

## Desain Sistem Pengaturan Sudut Aero Pendulum Menggunakan Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS) Berbasis MATLAB

**Aldo Tri Prasetyo**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia  
e-mail : aldo.17050874027@mhs.unesa.ac.id

**Endryansyah, Bambang Suprianto, Puput Wanarti Rusimamto**

S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Ketintang 60231, Indonesia  
e-mail : endryansyah@unesa.ac.id, bambangsuprianto@unesa.ac.id, puputwanarti@unesa.ac.id

### Abstrak

*Aero pendulum* dapat diartikan sebagai pendulum yang dilengkapi dengan baling baling di salah satu ujungnya, dan ujung lainnya berada pada satu titik tetap. *Aero Pendulum* terdiri dari dua posisi ekuilibrium (kesetimbangan) yaitu stabil dan tidak stabil. Salah satu masalah paling sederhana dalam robotika adalah masalah pengendalian posisi sudut. Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem kontrol *Aero Pendulum* dengan kendali *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) yang disimulasikan di perangkat lunak Matlab. Kendali ANFIS telah diterapkan untuk mengontrol suatu sistem dengan pergerakan yang kurang baik. Berdasarkan simulasi pada sistem *Aero Pendulum* dengan menggunakan kontroler ANFIS, didapatkan hasil terbaik pada *setpoint* sudut sebesar 80 derajat dengan waktu naik ( $t_r$ ) sebesar 0,8903 detik, waktu tunak ( $t_s$ ) sebesar 1,1035 detik, waktu puncak ( $T_p$ ) sebesar 1,1484 detik, *overshoot* maksimum ( $M_o\%$ ) sebesar 0,4868%, dan nilai *Error Steady State* ( $Ess\%$ ) sebesar 0,006%.

**Kata Kunci:** *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS), *Aero Pendulum*, Matlab, Robotika.

### Abstract

*Aero pendulum* can be interpreted as a pendulum that is equipped with a propeller at one side, and the other side is at one fixed point. *Aero Pendulum* consists of two equilibrium positions (balance) that are stable and unstable. One of the problems most are simple in robotics is controlling the angle position. This research aims to design and control the *Aero Pendulum* system using the *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) controller that simulated in the software Matlab. ANFIS controller has been applied to control a system with not good movements. Based on the simulation on the system *Aero Pendulum* by using the controller ANFIS, achieved the best results on the setpoint angle of 80 degrees with a rise time ( $t_r$ ) of 0,8903 seconds, the time steady-state ( $t_s$ ) in the amount of 1.1035 seconds, peak time ( $T_p$ ) of 1,1484 seconds, the overshoot of the maximum ( $M_o\%$ ) of 0,4868%, and the value of *Steady State Error* ( $Ess\%$ ) 0.006%.

**Keywords:** Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), *Aero Pendulum*, Matlab, Robotics.

### PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi semakin berkembang pesat mengikuti dengan perkembangan zaman. perkembangan tersebut timbul karena semakin berkembangnya akal dan pengetahuan manusia tersebut, sehinggamenyebabkan semakin berkembangnya dunia teknologi. Perkembangan dapat terjadi pada alat atau benda tradisional yang memiliki fungsi penting dalam menunjang suatu kehidupan. Perkembangan tersebut dapat mengubah alat sederhana menjadi teknologi yang modern sehingga fungsinya dapat dimaksimalkan. Salah satu perkembangan tersebut dapat dilihat dari pendulum.

Pendulum merupakan bandul yang berada pada ujung seutas tali ataupun gantungan yang relatif panjang. Seiring berkembangnya zaman, pendulum mengalami perkembangan secara teknologi. Sebagai salah satu contoh pendulum di era ini modern adalah *Aero Pendulum*. *Aero*

Pendulum di mana merupakan jenis pendulum di salah satu ujung terdapat motor dengan baling-baling. (Khoirudin. 2020). Motor baling-baling akan berputar di satu titik sehingga menghasilkan gaya dorong. Gaya dorong tersebut dihasilkan oleh putaran motor berbaling-baling. Salah satu teknologi yang memiliki cara kerja komponen mirip dengan pendulum adalah UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) atau biasa disebut dengan pesawat nirawak. UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) adalah sebuah teknologi robot terbang yang dapat dikontrol dari jarak jauh. Selain itu UAV juga mampu mengendalikan dirinya sendiri karena adanya kendali dan diawasi oleh seorang operator.

Salah satu bentuk pengujian yang digunakan adalah menggunakan sistem *Aero Pendulum*. *Aero Pendulum* terdiri dari dua posisi ekuilibrium yaitu stabil dan tidak stabil. (Hanafy. 2011). Posisi stabil adalah posisi di mana pendulum mengarah ke *setpoint* dan mempertahankan nilai

tersebut. Sedangkan, posisi tidak stabil adalah posisi dimana pendulum tidak berada pada *setpoint* yang telah ditentukan. Pengontrolan posisi tersebut bertujuan untuk menstabilkan sistem di sekitar titik stabil ekuilibrium yang dipilih. Agar pendulum cepat mencapai *setpoint* dan stabil, diperlukan kontroler yang tepat agar sistem memiliki ketahanan terhadap gangguan luar yang cepat dan besar. (Wang, 2011). Kontrol pendulum telah menjadi masalah kontrol yang menarik sejak 1950-an. (Kharola, 2016).

Terdapat penelitian yang dilakukan sebelumnya dengan tujuan untuk mengatur posisi sudut *Aero Pendulum* menggunakan pengendali PID pada program LabView. Hasil terbaik dicapai pada nilai *setpoint* 45 derajat, dengan memiliki *rise time* (*tr*) sebesar 5,421 detik, *settling time* (*ts*) sebesar 7,40 detik, *peak time* (*tp*) sebesar 8,264 detik, *maximum overshoot* (*mo%*) sebesar 2,44%, dan *error steady state* (*Ess*) sebesar 0.069%. (Romadhon, 2019).

