

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**DESAIN KENDALI *TUNING* PID MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC*
UNTUK PENGENDALIAN POSISI SUDUT
PADA AERO PENDULUM**

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh :

NADA RAHMI ZAMRA

11850522346

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU
PEKANBARU**

2022



LEMBAR PERSETUJUAN

DESAIN KENDALI *TUNING* PID MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC*
UNTUK PENGENDALIAN POSISI SUDUT
PADA *AERO PENDULUM*

TUGAS AKHIR

Oleh:

NADA RAHMI ZAMRA

11850522346

Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro
 di Pekanbaru, pada tanggal 19 Juli 2022

Pembimbing I

Putut Son Maria, S.ST., M.T
 NIK. 130508079

Pembimbing II

Halim Mudia, S.T., M.T
 NIK. 130517053

Ketua Prodi Teknik Elektro

Dr. Zulfatri Aini, S.T., M.T
 NIP. 19721021 200604 2 001

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PENGESAHAN
DESAIN KENDALI TUNING PID MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC
UNTUK PENGENDALIAN POSISI SUDUT
PADA AERO PENDULUM

TUGAS AKHIR

Oleh:

NADA RAHMI ZAMRA
11850522346

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
 sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
 Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
 di Pekanbaru, pada tanggal 19 Juli 2022

Pekanbaru, 19 Juli 2022

Mengesahkan,



Dekan



Dr. Hartono, M.Pd
 NIP. 19640301 199203 1 003

Ketua Program Studi
Teknik Elektro



Dr. Zulfatri Alni, ST, MT
 NIP. 19721021 200604 2 001

DEWAN PENGUJI :

Ketua	: Dr. Liliana, ST.,M.Eng	
Sekretaris	: Putut Son Maria, S.ST.,MT	
Anggota	: Hallim Media, ST.,MT	
Anggota	: Jufrizel, ST., MT	
Anggota	: Ahmad Fatzal, ST.,MT	



LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau adalah terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta pada penulis. Referensi kepustakaan di perkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kebiasaan ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

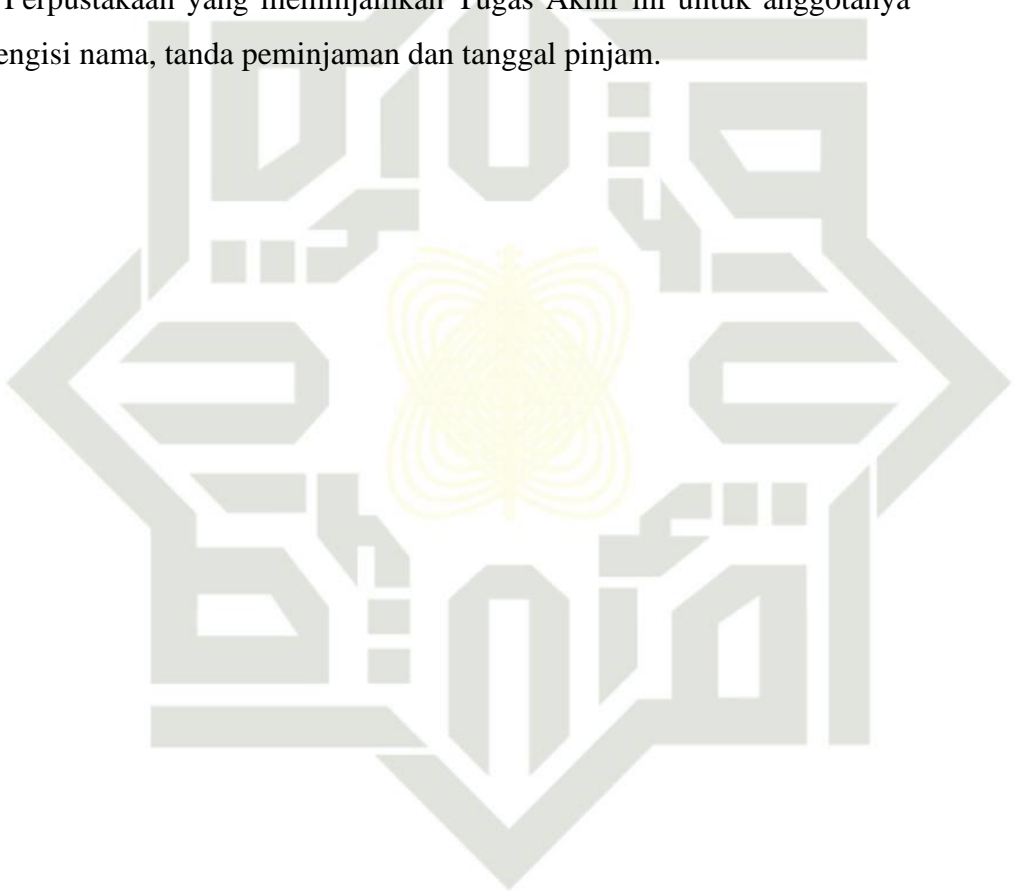
Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

© Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang meminumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



UIN SUSKA RIAU

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Nada Rahmi Zamra
 NIM : 11850522346
 Tempat, Tgl. Lahir : Kototinggi, 24 Mei 2000
 Fakultas/Pascasarjana : Sains dan Teknologi
 Prodi : Teknik Elektro
 Judul Tugas Akhir :

DESAIN KENDALI TUNING PID MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC UNTUK
 PENGENDALIAN POSISI SUDUT PADA AERO PENDULUM

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa:

1. Penulisan tugas akhir dengan judul sebagaimana tersebut di atas adalah hasil pemikiran dan penelitian saya sendiri.
2. Semua kutipan pada karya tulis saya ini sudah disebutkan sumbernya.
3. Oleh karena itu tugas akhir saya ini, saya nyatakan bebas dari plagiat.
4. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat dalam penulisan tugas akhir saya tersebut, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan perundang-undangan.

Demikianlah Surat Pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran dan tanpa paksaan dari pihak manapun juga.

Pekanbaru, 28 Juli 2022
 Yang membuat pernyataan



Nada Rahmi Zamra
 NIM 11850522346

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Dengan menyebut nama Allah yang maha pengasih lagi maha penyayang

Barang siapa yang menghendaki kehidupan dunia, maka wajib baginya berilmu, dan barangsiapa yang menghendaki kehidupan akhirat, maka wajib baginya berilmu, dan barang siapa yang menghendaki keduanya, maka wajib baginya berilmu.

(HR. Tirmidzi)

Terima Kasih Ya Allah...

Sembah sujud serta syukurku kepada-Mu ya Allah, zat yang Maha Pengasih namun tak pernah pilih kasih dan Maha Penyayang yang kasih sayang-Nya tak terbilang. Engkau zat yang Maha membolak-balikkan hati, teguhkanlah hati ini di atas agama-Mu ya Allah. Lantunan sholawat beriring salam penggugah hati dan jiwa, menjadi persembahan penuh kerinduan pada sosok panutan umat, pembangun peradaban manusia yang beradab Nabi Besar Muhammad SAW.

Niscaya Allah akan mengangkat (derajat) orang-orang yang beriman diantaramu dan orang-orang yang diberi ilmu beberapa derajat.

