* ANFIS akan bekerja secara baik apabila data yang digunakan membentuk pola yang teratur. Sebaliknya, apabila data yang digunakan memiliki pola dengan simpangan cukup tinggi secara statistik maka ANFIS akan memberikan rata-rata kesalahan yang masih cukup tinggi. Pada Gambar 18 dapat dilihat bahwa grafik sistem dengan kontroler ANFIS dapat bekerja dengan baik mengikuti nilai set point sistem atau membuat *plant* dalam keadaan setimbang dengan *output* mendekati nilai FIS sebagai acuannya. Step info grafik dapat ditinjau pada Tabel 5 berikut ini.

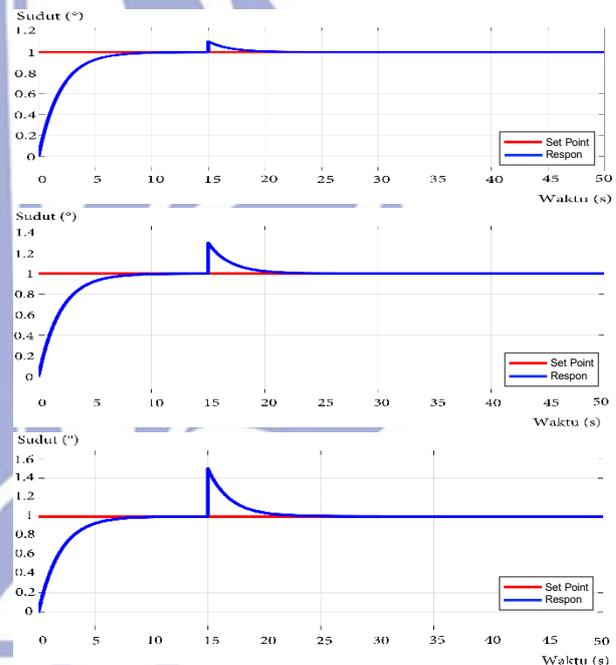
Tabel 5. Step Info Respon Sistem dengan Kontroler ANFIS

Parameter	Nilai
Waktu Naik (tr)	4.145 s
Waktu Tunak (ts)	7.5439 s
Simpangan Maksimum (Mp)	0.498 %
Error Steady State (Ess)	0.000741 %

Berdasarkan Tabel 5, maka didapatkan hasil respon sistem menggunakan kontroler ANFIS dengan nilai waktu naik 4.145 s, waktu tunak, 7.5439 s, simpangan maksimum 0.498 %, dan *error steady state* 0.000741 %.

Dibandingkan dengan hasil respon sistem menggunakan kontroler FIS dengan nilai waktu naik 4.143 s, waktu tunak 7.5441 s, simpangan maksimum 0.493 %, dan *error steady state* 0.000074 % maka dapat dilihat perbedaan hasil respon sistemnya. Di mana nilai-nilai hasil respon tersebut memiliki selisih tidak terlalu jauh sehingga kedua hasil respon dapat dikatakan serupa dan dapat diaplikasikan pada sistem penelitian ini.

Setelah mengetahui analisis respon sistem menggunakan kontroler ANFIS yang dinilai telah cukup baik dalam mengatasi *plant* untuk mencapai set point. Tahap selanjutnya dilakukan pengujian dengan menambahkan tiga beban untuk mengetahui respon sistem apabila terdapat perubahan sudut sebesar 0.1°, 0.3°, dan 0.5° pada saat pengujian *plant* berlangsung. Hasil pengujian tersebut dapat ditinjau pada Gambar 19.



Gambar 19. Grafik Sistem dengan Kontroler ANFIS beserta Beban dengan Perubahan Sudut Sebesar 0.1°, 0.3°, dan 0.5°

Pada Gambar 19 dapat dilihat bahwa sistem dengan kontroler ANFIS beserta beban dengan perubahan sudut tertentu dapat diatasi dengan baik. Beban yang menyebabkan adanya perubahan sudut sebesar 0,1°; 0,3°; dan 0,5° secara berurutan dapat teratasi dengan mengembalikan keadaan *plant* ke *set point* atau kembali dalam keadaan setimbang. Sehingga, sistem dapat dikatakan berhasil menjalankan *plant* dengan menggunakan kontroler ANFIS. Berikut analisis respon berdasarkan grafik respon sistem *plant*.