Penelitian selanjutnya dilakukan pada tahun 2020, yaitu kendali ANFIS pada LabView dengan proses *training* menggunakan metode *Least-square Estimator* (LSE). Hasil simulasi menunjukkan hasil terbaik dicapai pada nilai *setpoint* 60 derajat, dengan *rise time* (*tr*) sebesar 0,92 detik, *maximum overshoot* (*mo%*) sebesar 1,63%, dan *settling time* (*ts*) sebesar 1,31 detik. (Khoirudin, 2020).

Berdasar studi literatur dari penelitian terdahulu dan latar belakang maka dibentuk pengembangan penelitian terhadap pengaturan posisi sudut pada *Aero Pendulum* dengan kendali *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS). ANFIS adalah kendali yang menggabungkan antara *Fuzzy Inference System* (FIS) dengan kendali *Neural Network* (NN). Hal tersebut bertujuan untuk menggabungkan Kelebihan dari kedua kendali tersebut. (Flower, Sasi, 2012). Metode pengendalian yang dikembangkan pada penelitian ini yaitu ANFIS dengan metode optimasi *Hybrid*. Kendali ANFIS telah diterapkan untuk mengontrol suatu sistem dengan pergerakan yang kurang baik. (Singh, Kumar, dkk, 2012). Kendali ANFIS pada penelitian ini menggunakan metode belajar (*optimization method*) yaitu *Hybrid*.

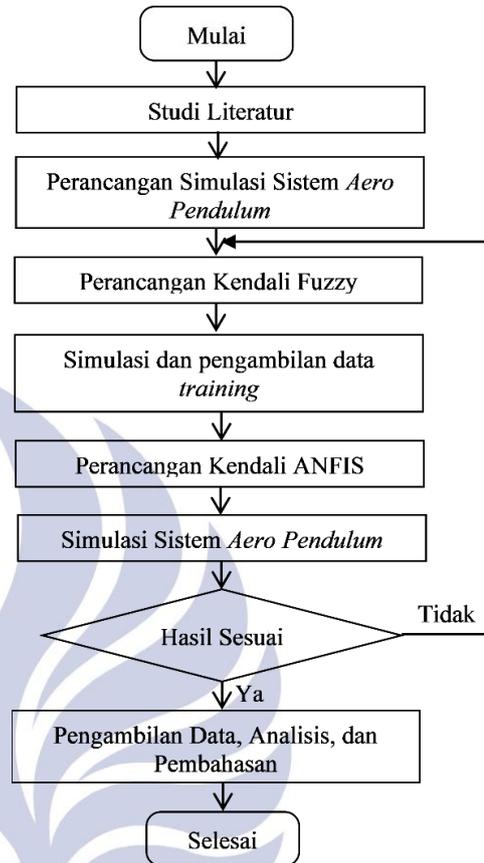
**METODE**

**Pendekatan Penelitian**

Pada artikel ilmiah ini disusun menggunakan metode pendekatan penelitian eksperimen. Metode penelitian eksperimen merupakan penelitian yang paling dapat diandalkan keilmiahannya atau paling valid, karena dilakukan dengan pengontrolan secara ketat terhadap variabel-variabel pengganggu diluar yang dieksperimenkan. (Jaedun, 2011). Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang didapat dari studi literatur berupa jurnal, skripsi dan tesis.

**Rancangan Penelitian**

Berikut merupakan diagram alir dari rancangan pada penelitian kali ini.

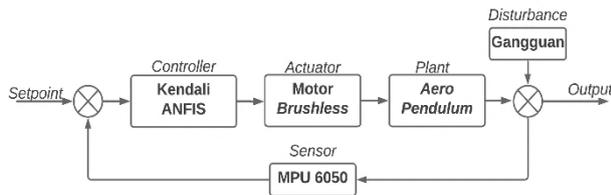


**Gambar 1.** Skema diagram alir rancangan penelitian

Berdasarkan pada diagram alir di atas, penyusunan penelitian dimulai dengan melakukan studi literatur dari berbagai referensi seperti jurnal, skripsi, tesis dan *ebook*. Selanjutnya yaitu membuat diagram blok sistem *aero pendulum* di simulink pada perangkat lunak Matlab. Setelah itu membuat kendali fuzzy dan mensimulasikannya ke sistem yang telah dibuat. Setelah itu dilakukan pengambilan data nilai dari setiap kemungkinan nilai input dan output dari fuzzy. Selanjutnya data tersebut digunakan sebagai data latihan (*Training*) dalam merancang kendali ANFIS. Kemudian dilakukan simulai kendali ANFIS terhadap sistem *aero pendulum* yang telah dibuat disimulink pada perangkat lunak Matlab. Jika simulasi yang dilakukan mendapatkan hasil yang kurang maksimal, maka dilakukan perbaikan pada kendali fuzzy maupun pada data latihan yang ada. Akan tetapi jika hasil simulasi menunjukkan hasil yang baik, maka dilakukan pengambilan data, dan analisis terhadap hasil simulasi

**Desain Sistem**

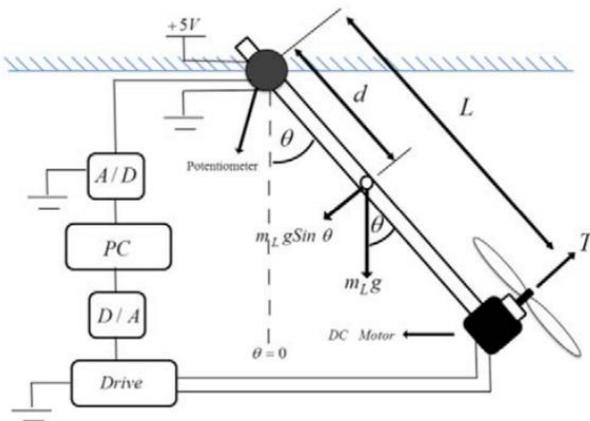
Pada Gambar 2 berikut merupakan gambaran diagram blok sistem Aero Pendulum menggunakan kendali Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS).



**Gambar 2.** Diagram Blok Sistem Aero Pendulum

**Pemodelan Sistematis Aero Pendulum**

Aero Pendulum merupakan robot pendulum yang memiliki motor berbaling-baling di satu ujungnya, dan ujung yang lain berada pada satu titik tumpu. Sehingga saat motor berputar akan menghasilkan gaya dorong dan membuat pendulum terangkat. Gambar 3 berikut merupakan gambaran dari diagram sistematis dari aero pendulum.