(QS: Al-Mujadilah 11)

Ku persembahkan karya ini untuk Ayahanda tercinta, sosok pejuang dalam hidupku yang tak pernah mengenal kata lelah apalagi mengeluh serta Ibunda tersayang, malaikat tanpa sayap dalam hidupku yang tak kenal waktu siang dan malam selalu menjaga dan melindungi hingga aku bisa sampai seperti sekarang ini, Adik-adik tercinta, seluruh keluarga serta sahabat dan seluruh keluarga besar teknik elektro UIN SUSKA RIAU yang doanya senantiasa mengiringi setiap derap langkahku dalam meniti kesuksesan.

Dan katakanlah: "Ya Tuhan-ku, masukkan aku ketempat masuk yang benar dan keluarkanlah (pula) aku ketempat keluar yang benar dan berilah aku disisi-Mu kekuasaan yang dapat menolongku."

(QS: Al-Isra 80)

/ **Nada Rahmi Zamra** |

| 19 Juli 2022 |

DESAIN KENDALI *TUNING* PID MENGGUNAKAN *FUZZY LOGIC* UNTUK PENGENDALIAN POSISI SUDUT PADA *AERO PENDULUM*

NADA RAHMI ZAMRA

NIM: 11850522346

Tanggal Sidang: 19 Juli 2022

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Aero pendulum adalah pendulum mekanik yang memiliki baling-baling pada salah satu ujungnya (lengan bebas) dan ujung lainnya berada pada satu titik tetap. Permasalahan yang terjadi pada *aero pendulum* adalah sulitnya mempertahankan posisi stabil, hal ini terbukti dari hasil respon *open loop* pada *plant aero pendulum* masih memiliki *overshoot*, osilasi dan *error steady state* pada respon keluarannya. *Aero pendulum* perlu dijaga dalam posisi stabil agar terbang UAV atau biasa disebut *drone* dapat stabil. Oleh karena itu, diperlukan pengendali untuk menghasilkan posisi sudut yang stabil dan sesuai dengan setpoint. Pada penelitian ini digunakan pengendali *Tuning* PID menggunakan *Fuzzy Logic* guna mengatasi permasalahan yang terjadi. Hasil penelitian dianalisa dari hasil grafik respon keluaran pada simulasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa respon keluaran yang dihasilkan mampu mencapai setpoint dan mampu bertahan dalam keadaan stabil. Dan hasil terbaik pada posisi sudut *aero pendulum* yaitu pada sudut 45° menghasilkan $t_s = 0.466$ detik, $t_r = 0.343$ detik, $t_d = 0.125$ detik, $mp = 0.08\%$ dan $ess = 0.0000063^\circ$.

Kata Kunci: *Aero Pendulum*, sudut, *Tuning* PID menggunakan *Fuzzy Logic*

**Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang**

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

**CONTROL DESIGN PID TUNING USING FUZZY LOGIC
FOR ANGLE POSITION CONTROL
ON AERO PENDULUM**

NADA RAHMI ZAMRA

NIM : 11850522346

Date of Final Exam : July 19th, 2021

Department of Electrical Engineering

Faculty of Science of Technology

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Soebrantas St. Number. 155 Pekanbaru

ABSTRACT

Aero pendulum is a mechanical pendulum that has a propeller at one end (free arm) and the other end is at a fixed point. The problem that occurs in the aero pendulum is the difficulty of maintaining a stable position, this is evident from the results of the open loop in aero pendulum plant that still has overshoot, oscillation and steady state error in the output response. The aero pendulum needs to be kept in a stable position so that the UAV's flight or so-called drone can be stable. Therefore, a controller is needed to produce a stable angle position and in accordance with the setpoint. In this study, tuning PID Fuzzy Logic to overcome the problems that occur. The results of the study were analyzed from the results of the output response graph in the simulation. The simulation results show that the resulting output response is able to reach the setpoint and is able to survive in a stable state. And the best results at the aero pendulum, namely at an angle of 45° produce $t_s = 0.486$ seconds, $t_r = 0.315$ seconds, $t_d = 0.103$ seconds, $mp = 0\%$ and $ess = 0.00000007^\circ$.

Keywords : *Aero Pendulum, angle, PID tuning using Fuzzy Logic*



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT, yang telah mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Shalawat dan salam juga penulis haturkan kepada baginda Rasulullah SAW, sebagai seorang sosok pemimpin dan suri tauladan bagi seluruh umat di dunia yang patut di contoh dan di teladani bagi kita semua. Atas ridho Allah SWT penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul “Desain Kendali *Tuning* PID Menggunakan *Fuzzy Logic* Untuk Pengendalian Posisi Sudut Pada *Aero Pendulum*”.

Melalui proses bimbingan dan pengarahan yang disumbangkan oleh orang-orang yang berpengetahuan, dorongan, motivasi, dan juga do'a orang-orang yang ada di sekeliling penulis sehingga penulisan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan penuh kesederhanaan. Sudah menjadi ketentuan bagi setiap Mahasiswa yang ingin menyelesaikan studinya pada perguruan tinggi UIN SUSKA Riau harus membuat karya ilmiah berupa Tugas Akhir guna mencapai gelar sarjana.

Oleh sebab itu sudah sewajarnya penulis menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Teristimewa Ayahanda Zamrefrizal dan Ibunda Susi Erawati, Abangnda Rian Akbar Zamra, dan Adik Lutfi Ibnu Zamra yang telah memberikan semangat, motivasi, dukungan moril maupun materil dan doa kepada penulis serta keluarga besar penulis yang selalu mendoakan penulis.
2. Bapak Prof. Dr. Khairunnas, M.Ag selaku Rektor UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh staf dan jajarannya.
3. Bapak Dr. Hartono, M.Pd selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau beserta kepada seluruh Pembantu Dekan, Staf dan jajarannya.
4. Ibu Dr. Zulfatri Aini, S.T, M.T selaku ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.
5. Bapak Sutoyo, S.T, M.T selaku sekretaris Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi UIN SUSKA Riau.
6. Bapak Putut Son Maria, S.ST., MT dan Bapak Halim Mudia, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna sehingga penulis menjadi lebih mengerti dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.


Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

7. Bapak Ahmad Faizal, ST.,M.Eng selaku dosen pengampu mata kuliah Tugas Akhir yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran yang sangat membangun terhadap penulis.
8. Ibu Rika Susanti, ST.,M.Eng selaku Dosen Pembimbing Akademik selama perkuliahan penulis dari semester 1 hingga semester 8 ini yang tidak pernah bosan mengingatkan, memberi semangat, serta motivasi.
9. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Teknik Elektro yang telah memberikan bimbingan dan curahan ilmu kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Ibu Dr. Liliana, St.,M.Eng selaku Ketua Sidang Tugas Akhir, bapak Jufrizel S.T, M.T selaku penguji 1, bapak Ahmad Faizal, S.T, M.T selaku penguji 2 yang telah memberikan saran dan masukan sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
11. Orang orang spesial dan tersayang (Wawa, Nika, Tika, Jihan, Rezza, Ima, Salsa, Ai, Tama, Gia, Iban, Dini, Putri, Cecen, Apip, Farhan, Eksal, Udin, Surya, Farel, Adrian, bang iqbal, kak ina, bang rehan bang pikram, bang kia) dan lain sebagainya yang tidak bisa disebutkan satu persatu selaku teman seperjuangan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini dan telah banyak membantu penulis dalam berbagai hal dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
12. Ibu Dian Mursyitah, ST.,MT yang insya Allah sebentar lagi akan bergelar Dr beserta keluarga yang berkenan kepada Penulis dan teman-teman seperjuangan untuk menjaga rumah sehingga Penulis dan teman-teman dapat menghemat uang bulanan. Semoga bantuan yang telah diberikan baik moril maupun materil mendapat balasan pahala dari Allah SWT, dan sebuah harapan dari penulis semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca semua pada umumnya.
 Penulis menyadari bahwa dalam pembuatan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan kemampuan, pengalaman, dan pengetahuan penulis. Untuk itu penulis mengharap kritik dan saran dari semua pihak yang bersifat positif dan membangun demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Pekanbaru, 19 Juli 2022