Tabel 6. Step Info Respon Sistem menggunakan Kontroler ANFIS dengan Perubahan Sudut Sebesar  $0,1^\circ$ ;  $0,3^\circ$ ; dan  $0,5^\circ$

Parameter	Nilai		
	$0.1^\circ$	$0.3^\circ$	$0.5^\circ$
Waktu Naik (tr)	4.147 s	4.132 s	4.182 s
Waktu Tunak (ts)	18.111 s	20.237 s	21.219 s
Simpangan Maksimum (Mp)	10.556 %	30.921 %	50.758 %
Error Steady State (Ess)	0.001035 %	0.000034 %	0.000898 %

Berdasarkan hasil respon pada Tabel 6, dapat dilihat bahwa semakin besar perubahan sudut yang dihasilkan dari adanya beban sistem maka semakin tinggi nilai waktu tunak dan simpangan maksimum respon *plant* yang dihasilkan. Sedangkan, pada nilai waktu naik dan *error steady state* mengalami fluktuasi. Di mana pengujian dengan perubahan sudut sebesar  $0.3^\circ$  memiliki hasil respon sistem waktu tunak dan *error steady state* lebih kecil dari pada dua pengujian lainnya. Nilai yang didapatkan yaitu waktu naik sebesar 4.132 s dan ess sebesar 0.000034 %.

## PENUTUP

### Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh penulis maka dapat disimpulkan bahwa sistem pengendalian *self balancing* menggunakan *dual motor propeller plant* berbasis ANFIS dapat bekerja dan mencapai *set point* dengan baik. *Dual motor propeller* tersebut dapat menuju dan kembali menyetimbangkan posisi jungkat-jungkit pada *set point* yang telah ditentukan apabila terdapat perubahan sudut dalam pembacaannya.

*Output* sistem FIS yang digunakan sebagai acuan sistem ANFIS memiliki nilai respon sistem yang serupa dengan nilai respon *output* sistem ANFIS. Hal tersebut dapat disebabkan karena nilai acuan yang diambil merupakan nilai dari sistem dengan kontroler FIS. Sehingga hasil keluaran ANFIS memiliki nilai menyerupai hasil sistem keluaran FIS. Penelitian ini mendapatkan nilai respon sistem berbasis ANFIS dalam sistem pengendalian *self balancing* menggunakan *dual motor* dengan besar nilai waktu naik (tr) = 4.145 s, waktu tunak (ts) = 7.5439 s, simpangan maksimum (Mp) = 0.489 %, dan *error steady state* (Ess) = 0.000741 %.

### Saran

Perlunya untuk mengembangkan kontroler FIS dan ANFIS sangatlah penting. Upaya pengoptimalan hasil respon *plant self balancing* menggunakan *dual motor* dari tiap kontroler agar menghasilkan keluaran yang lebih baik dapat dikembangkan pada penelitian selanjutnya. Baik kontroler FIS, ANFIS, atau kombinasi dari beberapa kontroler lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdelmaksoud, Sherif I; Mailah, Musa; and Abdallah, Ayman M. 2020. *Control Strategies and Novel Techniques for Autonomous Rotorcraft Unmanned Aerial Vehicle: A Review*. IEEE Access Volume 8, 2020, DOI 10.1109/ACCESS.2020.3031326.
- Agarwal, Shlok; Mohan, Apoorva; and Kumar, Kamlesh. 2013. *Design and fabrication of twinmotor UAV*. DOI: 10.5121/csit.2013.3830.
- Bertran, Eduard and Sanchez-Cerda, Alex. 2016. *On The Trade-off between Electrical Power Consumption and Flight Performance in Fixed-Wing UAV Autopilot*. DOI 10.1109/TVT.2016.2601927, IEEE Transactions on Vehicular Technology.
- Fajriani, Rizka Nurul; Asriani, Farida; dan Susilawati, Hesti. 2018. *Penerapan Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) untuk Pemantauan Status Gunung Merapi*. Yogyakarta: Fakultas Teknologi Informasi Universitas Mercu Buana Yogyakarta.
- Fatkhurrozi, Bagus; Muslim, M. Aziz; dan Santoso, Didik R. 2012. *Penggunaan Artificial Neuro Fuzzy Inference Sistem (ANFIS) dalam Penentuan Status Aktivitas Gunung Merapi*. Jurnal EECCIS Vol.6, No.2, Desember 2012.
- Franchi, Antonio and Mallet, Anthony. 2017. *Adaptive Closed-loop Speed Control of BLDC Motors with Applications to Multi-rotor Aerial Vehicles*. IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2017, Singapur, Singapore.
- Gemilang, Yusuf Rahmat. 2016. *Kendali Jarak Jauh UAV (Unmanned Aerial Vehicle) Tipe Quadcopter Menggunakan Transceiver NRF24L01+ Beserta Job Sheet Uji Coba*. Jurnal Pendidikan Teknik Elektro FT Unesa, Volume 05 Nomor 03 Tahun 2016, 861-866.
- Haratiannejadi, Kianoush and Selmic, Rastko R. 2020. *Smart Glove and Hand Gesture-Based Control Interface for Multi-Rotor Aerial Vehicles in a Multi-Subject Environment*. IEEE Access Volume 8 2020, DOI 10.1109/ACCESS.2020.3045858.
- Hidayat, Rahmad dan Mardiyanto, Ronny. 2016. *Pengembangan Sistem Navigasi Otomatis Pada UAV (Unmanned Aerial Vehicle) dengan GPS (Global Positioning System) Waypoint*. Jurnal Teknik ITS Vol.5, No.2, (2016) ISSN: 2337-3539 (2301-9271 Print).
- Hosseializade, T; Hosseini, S.M.J; and Khaloozadeh, H. 2016. *Design and Implementation Classical, State Feedback and Fuzzy Controllers on Twin Rotor System*. 2016 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA) 27-28 January 2016, Qazvin Islamic Azad University, Qazvin, Iran.
- Jagtap, Pushpak. 2014. *Neuro-Fuzzy System for Modelling and Control Applications*. Teknik Elektro, Indian Institute of Technology Roorkee.