**Gambar 3.** Diagram Sistematis Aero Pendulum (Sumber: R. Ghasemi, Khoygani 2014)

**Model Matematika Plant Aero Pendulum**

Dapat dilihat dari Gambar 3, motor berbaling-baling akan berputar dan menghasilkan gaya dorong saat sistem diaktifkan dan diberi nilai setpoint. Hal ini memungkinkan untuk dilakukan pengontrolan terhadap pengaturan sudut pada Aero Pendulum agar didapatkan sistem yang stabil dan cepat dalam mencapai nilai yang diinginkan. Gaya dorong pada baling-baling membuat sistem terangkat dan membentuk sudut.

Berdasarkan hukum Newton dan momentum sudut, persamaan sistem dapat dijabarkan menjadi persamaan berikut.

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

Dari persamaan 1, akan dilakukan transformasi Laplace dengan domain (s). Sehingga menjadi persamaan berikut ini :

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

Dari persamaan 2 tersebut dilakukan pemindahan ruas, maka didapatkan fungsi alih:

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

Dari fungsi alih diatas dilakukan penyederhanaan dengan membagi persamaan dengan J sehingga didapatkan hasil sebagai berikut :

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

Keterangan :

- $\theta$  = Sudut (Derajat)
- $\theta(s)$  = Sudut dalam domain waktu (Laplace)
- $\dot{\theta}$  = Kecepatan sudut (rad/s)
- $J$  = Momen inersia (kg.m<sup>2</sup>)
- $\ddot{\theta}$  = Percepatan sudut (rad/s<sup>2</sup>)
- $K_m$  = Koefisien motor propeller
- $g$  = Percepatan gravitasi (m/s<sup>2</sup>)
- $m$  = Berat bandul (kg)
- $L$  = Panjang lengan
- $c$  = Koefisien redaman (kg.m<sup>2</sup>/s)
- $d$  = Jarak ujung lengan ke titik tumpu (m)

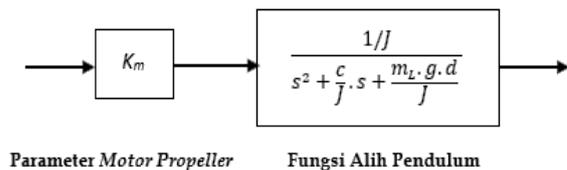
Pada sistem Aero Pendulum pergerakan sistem dipicu oleh putaran motor baling-baling dan tegangan yang diberikan. Putaran tersebut menghasilkan gaya dorong sehingga persamaan sistem harus dikalikan dengan kecepatan motor baling-baling. Agar didapatkan nilai persamaan yang dapat dikendalikan.

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

Dimana :

- $K_m$  = Kecepatan putaran baling-baling motor (rad/s/V)
- $T(s)$  = Gaya angkat dalam domain waktu yang dihasilkan oleh motor brushless DC (Nm/kg).
- $V(s)$  = Tegangan dalam domain waktu yang diberikan ke motor brushless DC (Volt).

Berdasarkan persamaan 4 dan persamaan 5, maka dapat dibuat diagram blok sistem Aero Pendulum seperti gambar diagram blok berikut.



**Gambar 4.** Diagram Blok Sistem Aero Pendulum

Dari diagram blok pada Gambar 4, maka didapatkan fungsi alih sebagai berikut.

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_m/J}{s^2 + \frac{c}{J}s + \frac{mL.g.d}{J}} \quad (6)$$

Dalam menentukan fungsi alih suatu sistem, perlu diketahui spesifikasi dari sistem tersebut. Berikut merupakan tabel spesifikasi fisik dari *plant* sistem *Aero Pendulum*.

**Tabel 1.** Spesifikasi sistem *Aero Pendulum*

No.	Alat	Spesifikasi	Satuan
1.	Panjang Lengan (L)	0,4	m
2.	Momen Inersia (J)	0,0512	Kg.m <sup>2</sup>
3.	Koefisien redaman (c)	0,0001	Kg.m <sup>2</sup> /s
4.	Panjang Pusat Massa (d)	0,2	m
5.	Percepatan gravitasi (g)	9,8	m/s <sup>2</sup>
6.	Massa (m)	0,32	Kg

(Romadhon, Aris D. 2019).

Berdasarkan spesifikasi *Aero Pendulum* pada tabel 1 di atas, maka langkah selanjutnya adalah memasukan nilai spesifikasi tersebut ke Persamaan 6. Sehingga didapatkan hasil nilai fungsi alih sebagai berikut.

$$G(s) = \frac{13.6719}{+0.000195s+12.25} \quad (7)$$

Keterangan :

G(s) = Fungsi alih pemodelan sistem

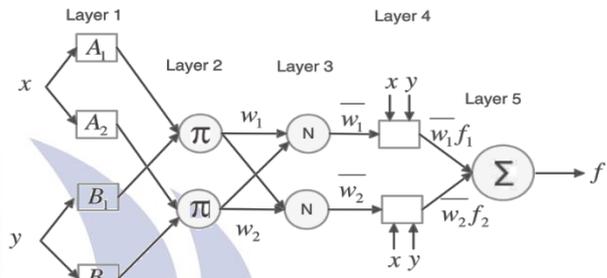
**Kendali Adaptive Neuro Fuzzy Inference System**

Teknik kendali *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* atau disebut ANFIS awalnya ditunjukkan oleh Jang pada tahun 1993. (Jang, 1993). ANFIS merupakan kendali yang termasuk dalam jaringan adaptif. Dimana dapat diartikan bahwa kendali tersebut dapat menyesuaikan atau beradaptasi dengan data dan keadaan sistem yang ada. Kendali ANFIS adalah kendali yang menggabungkan fitur kemampuan belajar jaringan saraf dan pengambilan keputusan dari kendali fuzzy. Gabungan dari kedua kendali tersebut bertujuan untuk mamaksimalkan kelebihan dan mengurangi kekurangan setiap kendali. Gabungan dari kedua kendali ini diterapkan untuk saling melengkapi kelebihan dan mengurangi kekurangan dari masing-masing kendali.