Penulis,

Nada Rahmi Zamra

NIM.11850522346



DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	ii
PURAT PERNYATAAN	Error! Bookmark not defined.
PALAMAN PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK	vi
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR RUMUS	xv
DAFTAR LAMBANG	xvi
DAFTAR SINGKATAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang	I-1
1.2 Rumusan Masalah	I-3
1.3 Tujuan Penelitian	I-4
1.4 Batasan Masalah	I-4
1.5 Manfaat penelitian	I-4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	II-1
2.1 Penelitian Terkait	II-1
2.2 Landasan Teori	II-2
2.2.1 <i>Aero pendulum</i>	II-2
2.2.2 Motor <i>Brushless DC</i>	II-3
2.2.3 Model Matematika <i>Aero Pendulum</i>	II-4
2.2.4 Identifikasi Sistem	II-7
2.3 Sistem Kendali	II-8
2.3.1 Pengendali Proportional Integral Derivative (PID)	II-9
2.4 Logika <i>Fuzzy</i>	II-9
2.4.1 Himpunan <i>Fuzzy</i>	II-10
2.4.2 Fungsi Keanggotaan	II-10

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2.4.3	Fuzzifikasi	II-12
2.4.4	Interferensi <i>Fuzzy</i> (Logika Pengambilan Keputusan)	II-13
2.4.5	Defuzzifikasi.....	II-15
2.4.6	Model <i>Fuzzy</i> Mamdani	II-15
2.4.7	Motode Heuristik.....	II-16
2.5	Matlab (<i>Matrix Laboratory</i>)	II-16
BAB III METODE PENELITIAN.....		III-1
3.1	Proses Alur Penelitian.....	III-1
3.2	Tahapan Penelitian.....	III-2
3.3	Pengumpulan Data.....	III-3
3.4	Pemodelan Matematis <i>Aero Pendulum</i>	III-3
3.5	Verifikasi Model Matematis	III-4
3.6	Skenario Penelitian	III-5
3.7	Perancangan Pengendali	III-5
3.7.1	Perancangan Pengendali <i>Tuning</i> PID	III-5
3.7.2	Perancangan Pengendali <i>Tuning</i> PID menggunakan <i>Fuzzy Logic</i>	III-7
3.7.3	Perancangan Pengendali <i>Tuning</i> PID Menggunakan Logika <i>Fuzzy</i> dengan Gangguan Sinyal Kendali.....	III-11
3.1	Data Penelitian yang Akan Dianalisa	III-12
BAB IV HASIL DAN ANALISA		IV-Error! Bookmark not defined.
4.1	Gambaran Umum Analisa.....	IV-Error! Bookmark not defined.
4.2	Analisa Sistem Posisi Sudut <i>Aero Pendulum</i> Secara <i>Open Loop</i>	IV-Error! Bookmark not defined.
4.3	Analisa Sistem Posisi Sudut <i>Aero Pendulum</i> dengan pengendali <i>Tuning</i> PID Menggunakan <i>Fuzzy Logic</i>	IV-Error! Bookmark not defined.
4.3.1	Analisa Pengendali <i>Tuning</i> PID Menggunakan <i>Fuzzy Logic</i> Pada Sudut 45°	IV-Error! Bookmark not defined.
4.3.2	Analisa Pengendali <i>Tuning</i> PID Menggunakan <i>Fuzzy Logic</i> pada Sudut 70°	IV-Error! Bookmark not defined.
4.3.3	Analisa Pengendali <i>Tuning</i> PID Menggunakan <i>Fuzzy Logic</i> pada Sudut 90°	IV-Error! Bookmark not defined.
4.4	Analisa Kestabilan Pengendali <i>Tuning</i> PID menggunakan <i>Fuzzy Logic</i> dalam pencapaian <i>setpoint</i> pada <i>Aero Pendulum</i>	IV-Error! Bookmark not defined.
4.4.1	Pengendali Dengan Gangguan Pada Sudut 45°	IV-Error! Bookmark not defined.
4.4.2	Pengendali Dengan Gangguan Pada Sudut 70°	IV-Error! Bookmark not defined.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

4.4.3	Penegndali Dengan Gangguan Pada Sudut 90°	IV-Error! Bookmark not defined.
4.5	Analisa Perbandingan Respon Keluaran.....	IV-Error! Bookmark not defined.
BAB V PENUTUP		V-1
5.1	Kesimpulan	V-1
5.2	Saran	V-1

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



UIN SUSKA RIAU

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2. 1 Diagram Sistematis <i>Aero Pendulum</i> [12]	II-2
Gambar 2. 2 Motor <i>Brushless Dc</i>	II-3
Gambar 2. 3 Blok diagram <i>aero pendulum</i>	II-6
Gambar 2. 4 Respon Waktu Orde Dua[10]	II-7
Gambar 2. 5 Blok diagram controller PID	II-9
Gambar 2. 6 Representasi Linear Naik[11]	II-11
Gambar 2. 7 Representasi Linear Turun[11]	II-11
Gambar 2. 8 Fungsi Keanggotaan Kurva Segitiga[11].....	II-12
Gambar 2. 9 Representasi Trapesium[11]	II-12
Gambar 2. 10 Contoh Fuzzifikasi[11]	II-12
Gambar 2. 11 Respon Grafik Pada Bidang Fase[20].....	II-14
Gambar 2. 12 Simbol Matlab R2016a	II-16
Gambar 2. 13 tampilan model <i>Simulink</i> pada Matlab	II-17
Gambar 2. 14 Kotak Dialog <i>Simulink Library</i>	II-18
Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> penelitian.....	III-1
Gambar 3. 2 Blok <i>Simulink Open Loop Aero pendulum</i>	III-4
Gambar 3. 3 Grafik <i>Open Loop Aero Pendulum</i>	III-4
Gambar 3. 4 Rangkaian <i>Simulink PID Tuning</i>	III-5
Gambar 3. 5 Tampilan blok <i>PID controller</i>	III-6
Gambar 3. 6 Tampilan <i>PID Tuner</i>	III-6
Gambar 3. 7 Nilai E dan De	III-7
Gambar 3. 8 Tampilan <i>Fuzzy logic</i>	III-7
Gambar 3. 9 Fungsi keanggotaan <i>input error</i>	III-8
Gambar 3. 10 Fungsi keanggotaan <i>input delta error</i>	III-8
Gambar 3. 11 Fungsi keanggotaan <i>output 1 Kp</i>	III-9
Gambar 3. 12 fungsi keanggotaan <i>output 2 Ki</i>	III-9
Gambar 3. 13 Fungsi keanggotaan <i>output 3 Kd</i>	III-10
Gambar 3. 14 Rangkaian <i>Simulink Pengendali PIDFuzzy</i>	III-11



1. Di larang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Di larang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. 15 Rangkaian *Simulink* Pengendali PIDFuzzy..... III-11