- Khoirudin, Mochamad Masnur. 2020. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Menggunakan Pengendali Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. Surabaya: Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya.
- Koubaa, Anis; Allouch, Azza; Alajlan, Maram; Javed, Yasir; Belghith, Abdelfettah; and Khalgui, Mohamed. 2019. *Micro Air Vehicle Link (MAVLink) in a Nutshell: A Survey*. IEEE Access Volume 7 2019, DOI 10.1109/ACCESS.2019.2924410.
- Nam, Kyung-Jae; Joung, Joosang; and Har, Dongsoo. 2020. *Tri-Copter UAV With Individually Tilted Main Wings for Flight Maneuvers*. IEEE Access Volume: 8, DOI 10.1109/ACCESS.2020.2978578.
- Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern Control Engineering : 5<sup>th</sup> ed*. Upper Saddle River: Pearson Education.
- Poksawat, Pakorn; Wang, Liuping; and Mohamed, Abdulghani. 2017. *Gain Scheduled Attitude Control of Fixed-Wing UAV With Automatic Controller Tuning*. IEEE Transactions on Control Systems Technology Volume: 26, Issue: 4, July 2018.
- Putra, Graseo Granteo. 2019. *Pembacaan Aktifitas Manusia dengan Sensor Gyro*. Yogyakarta: Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Sanata Dharma.
- Qonitah, Niswaton dan Sutijo, Brodjol. 2012. *Optimasi Multirespon Pembuatan Kertas di Paper Machine II PT. Adiprima Saraprinta Gresik dengan Pendekatan Metode Fuzzy Logic*. Surabaya: Jurusan Statistika ITS Surabaya.
- Sahin, Huseyin; Oktay, Tugrul; and Konar, Mahmet. 2020. *Anfis Based Thrust Estimation of a Small Rotary Wing Drone*. European Journal of Science and Technology No. 18, pp. 738-742, March-April 2020.
- Sarhan, Amr A. and Hafez, Ahmed T.. 2019. *UAV Brushless DC Motor Speed Control via Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) and Self-Adaptive PID*. AIAA SciTech Forum 7-11 January 2019, San Diego, California AIAA Scitech 2019 Forum.
- Setiyawan, Armanda Hari dan Zuhrie, Muhammad Syarifuddin. 2019. *Rancang Bangun Sistem Pengendalian Self Balancing Pada Dual Motor Propeller Berbasis Fuzzy Logic Controller*. Surabaya: Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya.
- Singandhupe, Ashutosh; La, Hung Manh; and Feil-Seifer, David. 2018. *Reliable Security Algorithm for Drones Using Individual Characteristics From an EEG Signal*. IEEE Access DOI 10.1109/ACCESS.2018.2827362.
- Tiwari, Astha. 2017. *Position Control of an Unmanned Aerial Vehicle From a Mobile Ground Vehicle*. Open Access Master's Thesis, Michigan Technological University, 2017. doi.org/10.37099/mtu.dc.etrdr/470.
- Wang, Yu; Cheng, Zunshui; and Xiao, Min. 2020. *UAV's Formation Keeping Control Based on Multi-Agent System Consensus*. IEEE Access Volume 8 2020, DOI 10.1109/ACCESS.2020.2979996, Volume 8.
- Zhao, Jian and Yu, Yangwei. 2014. *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note*. MPS The Future of Analog IC Technology.