ANFIS menggunakan sekumpulan data dari masukan dan keluaran kendali fuzzy yang didapatkan dari simulasi sistem yang ada. Selanjutnya data yang telah didapatkan dari kendali fuzzy digunakan sebagai data pelatihan (*Training*) untuk dilatih sehingga mendapatkan nilai *error* yang diinginkan. Dalam merancang kendali ANFIS dapat disesuaikan jumlah dan jenis fungsi keanggotaannya (*Membership Function*). Kendali ANFIS mampu untuk menghitung dan membuat parameter fungsi

keanggotaan masukan dan keluarannya secara otomatis dengan beradaptasi pada data yang ada. (Omar, Haikal, dkk. 2011).

ANFIS terdiri dari lima lapisan (*Layer*). Dimana setiap lapisan memiliki simbol dan fungsinya masing-masing. Terdapat dua jenis titik pada arsitektur ANFIS, yaitu bersimbol persegi merupakan bagian yang bersifat adaptif, bersimbol lingkaran adalah bagian yang bersifat tetap. Pada Gambar 5 merupakan Arsitektur kendali ANFIS dengan model Sugeno.



**Gambar 5.** Arsitektur Kendali ANFIS

(Sumber : Al-Hmouz, Shen. 2012)

*Layer 1*, Lapisan ini adalah lapisan Fuzzifikasi dasar dimana proses tersebut untuk mengubah nilai input dari bentuk tegas (*crisp*) menjadi fuzzy (variabel linguistik). Setiap node pada layer 1 bersimbol persegi sehingga node ini bersifat adaptif.

*Layer 2*, Lapisan ini mendefinisikan setiap fungsi keanggotaan masukan menjadi bentuk dan jumlah yang diinginkan. Node pada lapisan 2 dinotasikan sebagai pi (π). Setiap node pada lapisan ini bertugas untuk menghitung kekuatan aktivasi pada aturan (*rule*) yang ada.

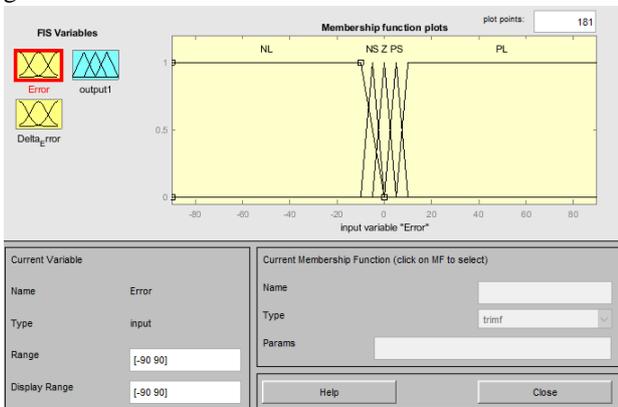
*Layer 3*, Node di lapisan ini mewakili aturan yang dibuat untuk kombinasi dan contoh input yang berbeda. Lapisan ini akan memberikan informasi mengenai aturan mana yang akan diaktifkan untuk berbagai kemungkinan input. Node pada lapisan ini dilambangkan dengan N atau normalisasi. Menormalkan setiap masukan terhadap yang lain (Keluaran node ke-i adalah masukan ke-i dibagi dengan jumlah dari semua masukan lainnya). (Omar, Haikal, dkk. 2011).

*Layer 4*, Node pada lapisan ini bersifat adaptif. Lapisan ini merupakan bagian *defuzzifikasi*, keluaran simpulnya adalah fungsi linier dari keluaran simpul ke-i dari lapisan ketiga dan sinyal masukan ANFIS. (Omar, Haikal, dkk. 2011).

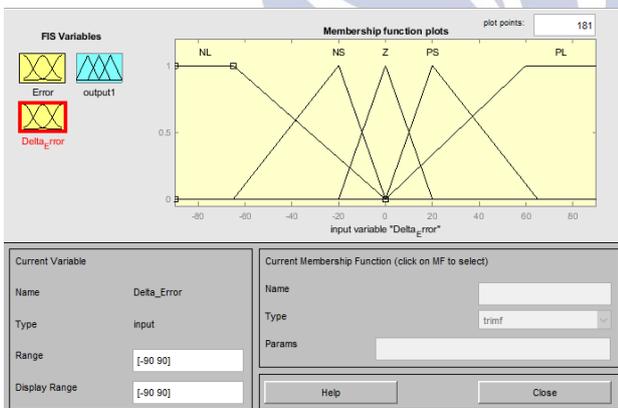
*Layer 5*, Node tunggal ini dilambangkan dengan tanda ‘sigma (Σ),’ dimana lapisan ini menghitung nilai output dari keseluruhan nilai sebagai penjumlahan (SUM) dari semua sinyal yang masuk dari hasil lapisan 4. Maka fungsi dari lapisan ini adalah memberikan output keseluruhan yang dihasilkan dari semua aturan yang diaktifkan untuk nilai input tertentu.

**Perancangan Sistem Kendali Fuzzy dan ANFIS**

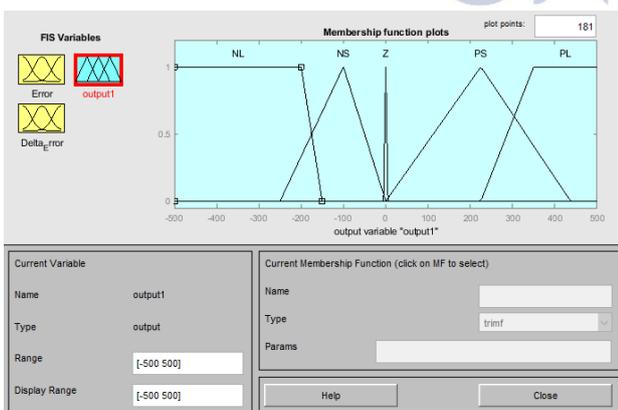
Dalam merancang kendali ANFIS, perlu dirancang terlebih dahulu kendali Fuzzy untuk dijadikan sebagai acuan nilai-nilai parameter masukan dan keluarannya. Dalam penelitian ini, dirancang kendali fuzzy dengan dua masukan dan satu keluaran yang merujuk pada penelitian sebelumnya dengan merubah beberapa fungsi keanggotaan. (Kurniawan. 2020). Struktur fuzzy yang dibuat untuk acuan dalam membuat kendali ANFIS sesuai dengan gambar-gambar berikut.