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1 Spesifikasi <i>aero pendulum</i> [6].....	II-6
Tabel 2 Basis aturan <i>Fuzzy</i> dengan tiga nilai linguistik (N, Z, P)[20]	II-14
Tabel 3 Kriteria Fuzzifikasi yang sering kali dipakai [11].....	II-15
Tabel 1 Spesifikasi <i>aero pendulum</i> [6].....	III-3
Tabel 1 Hasil respon waktu secara <i>open loop</i>	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 2 Heuristic penalaan nilai Kp, Ki, dan Kd.....	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 3 Hasil respon waktu dengan pengendali <i>Tuning Pid</i> menggunakan <i>Fuzzy logic</i> pada sudut 45°	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 4 Heuristic penalaan nilai Kp, Ki, dan Kd.....	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 5 Hasil respon waktu dengan pengendali <i>Tuning Pid</i> menggunakan <i>Fuzzy logic</i> pada sudut 70°	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 6 Hasil respon waktu dengan pengendali <i>Tuning Pid</i> menggunakan <i>Fuzzy logic</i> pada sudut 90°	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 7 Hasil respon waktu dengan pengendali <i>Tuning Pid</i> menggunakan <i>Fuzzy logic</i> pada sudut 90°	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 8 Hasil respon waktu dengan pengendali <i>Tuning Pid</i> menggunakan <i>Fuzzy logic</i> pada sudut 45°	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 9 Hasil respon waktu dengan pengendali <i>Tuning Pid</i> menggunakan <i>Fuzzy logic</i> pada sudut 70°	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 10 Hasil respon waktu dengan pengendali <i>Tuning Pid</i> menggunakan <i>Fuzzy logic</i> pada sudut 90°.....	IV-Error! Bookmark not defined.
Tabel 4. 11 Perbandingan respon keluaran.....	IV-Error! Bookmark not defined.



DAFTAR RUMUS

- 1. Persamaan sistem
- 2. Persamaan sistem
- 3. Penurunan Persamaan Fungsi Alih Sistem
- 4. Penurunan Persamaan Fungsi Alih Sistem
- 2.5. Gaya Angkat
- 2.6. Bentuk Persamaan Fungsi Alih
- 2.7. Fungsi Alih Sitem *Aero Pendulum*
- 2.8. Persamaan Transformasi Z
- 2.9. *overshoot* maksimum
- 2.10. Persamaan Himpunan *Fuzzy*
- 3.1. *transfer function Aero Pendulum*

© Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

Hak Cipta Dilindungi

Undang-Undang

Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

UIN SUSKA RIAU



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

(s)

Undang-Undang

1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

37

38

DAFTAR LAMBANG

- = Sudut (Derajat)
- = Sudut dalam domain waktu (*Laplace*)
- = Kecepatan sudut (rad/s)
- = Percepatan sudut (rad/s²)
- = Momen Inersia (kg.m²)
- = Percepatan gravitasi (m/s²)
- = Berat bandul (kg)
- = Panjang Lengan (m)
- = Koefisien redaman (kg. m²/s)
- = Jarak ujung lengan ke titik tumpu (m)
- = Kecepatan putaran baling-baling motor (rad/s/V)
- = Gaya angkat yang dihasilkan dari motor *brushless* DC (Nm/kg)
- = Tegangan dalam domain waktu yang diberikan ke motor *brushless* DC (Volt)
- = Fungsi Alih Pemodelan Sistematis
- = *Gain overall*
- = Frekuensi alami tak teredam
- = Rasio peredaman

UIN SUSKA RIAU

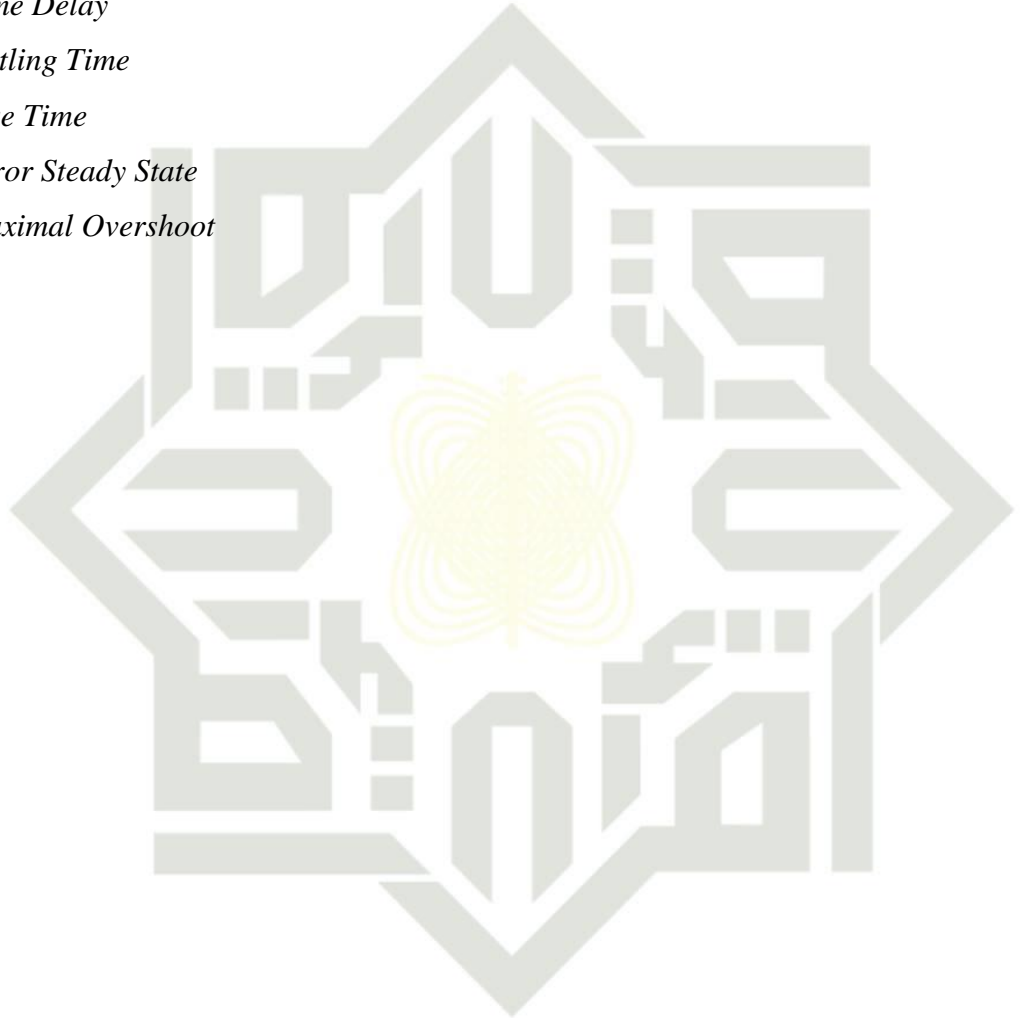


Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 ID
 ATLAB
 P
 U
 Ess
 Mp

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR SINGKATAN

- = *Proportional Integral Derivative*
- = *Matrrix Laboratrory*
- = *Time Delay*
- = *Settling Time*
- = *Rise Time*
- = *Error Steady State*
- = *Maximal Overshoot*



UIN SUSKA RIAU



- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang meminum dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Sistem merupakan factor penting pada *aero pendulum* saat posisi sudut yang diinginkan. Oleh sebab itu diperlukan pengendali yang mampu meredam *ess* dan mengurangi *overshoot* serta mencapai keadaan stabil dalam permasalahan kestabilan ini. Penambahan pengendali *proportional Integral Derivative* (PID) dapat digunakan untuk mendapatkan kinerja yang lebih baik pada *aero pendulum*. Menurut referensi[10] menunjukkan bahwa PID mengandung konstanta *proportional* (P) yang dapat mempercepat respon waktu sistem, pengendali *integral* (I) dapat mereduksi *ess* pada sistem sehingga respon sistem tidak mengalami osilasi dan *derivative* (D) dapat menurunkan atau meredam *Overshoot*.