**Gambar 6.** Variabel Masukan *Error*



**Gambar 7.** Variabel Masukan *Delta Error*



**Gambar 8.** Variabel Keluaran Fuzzy

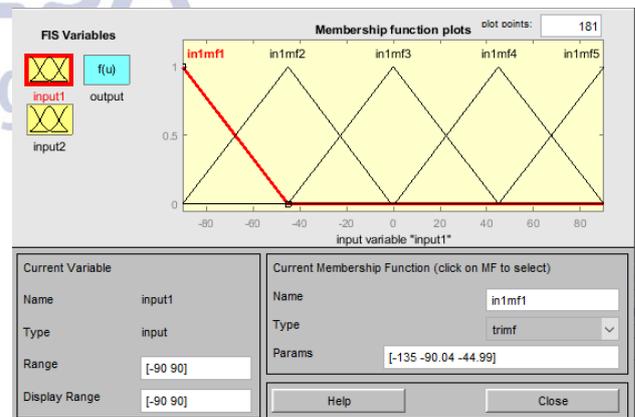
Setelah merancang kendali fuzzy, Selanjutnya dilakukan simulasi kendali terhadap sistem *Aero Pendulum* yang ada. Setelah mendapatkan hasil yang cukup baik dalam simulasi, langkah berikutnya yaitu merancang data yang nantinya akan digunakan sebagai data latihan ANFIS. Pada penelitian ini digunakan data nilai masukan *error* dan *delta error* serta nilai keluaran sebanyak 361 data latihan. Dimana data tersebut merepresentasikan kemungkinan-kemungkinan yang ada.

Setelah didapatkan data latihan, langkah berikutnya yaitu merancang kendali ANFIS pada *software* Matlab. Dalam merancang kendali ANFIS langkah pertama yaitu melakukan pengoptimalan pada data latihan (*training data*). Pada pelatihan data, dibandingkan antara nilai keluaran setiap data fuzzy dan keluaran ANFIS. Sehingga didapatkan nilai *error training* Pada penelitian ini, digunakan jumlah fungsi keanggotaan sebanyak 5 dengan bentuk segitiga, dan metode optimasi *Hybrid* dengan jumlah *epoch* sebanyak 300 kali pengulangan. Sehingga didapatkan perhitungan *error training* data sebesar 19,1975, dan nilai keluaran seperti gambar berikut.

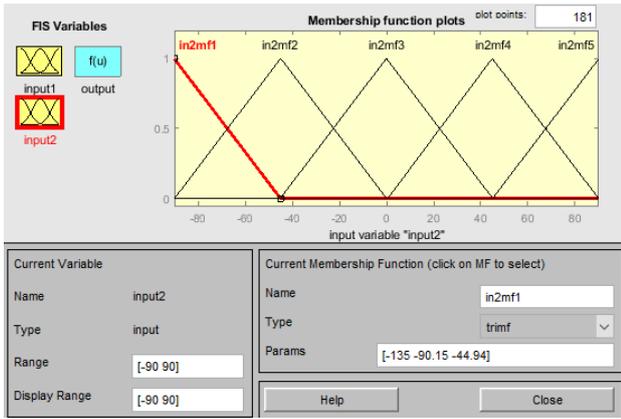


**Gambar 9.** Hasil *Error Training data*

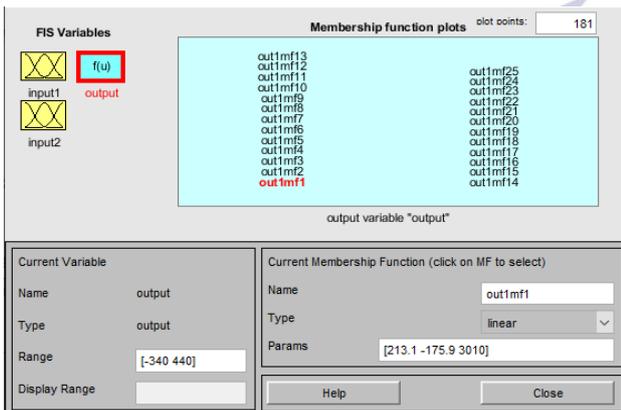
Setelah mendapat hasil seperti pada gambar diatas, maka didapatkan hasil kendali ANFIS sebagai fuzzy Sugeno seperti pada gambar-gambar berikut.



**Gambar 10.** Variabel Masukan 1 Pada Kendali ANFIS



Gambar 11. Variabel Masukan 2 Pada Kendali ANFIS



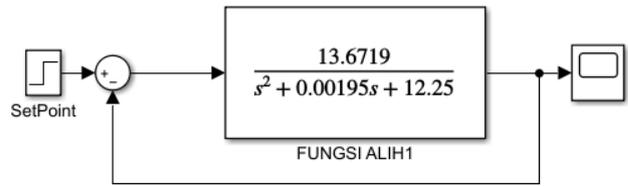
Gambar 12. Variabel Keluaran Pada Kendali ANFIS

Dari sistem kendali yang dibuat, dihasilkan kendali ANFIS yang memiliki 2 variabel masukan, 1 variabel keluaran, dan 25 aturan. Dengan masing-masing variabel masukan memiliki 5 fungsi keanggotaan, dan variabel keluaran memiliki 25 fungsi keanggotaan. ANFIS yang diusulkan dilatih (*training*) untuk menghasilkan kendali yang diinginkan dengan mengadaptasi fungsi keanggotaan fuzzy. Fungsi keanggotaan ini dipilih oleh pengalaman penulis atau melalui uji coba. (Sharhan, Ahmed 2019).