Self-tuning fuzzy control adalah algoritma *fuzzy* yang dapat beradaptasi dengan perubahan. Kelebihan ini cocok diterapkan pada *aero pendulum* karena memiliki karakteristik yang rentan terhadap perubahan *setpoint*. Teknik pengontrolan menggunakan logika *fuzzy* ini memiliki cara yang lebih sederhana dalam memberikan keputusan seperti halnya manusia berfikir, dengan menafsirkan data dan mencari solusi yang lebih tepat. Logika *fuzzy* dapat mengatasi sistem non linier dan juga dapat bekerja sama dengan teknik kendali secara konvensional, serta desain yang lebih sederhana dan mudah diterapkan[11]. Terbukti dari penelitian yang dilakukan oleh Roedy Kristiyono dan Wiyono[8] dan penelitian oleh Pardoman Andre, dkk[9] pengendali PID menggunakan logika *fuzzy* dapat memperbaiki respon *transient* dan *steady state*. Pengendali yang telah diterapkan juga dapat mengatasi gangguan yang terjadi secara tiba-tiba dan perubahan *setpoint* dengan mencari nilai k_p , k_i dan k_d yang tepat.

Pada penelitian ini peneliti menggunakan *desain* kontroler *Tuning PID Fuzzy Logic*, metode *fuzzy* yang digunakan adalah *mamdani* dan nilai K_p , K_i dan K_d diatur dengan metode *heuristic*. Berdasarkan permasalahan penulis tertarik untuk mengaplikasikan “**Desain kendali Tuning PID Menggunakan Fuzzy Logic untuk Pengendalian Posisi Sudut Pada Aero Pendulum**”. Penelitian dilakukan dengan skenario pertama pengujian simulasi secara *open loop* dengan *setpoint* 45° , lalu pengujian simulasi dengan menggunakan pengendali PID *tuning* logika *fuzzy* dengan *setpoint* yang diberikan 45° , 70° dan 90° . Kemudian pengujian pengendali terhadap gangguan sinyal kendali 6% dan 8% tujuan untuk menguji apakah sistem pengendali ini tetap mampu mengikuti perubahan *setpoint* yang diberikan dan mampu meredam *overshoot* ataupun *ess*.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana merancang model *fuzzy* yang sesuai dari *men-tuning* masing-masing konstanta P, I dan D?

Bagaimana menentukan kombinasi konstanta P, I dan D terbaik untuk meminimalisir *overshoot* dan *error steady state*?

Bagaimana performansi pengendali dalam menangani gangguan sinyal kendali yang diberikan?

Tujuan Penelitian

Menghasilkan model *fuzzy logic* yang dapat memberikan respon waktu optimal sebagai pengendali *aero pendulum*.

Mendapatkan kombinasi konstanta PID terbaik untuk meminimalisir *overshoot* dan *error steady state*.

Menganalisa respon keluaran *plant* setelah diberikan pengendali *Tuning PID* menggunakan *Fuzzy Logic* dan menganalisa saat diberi gangguan.

1.4 Batasan Masalah

1. Pemodelan matematis dari *aero pendulum* dan *setpoint* berdasarkan penelitian sebelumnya[6].
 2. Metode *fuzzy* yang digunakan yaitu *fuzzy mamdani*.
 3. Penentuan lebar fungsi keanggotaan *fuzzy* menggunakan *tuning PID*.
 4. Gangguan sinyal kendali berupa perubahan sudut pada sistem sebesar 6% dan 8%.
 5. Pada penelitian ini tidak membahas *hardware*
 6. Perancangan dan simulasi menggunakan MATLAB 2016a.
- Analisis dilakukan hanya berdasarkan data hasil simulasi.

1.5 Manfaat penelitian

Menghasilkan sebuah rancangan sistem kendali yang baik untuk mengendalikan posisi sudut pada *aero pendulum*.

Dapat menjadikan referensi untuk pengaplikasiannya pada proses industri dan memberikan kemudahan dalam penyelesaian permasalahan umum yang terjadi pada proses pengendalian posisi sudut pada *aero pendulum*.

Sebagai referensi tambahan untuk penelitian-penelitian selanjutnya

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1 Penelitian Terkait

Pada penelitian Tugas Akhir ini, penulis melakukan literatur berupa pencarian materi dan referensi sesuai dengan masalah terkait dengan masalah yang akan dipecahkan. Beberapa penelitian terkait adalah sebagai berikut.

Penelitian tentang *aero pendulum* yang dilakukan oleh [6] dengan pengendali PID metode Genetic Algoritma (GA) *optimization* dengan nilai $K_p = 0.91$; $K_i = 6.529$; $K_d = 0.65$ pada *setpoint* 45° menghasilkan data analisis respon *settling time* (t_s) = 3.379 detik, *time delay* 1,457 detik dan *rise time* (t_r) = 0,054 detik. Namun hasil respon masih memiliki *error steady state* (ess) = 0.0116% [6]. Lalu Penelitian lain terkait *aero pendulum* yang telah dilakukan untuk menstabilkan posisi sudut dengan kendali PID pada sistem Labview dengan tuning *Tyres-Luyben* yaitu $K_p = 0,0313$, $K_i = 0.355$ dan $K_d = 0.002$ dan respon yang terbaik berada pada *setpoint* 60° , dengan $t_p = 129.65$ detik, $t_d = 14,49$ detik, $t_r = 45,95$ detik, $t_s = 62,74$ detik. Namun respon pada sistem ini memiliki *overshoot* maksimum ($M_o\%$) = 60,8% dan *Error Steady State* (ess) = 0,1% [4]. Penelitian tentang *Aero Pendulum* lain telah dilakukan seperti pada penelitian [1] bertujuan untuk mengendalikan sudut dengan menggunakan kontroler *Adaptive neuro Fuzzy Inference System* (ANFIS) didapatkan pada *setpoint* 80° dengan *rise time* (t_r) = 0,8903 detik, *settling time* (t_s) = 1,1035 detik, waktu puncak (T_p) = 1,1484 detik, *overshoot* maksimum ($M_o\%$) = 0,4868%, dan nilai *Error Steady State* ($Ess\%$) = 0,006% [1]. Pengendalian sudut pada *aero pendulum* telah dilakukan juga dengan menggunakan pengendali LQG, menghasilkan respon *output* sebagai berikut $t_d = 0.3099$ detik, $t_s = 0.4295$ detik, $t_r = 0.3934$, namun masih terdapat *overshoot* maksimum ($M_p\%$) yang tinggi yakni 47.64% [7].

Penelitian lain yang bertujuan memaksimalkan kendali PID secara langsung dengan memperhatikan apa saja perubahan pada *plant* dan gangguan yang muncul pada saat menggunakan kendali fuzzy dan diujikan pada motor BLDC yang termasuk sistem nonlinier. Pada penelitian ini dilakukan pengujian pada motor BLDC dengan beban dan tanpa beban serta perubahan *setpoint*. Dari hasil penelitian tersebut diambil kesimpulan bahwa proses pengendali kontrol sistem tuning PID dengan logika *fuzzy* bisa meningkatkan kinerja dari kendali PID, dan dapat dibuktikan dengan hasil respon keluaran yang stabil. Namun masih dengan aturan *fuzzy* yang cukup banyak dengan 49 aturan [8].

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

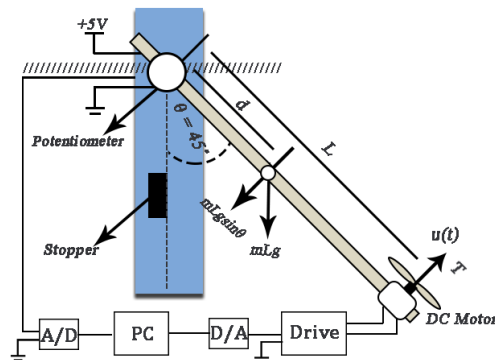
Penelitian lain yang bertujuan mengendalikan *steam drum boiler* dengan menggunakan kendali *self tuning fuzzy PI*, dengan variabel yang diamati berupa ketinggian air serta temperatur uap. Menunjukkan bahwa penggunaan kendali Self Tuning Fuzzy PI sanggup mengadaptasi parameter P serta I pada kendali PI konvensional, sehingga sistem tetap bisa bekerja optimal walaupun terjadi gangguan pada sistem. Dari hasil simulasi menampilkan bahwa pengendali dapat bekerja maksimal dengan meminimalisir *overshoot* serta error steady state pada tiap variabel yang dikendalikan. Pengendali tersebut pula bisa menanggulangi pergantian *setpoint* dengan mencari nilai k_p serta k_i yang cocok untuk sistem [9].

Dari penelitian yang telah dilakukan, sebagian sistem sudah dianalisa menggunakan beberapa pengendali, tetapi masih ada *ess* serta hasil respon sistem yang belum maksimal terdapatnya *Overshoot*. Berdasarkan studi literatur, pengendali *tuning* PID menggunakan logika *fuzzy* cukup baik dalam memperbaiki respon *transient* pada sistem. Mengenai pengendalian sudut pada *aero pendulum* masih belum ada menggunakan pengendali tersebut. Oleh karena itu, penulis ingin meneliti pengontrol *Tuning* PID menggunakan logika *fuzzy* untuk mengatasi *ess* dan *overshoot* untuk mendapatkan respon *transient* yang optimal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Aero pendulum

Aero pendulum adalah pendulum mekanik yang memiliki baling-baling pada salah satu ujungnya (lengan bebas) [4] yang berfungsi sebagai penggerak batang ke sudut yang diinginkan dan ujung lainnya berada pada satu titik tetap.



Gambar 2. 1 Diagram Sistematis *Aero Pendulum* [12]

Pada sistematis *aero pendulum* pada gambar 2.1 $u(t)$ diatas merupakan kontrol dan sudut yang terletak di antara lengan bandul dengan sumbu vertikal adalah variabel kontrol. Saat tegangan telah ditetapkan, baling-baling pada bandul akan berputar dan menghasilkan

Hak Cipta dilindungi undang-undang

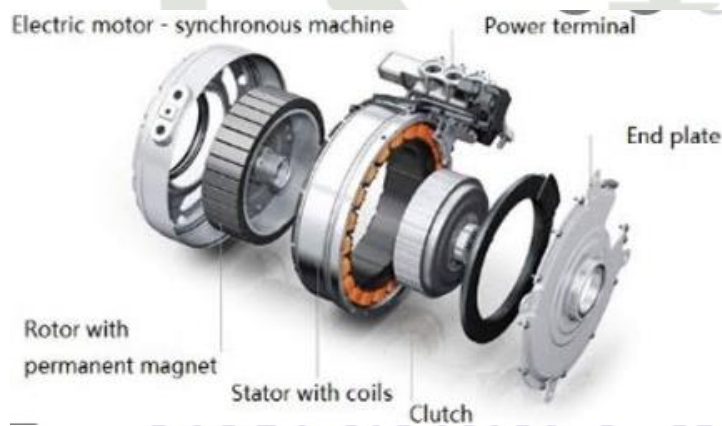
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

sebagai puncak pendulum. Bandul digerakkan oleh motor BLDC[12], merupakan motor arus searah. Motor DC didefinisikan sebagai sistem yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi gerak. Prinsip kerjanya dengan membalikkan gelombang *phase* yang memiliki nilai positif dengan komutator, sehingga arus akan bertukar arah dengan kumparan yang bergerak di dalam medan magnet pada motor.

Pada gambar 2.1 diatas juga terdapat komponen yang bernama *stopper* yang berfungsi sebagai pembatas lengan bandul agar tidak terjadi keluaran sistem yang melewati sudut negatif pada saat *aero pendulum* beroperasi. Peran *stopper* juga dapat dilihat pada hasil keluaran yang didapatkan, *stopper* akan menjaga lengan bandul yang bergerak menuju sudut negatif pada *aero pendulum*.

2.2.2 Motor Brushless DC

Motor *brushless* dc adalah motor yang terdiri dari rotor dalam bentuk magnet permanen dan stator dalam bentuk gulungan. Medan magnet yang dihasilkan oleh rotor berputar pada frekuensi yang sama[13]. Tidak ada kontak fisik apapun antara stator dan rotor. Sensor hall melekat pada rotor dan digunakan sebagai perangkat pengindraan utama oleh sensor hall yang tertanam ke dalam stator[14]. Motor *brushless* dc ini bekerja dengan menggunakan prinsip gaya tarik antara dua magnet yang berlainan kutub atau gaya tolak antara dua magnet dengan kutub yang sama[15].



Gambar 2. 2 Motor *Brushless* Dc

Kelebihan motor *brushless* Dc ini adalah efisiensi yang tinggi, masa pakai yang lama, hemat biaya perawatan, karakteristik kecepatan versus torsi yang lebih baik, pengoperasian tanpa suara, dan rentang kecepatan yang lebih tinggi[13]. Namun pada motor *brushless* dc ini juga terdapat kekurangan yaitu biaya pembuatan mahal, kontroler mahal, dan sistem pengendalian yang rumit.



Motor BLDC merupakan motor tanpa *brush* berkecepatan tinggi yang dirancang khusus untuk penggerak pada quadcopter, Drone ataupun pesawat mainan. Motor ini bertipe motor brushless yang dimana casing luar berputar sementara di dalam tetap. Motor ini juga salah satu model yang populer di pasaran karena harganya yang murah[13].