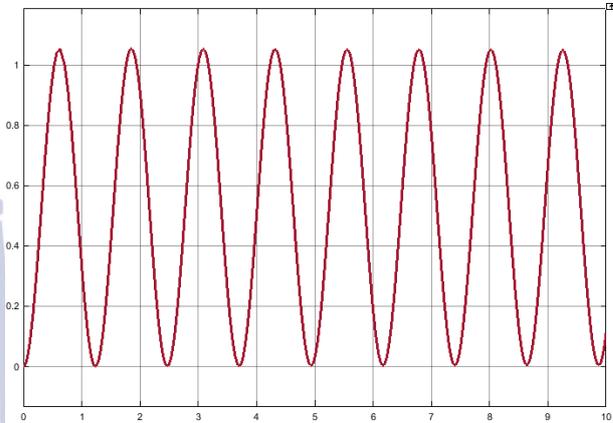
### HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui respon sistem terhadap kendali ANFIS yang telah dibuat, dilakukan simulasi dengan menggunakan Simulink pada Matlab. Bentuk pengujian yang dilakukan pada sistem kendali posisi sudut *Aero Pendulum* dengan kendali ANFIS yaitu pengujian sistem tanpa kendali, pengujian menggunakan kendali ANFIS dengan beberapa sudut (*Setpoint*), Pengujian dengan perubahan sudut (*Setpoint*), Pengujian dengan diberikan beberapa gangguan.

Berdasarkan simulasi terhadap rangkaian simulink sistem *Aero Pendulum* tanpa kendali yang telah dilakukan. Didapatkan hasil simulasi sistem *Aero Pendulum* tanpa menggunakan kendali pada gambar berikut.



Gambar 13. Diagram Blok Aero Pendulum

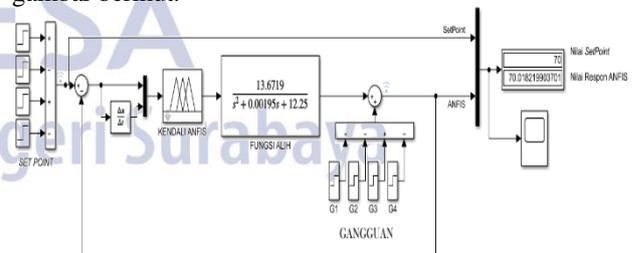


Gambar 14. Respon Aero Pendulum

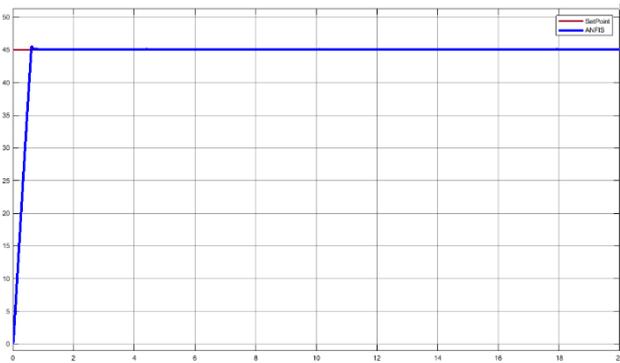
Pada Gambar 14. Dapat dilihat bahwa respon sistem *Aero Pendulum* terus berosilasi dan tidak dapat mencapai nilai *setpoint* yang diberikan. Hal tersebut dikarenakan sistem memiliki faktor redaman ( $c$ ) yang sangat kecil. Maka dari itu diperlukan sistem kendali yang dapat memperbaiki respon dari sistem *Aero Pendulum*.

### Pengujian dengan Sudut Tetap

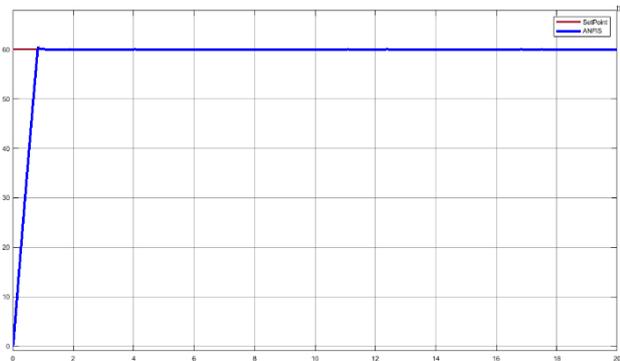
Untuk mengetahui hasil kinerja sistem kendali ANFIS pada *Aero Pendulum* yang telah dibuat, dilakukan simulasi menggunakan rangkaian simulink pada perangkat lunak Matlab. Untuk pengujian pertama dilakukan dengan menggunakan nilai *Setpoint* tetap. Untuk rangkaian simulink dan respon pengujian dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.



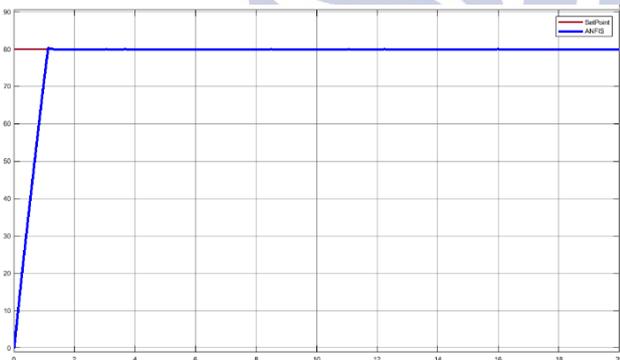
Gambar 15. Rangkaian ANFIS Aero Pendulum



**Gambar 16.** Respon sudut 45 derajat  
(Sumber : Dokumen Pribadi, 2021)



**Gambar 17.** Respon sudut 60 derajat



**Gambar 18.** Respon sudut 80 derajat

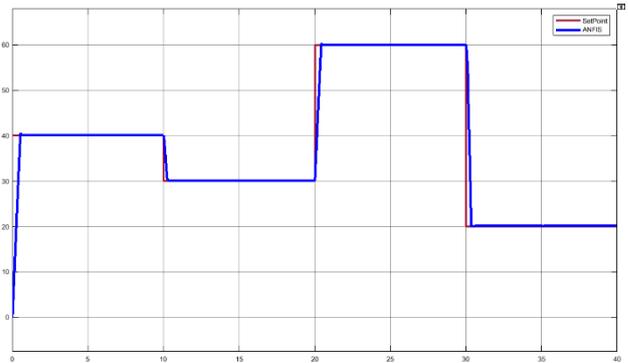
Dari simulasi pengujian yang telah dilakukan pada sudut 45, 60, dan 80 derajat, di dapatkan nilai-nilai respon percobaan pada Gambar 17, Gambar 18, Gambar 19. Dengan analisa respon sistem seperti pada Tabel 2 berikut.