Motor BLDC mampu bekerja pada saat stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fase. Dari arus yang lewat pada kumparan stator menimbulkan medan magnet (B), sehingga persamaan yang didapatkan[14].

$$B = \frac{\mu N i}{l} \tag{2.8}$$

Dimana:

- N = Jumlah lilitan
- i = Arus
- l = Panjang lilitan
- μ = Permeabilitas

Dengan arus AC 3 fase *sinusoidal* yang diberikan, nilai medan magnet dan polaritas setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Adapun yang ditimbulkan dari adanya perubahan polaritas dan besar medan magnet tiap kumparan yakni menciptakan medan putar magnet dengan kecepatan[14]

$$n_s = \frac{120f}{p} \tag{2.9}$$

Dimana:

- f = Frekuensi arus input
- p = jumlah pole rotor

2.2.3 Model Matematika Aero Pendulum

Dari gambar 2.1 baling-baling yang dibawahnya terdapat motor *brushless* DC akan berputar sehingga menghasilkan sebuah gaya dorong saat sistem diaktifkan lalu ditambahkan nilai *setpoint*. Hal inilah yang mampu mendorong untuk dilakukan pengontrolan terhadap sudut pada *aero pendulum* supaya sistem bergerak dengan stabil dalam mencapai *setpoint* yang ingin dicapai. Dari gaya dorong baling-baling membuat sistem terangkat dan terbentuklah sudut.

Dari persamaan yang digerakkan berdasarkan hukum Newton dan juga momentum sudut dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$J . \ddot{\theta} + \dot{\theta} + m_L . g . d . \theta = T \tag{2.1}$$

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Dari persamaan (2.1) kita lakukan transformasi *laplace* dengan domain (s), dimana persamaan akan berubah menjadi seperti berikut :

$$s^2\theta(s) + c.s\theta(s) + m_L.g.d\theta(s) = T(s) \tag{2.2}$$

Setelah didapatkan persamaan (2.2) pindah ruaskan, sehingga persamaan menjadi fungsi alih seperti persamaan berikut:

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{J.s^2 + c.s + m_L.g.d} \tag{2.3}$$

Dari fungsi alih yang didapatkan disederhanakan dengan cara melakukan pembagian persamaan dengan *J*, maka persamaan yang didapat menjadi :

$$\frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1/J}{s^2 + \frac{c}{J}.s + \frac{m_L.g.d}{J}} \tag{2.4}$$

Keterangan :

- θ = Sudut (Derajat)
- $\theta(s)$ = Sudut dalam domain waktu (*Laplace*)
- $\dot{\theta}$ = Kecepatan sudut (rad/s)
- $\ddot{\theta}$ = Percepatan sudut (rad/s²)
- J* = Momen Inersia (kg.m²)
- g* = Percepatan gravitasi (m/s²)
- m* = Berat bandul (kg)
- L* = Panjang Lengan (m)
- c* = Koefisien redaman (kg.m²/s)
- d* = Jarak ujung lengan ke titik tumpu (m)

Pergerakan pada *aero pendulum* dihasilkan dari putaran motor baling-baling dan tegangan masukan yang diberikan. Dari putaran maka dihasilkan gaya dorong sehingga persamaan harus dikalikan dengan kecepatan yang dihasilkan dari motor baling-baling. Sehingga didapatkan persamaan yang bisa dikendalikan.

$$T(s) = K_m . V \tag{2.5}$$

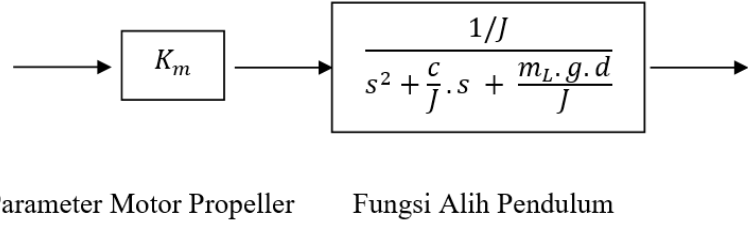
Keterangan:

- K_m = Kecepatan putaran baling-baling motor (rad/s/V)
- $T(s)$ = Gaya angkat dalam domain waktu yang dihasilkan dari motor *brushless* DC (Nm/kg)



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$V(s)$ = Tegangan dalam domain waktu yang diberikan ke motor *brushless* DC (Volt)
 $\theta(s)$ = Sudut rotasi dalam domain waktu yang diberikan ke motor *brushless* DC (rad)
 Blok diagram *aero pendulum* berdasarkan persamaan (2.4) dan (2.5) menjadi seperti gambar diagram blok di bawah.



Gambar 2. 3 Blok diagram *aero pendulum*

Dari blok diagram pada gambar 2.3 bentuk fungsi alih berubah menjadi :

$$\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K_m/J}{s^2 + \frac{c}{J}.s + \frac{m_L.g.d}{J}} \tag{2.6}$$

Sebelum menentukan fungsi alih sistem, diperlukan spesifikasi sebuah sistem. Tabel spesifikasi dari *plant aero pendulum* sebagai berikut.

Tabel 2. 1 Spesifikasi *aero pendulum*[6]

No.	Alat	Spesifikasi	Satuan
1.	Panjang Lengan (L)	0,4	m
2.	Momen Inersia (J)	0,0512	kg.m ²
3.	Koefisien Redaman (c)	0,0001	Kg.m ² /s
4.	Panjang Pusat Massa (d)	0,2	m
5.	Percepatan Gravitasi (g)	9,8	m/s ²
6.	Massa (m)	0,32	kg
7.	Koefisien Motor Propeller (Km)	0,7	$\frac{rad}{s}$

Dari spesifikasi yang telah dipaparkan pada tabel diatas, langkah selanjutnya yakni memasukkan nilai spesifikasi ke dalam persamaan (2.6). sehingga nilai fungsi alih yang didapatkan menjadi seperti berikut

$$G(s) = \frac{13.6719}{s^2 + 0.00195s + 12.25} \tag{2.7}$$

Keterangan:

$G(s)$ = Fungsi Alih Pemodelan Sistematis

2.4 Identifikasi Sistem

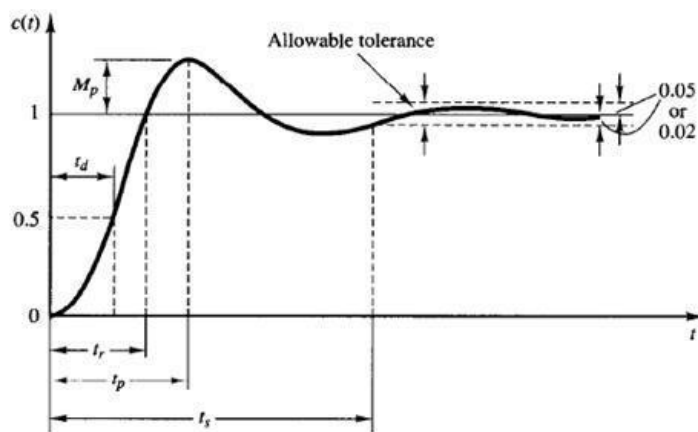
Sistem orde dua merupakan sistem fungsi alih dengan pangkat s yang tertinggi 2. Sistem dinyatakan dengan rasio redaman ζ , frekuensi alami tak teredam ω_n . Identifikasi sistem berdasarkan respon *transient* dan keadaan *open loop*, mengidentifikasi berdasarkan pengamatan grafis berdasarkan *setpoint*[16].