**Tabel 2.** Analisa Simulasi Respon Sistem Aero Pendulum

Sudut	Tr (s)	Ts (s)	Tp (s)	Mo%	Ess%
45°	0,4738	0,5958	0,6204	1,0247	0,178
60°	0,5045	0,6080	0,6380	0,7162	0,075
80°	0,8903	1,1035	1,1484	0,4868	0,006

#### Pengujian dengan Perubahan Sudut

Simulasi berikutnya yaitu pengujian dengan menggunakan perubahan *setpoint*. Pada pengujian ini diberikan *setpoint* 40°, 30°, 60°, 20°. Berdasarkan simulasi yang dilakukan, didapatkan hasil grafik respon seperti pada gambar berikut.



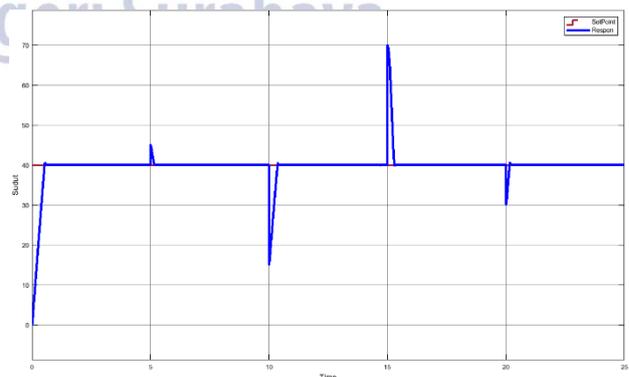
**Gambar 19.** Respon Sistem Perubahan Sudut

Berdasarkan simulasi pengujian dengan perubahan sudut yang telah dilakukan, didapatkan hasil seperti pada Gambar 19. Dari simulasi yang telah dilakukan sistem dapat mencapai sudut 40° dengan nilai Tr sebesar 0,4175 detik, Ts sebesar 0,5256 detik, dan *Overshoot* sebesar 1,1609%. Saat terjadi penurunan sudut ke 30° sistem dapat menyesuaikan dengan penurunan sudut dengan nilai Tr sebesar 0,1887 detik, Ts sebesar 0,2593 detik, dan tidak mengalami *overshoot*. Saat terjadi kenaikan sudut ke 60°, sistem dapat mencapai sudut tersebut dengan Tr sebesar 0,2393 detik, Ts sebesar 0,3538 detik, dan *overshoot* sebesar 0,75%. Dan saat terjadi penurunan sudut ke 20°, sistem dapat turun dan mencapai sudut tersebut dengan Tr sebesar 0,2393 detik, Ts sebesar 0,3538d etik, dan *overshoot* sebesar 1,0215%.

Dapat diketahui dari data yang ada, sistem lebih baik dan lebih cepat menyesuaikan saat terjadi penurunan *setpoint*. Hal itu dapat dilihat dari lebih kecilnya dilai Ts, Tr, dan *overshoot* saat terjadi penurunan *setpoint*.

#### Pengujian Dengan Menggunakan Gangguan

Simulasi terakhir yaitu dengan menggunakan gangguan, berupa perubahan sudut secara cepat pada satu waktu. Gangguan yang diberikan sebesar +5° pada detik 5, -25° pada detik 10, +30° pada detik 15, dan gangguan terakhir sebesar -10° pada detik 20. Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan grafik respon sistem seperti pada gambar berikut. Dapat dilihat bahwa sistem cepat dalam menyesuaikan keadaan saat adanya gangguan dengan nilai yang kecil hingga besar.



**Gambar 20.** Respon Sistem dengan Gangguan

**Perbandingan Hasil dengan Penelitian Sebelumnya**

Untuk mengetahui tingkat keberhasilan penelitian ini, akan dilakukan perbandingan hasil terhadap penelitian terdahulu. Penelitian-penelitian tersebut antara lain, penelitian menggunakan kendali PID *Ziegler-Nichols* (Romadhon. 2019). Penelitian selanjutnya menggunakan ANFIS LSE (Khoirudin. 2020). Penelitian juga dilakukan dengan menggunakan PID GA (Prasetyo. 2020). Penelitian terakhir yang menjadi perbandingan yaitu penelitian menggunakan *Fuzzy Logic Controller* (Kurniawan. 2020). Hasil perbandingan dapat dilihat pada tabel-tabel berikut ini.

**Tabel 3.** Perbandingan Hasil dengan Penelitian Sebelumnya pada Sudut 45°

Sudut	Kendali	Parameter				
		Tr (s)	Ts (s)	Tp (s)	Mo (%)	Ess (%)
45°	PID ZN	5,421	7,40	8,264	2,44	0,069
	ANFIS LSE	0,68	1,26	0,72	2,75	-
	PID GA	4,054	3,38	5,28	8,89	0,017
	ANFIS Hybrid	0,47	0,59	0,620	1,02	0,17

**Tabel 4.** Perbandingan Hasil dengan Penelitian Sebelumnya pada Sudut 60°

Sudut	Kendali	Parameter				
		Tr (s)	Ts (s)	Tp (s)	Mo (%)	Ess (%)
45°	PID ZN	4,99	6,81	7,81	3,27	0,196
	ANFIS LSE	0,46	1,31	0,94	1,63	-
	PID GA	4,26	7,46	5,24	8,33	0,031
	Fuzzy	0,7	0,87	-	-	0,057
	ANFIS Hybrid	0,504	0,61	0,638	0,71	0,075

Berdasarkan nilai-nilai parameter pada Tabel 3 dan Tabel 4, di ketahui bahwa sistem kendali ANFIS *Hybrid* yang dibuat pada penelitian ini dapat memperbaiki respon dari penelitian-penelitian sebelumnya. Hal itu dapat dilihat pada sudut 45°, kendali ANFIS *Hybrid* memiliki nilai Tr yang kecil, dan memiliki nilai Ts, Tp yang paling kecil dibanding penelitian sebelumnya. Pada perbandingan hasil sudut 60°, kendali ANFIS *Hybrid* memiliki Tr, dan Ess% yang kecil, dan nilai Ts, Tp, dan Mo% yang paling kecil dibanding penelitian-penelitian sebelumnya.

**PENUTUP**

**Simpulan**

Merujuk pada nilai hasil simulasi yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa sistem *Aero Pendulum* menggunakan pengendali *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) berhasil dirancang dan dapat mengendalikan posisi sudut sistem dengan baik. Simulasi yang dilakukan dengan menggunakan *software* Matlab. Dalam merancang kendali ANFIS digunakan 361 data yang diambil dari fuzzy acuan. Berdasarkan simulasi terhadap *Aero Pendulum* dengan menggunakan kendali ANFIS, sistem memiliki kemampuan *self stabilizing control*. Berdasarkan simulasi percobaan yang telah dilakukan, didapatkan hasil respon yang merujuk pada Tabel 2, respon terbaik sistem didapat pada *setpoint* 80° dengan nilai *rise time* (tr) sebesar 0,8903 detik, nilai *settling time* (ts) sebesar 1,1484 detik, nilai *maximum overshoot* (mo) sebesar 0,4868%, dan nilai *error steady state* (ess) sebesar 0,006%. Dapat diketahui juga sistem *Aero pendulum* menggunakan kendali ANFIS mampu mengatasi perubahan *setpoint* dan gangguan yang ada. Selain itu kendali ANFIS metode *Hybrid* pada penelitian ini memiliki hasil simulasi yang lebih baik dibandingkan beberapa penelitian terdahulu.

**Saran**

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, terdapat saran dari penulis yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian sistem kendali posisi sudut pada *Aero Pendulum* selanjutnya. Untuk selanjutnya dapat menggunakan kendali gabungan (*Hybrid*) ANFIS dengan kendali lainnya. Kendali *Hybrid* yang dapat digunakan misalnya sistem kendali PID-ANFIS, PSO-ANFIS, dan lain-lain untuk menghasilkan respon sistem yang lebih cepat juga stabil.

**DAFTAR PUSTAKA**

Al-Hmouz, A., Shen, J., dkk. (2012). *Modeling and simulation of an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) for mobile learning*. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 5(3), 226–237.

Flower Queen, P., Sasi Kumar, M., dkk. 2012. *ANFIS technique applied to the control of a robot manipulator with disturbances*. *Procedia Engineering*, 38 (2012).

Ghasemi, R., Khoygani, M. R. R. 2014. *Designing intelligent adaptive controller for nonlinear pendulum dynamical system.*, *International Journal of Computer, Information, Systems and Control Engineering* Vol:8 No:11, 2014.

- Hanafy, T. O. S. 2011. *Design and validation of real time neuro fuzzy controller for stabilization of pendulum-cart system*. Universitas Al-Azhar, Mesir. Life Science Journal, 8(1), 52–60.
- Jaedun, A. 2011. *Metodologi Penelitian Eksperimen*. Fakultas Teknik. Universitas Negeri Yogyakarta.
- Jang, J. S. R. (1993). *ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 23(3), 665–685.
- Kharola, A. 2016. *A PID Based ANFIS & Fuzzy Control of Inverted Pendulum on Inclined Plane (IPIP)*. Graphic Era University, India. International journal on smart sensing and intelligent systems Volume 9, Nomor 2.
- Khoirudin, Mochamad Masnur. 2020. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Menggunakan Pengendali Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*. Jurnal Teknik Elektro. Univesitas Negeri Surabaya, Volume 09 Nomor 03 Tahun 2020. Halaman 587-595
- Kurniawan, Fandik Agung. 2020. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Berbasis Fuzzy Logic Controller dengan Software LabVIEW*. Universitas Negeri Surabaya. Jurnal Teknik Elektro. Volume 09 Nomor 03 Tahun 2020. Halaman 625 – 632.
- Omar, B. A. A., Haikal, A. Y. M., dkk. 2011. *Design adaptive neuro-fuzzy speed controller for an electro-mechanical system*. Universitas Mansoura Mesir, Ain Shams Engineering Journal, 2(2), 99–107.
- Prasetyo, Muhammad Eko. 2020. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Berbasis PID Metode Genetic Algorithm Optimization dengan Software LabVIEW*. Universitas Negeri Surabaya. Jurnal Teknik Elektro. Volume 09 Nomor 03 Tahun 2020. Halaman 597-604.
- Romadhon, Aris Dwi. 2019. *Desain Sistem Pengaturan Posisi Sudut Aero Pendulum Menggunakan Pengendali Pid Berbasis Labview*. Universitas Negeri Surabaya. Jurnal Teknik Elektro, Volume 08 Nomor 03 Tahun 2019, 637 – 645.
- Sharhan, Amr A. , Ahmed, T Hafez. 2019. *UAV Brushless DC motor Speed Control via Adaptive Neuro Fuzzy Inference Systems (ANFIS) and Self-Adaptive PID*. Military Technical College, Cairo, 11766, Egypt. AIAA Scitech 2019 Forum, 10.2514/6.2019-1563.
- Singh, Yogesh., Kumar, A., dkk. 2013. *Design of ANFIS controller based on fusion function for linear inverted pendulum*. Advances in Intelligent Systems and Computing, 174 AISC, 379–386.
- UNESA. 2000. *Pedoman Penulisan Artikel Jurnal*, Surabaya: Lembaga Penelitian Universitas Negeri Surabaya.
- Wang, Jia-Jun. 2011. *Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers*. Simulation. , Universitas Hangzhou Dianzi, China. Science Direct Journal, 19(1), 440–449.