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \tag{2.8}$$

eterangan:

- = Gain overall
- ω_n = Frekuensi alami tak teredam
- ζ = Rasio peredaman

Sistem yang digunakan pada pengendalian *aero pendulum* merupakan sistem orde dua yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2. 4 Respon Waktu Orde Dua[10]

Berikut beberapa karakteristik respon orde dua yaitu[17]:

- a. Waktu tunda (*delay time*(t_d)) yaitu waktu yang diperlukan sistem untuk mencapai 50% dari nilai *steady state*, dari $t=0$. Waktu tunda menggambarkan besarnya aspek tunda reaksi yang diakibatkan oleh proses *sampling*.
- b. Waktu naik (*rise time*(t_s)) keluaran waktu yang menampilkan respon keluaran telah meningkat dari 5% hingga 95% dari nilai respon *steady state*.
- c. Waktu puncak (*peak time*(t_p)) yaitu waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan (*overshoot*) dari lewatan yang pertama.
- d. Lewatan puncak (*overshoot* (M_p)) yaitu harga lewatan puncak atau lewatan maksimum dari kurva respon yang diukur dari harga satu (100%).

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$\% \text{ overshoot maksimum} = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \tag{2.9}$$

- e. Waktu tunak (*settling time* (t_s)) yaitu waktu yang diperlukan kurva respon untuk mencapai dan menetap pada daerah pita toleransi antara 2%-5% dari harga akhirnya.
- f. Kesalahan tunak (*error steady state* (e_{ss})) yaitu kesalahan yang merupakan selisih antara keluaran yang sebenarnya dengan keluaran yang diharapkan.

$$E_{ss} = R_{ss} - C_{ss}$$

- Dimana:
- E_{ss} = Error Steady State
 - R_{ss} = Masukan sistem pada *steady state*
 - C_{ss} = Keluaran sistem pada *steady state*

2.3 Sistem Kendali

Sistem kendali disebut juga perintah, penyesuaian, serta perintah aktif serta dinamis. Perancangan sistem kendali merupakan pengendalian pengurutan ataupun mengorientasikan suatu elemen agar cocok atau sesuai yang ingin dicapai[18]. Sistem kontrol adalah hubungan atau berbagai komponen hidrolis, mekanik atau bahkan sosial, biologis, parameter keuangan dan variabel. Bertujuan untuk memperoleh fungsionalitas yang diinginkan secara cepat dan akurat. Majunya teori dan aplikasi kontrol otomatis saat ini menyediakan sistem dinamis dengan kinerja optimal, dan menyederhanakan operasi manual. Dampaknya banyak ilmuwan yang ahli dalam kontrol otomatis[10].

1. Variabel terkontrol (variabel terkontrol) dan variabel manipulasi (variabel yang dimanipulasi). Variabel terkendali adalah kuantitas atau kondisi yang diukur dan dikendalikan. Variabel terkontrol adalah kondisi atau suatu besaran yang berubah dalam kendali, sehingga mempengaruhi nilai dari variabel yang dikendalikan, sering disebut sebagai keluaran sistem.
 - Plant ialah peralatan dan instrumen atau bagian dari sistem yang dikendalikan. Proses merupakan prosedur dan mekanisme yang dikendalikan persis seperti pada *plant*.
 - Sistem, merupakan semua komponen yang berhubungan dan memiliki tujuan tertentu yang membentuk sebuah sistem.
 - Gangguan (*disturbance*). Gangguan ini disebabkan oleh sistem itu sendiri (*internal disturbance*) ataupun gangguan dari luar sistem (*external disturbance*).
 - Kendali umpan balik (*feedback control*). Saat adanya gangguan, perbedaan antara keluaran dengan masukan acuan sulit diprediksi yang mengakibatkan tujuan

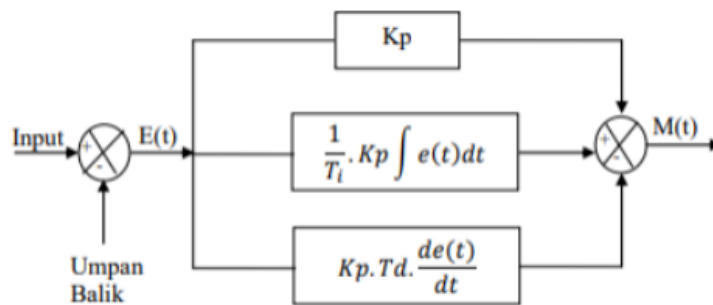


pengoperasian sebuah sistem tidak tercapai. Dengan demikian, diperlukan umpan balik keluaran untuk dibandingkan dengan masukan acuan sehingga selisih perbedaan dapat dikendalikan, diminimalkan secara otomatis.

3.1 Pengendali Proportional Integral Derivative (PID)

Kontroler PID merupakan gabungan tiga kontroler yaitu kontroler *Proportional*, *Integral*, dan *Derivative*. Controller PID masing-masing memiliki keunggulan tersendiri yaitu pada konstanta *proporsional* (P) yang dapat mempercepat respon waktu sistem, pengendali *integral* (I) dapat mereduksi *ess* pada sistem sehingga sistem tidak mengalami osilasi dan *derivative* (D) menurunkan atau meredam *Overshoot/undershoot*[10]. Pengendali *proportional* sering diberi tanda P pada sistem kendali PID. Pengendali P pada sistem dapat mempercepat *rise time* dan *settling time* pada respon *transient*, dapat menambah atau mengurangi tingkat kestabilan sistem, dan juga pengendali P dapat mengurangi *error steady state* sistem yang mana apabila ingin mengurangi *error* maka kita harus menaikkan nilai K_p nya tetapi apabila nilai K_p terlalu tinggi maka semakin tinggi *overshoot* yang dihasilkan dan respon sistem akan ber osilasi.

Pengendali *integral* (I) dapat menghilangkan *error steady state* pada sistem sehingga respon sistem tidak mengalami osilasi. Kekurangan pada pengendali I, apabila I terlalu tinggi maka akan membuat sistem tidak stabil dan memiliki *overshot*. Lalu pengendali *derivative* memiliki sifat seperti operasi diferensial pada umumnya. Pengendali D berfungsi sebagai peredam *overshoot* dan meningkatkan kestabilan pada sistem. Pengendali D memiliki kekurangan yang bisa menyebabkan *tr* pada sistem semakin lama, dan pengendali D ini tidak bisa berdiri sendiri.



Gambar 2. 5 Blok diagram kontroler PID[10]

2.4 Logika Fuzzy

Logika *fuzzy* adalah sistem cerdas yang ditemukan Lotfi A. Zadeh tahun 1965. Fungsi *fuzzy* adalah untuk membedakan suatu himpunan menurut derajat keanggotaan dari batas

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

tidak pasti. Teori himpunan ini merupakan pengembangan dari teori himpunan yang terdapat dalam logika yang tercipta dari cara manusia memahami suatu nilai yang tidak pasti[11]. Nilai keanggotaan *Fuzzy* tidak hanya bernilai 0 atau 1, tetapi juga menghasilkan besaran nilai yang terletak diantara 0 dan 1. Dalam perancangan kendali *fuzzy* dibagi menjadi tiga tahapan yaitu fuzzifikasi, sistem penalaran fuzzy dan defuzzifikasi. Hasil dari proses tersebut bergantung pada variabel *fuzzy*, batas himpunan *fuzzy*, dan variabel non-*fuzzy*[11].

Beberapa istilah yang perlu diketahui dalam memahami sistem *Fuzzy* yaitu[11] :

1. *Knowledge Base*, adalah aturan *fuzzy* dalam bentuk pernyataan IF-THEN,
2. *Fuzzification*, adalah proses untuk mengubah masukan sistem menjadi variabel yang bernilai kalimat menggunakan fungsi keanggotaan yang disimpan dalam basis pengetahuan *fuzzy*.
3. *Inference system*, adalah proses untuk mengubah masukan *fuzzy* menjadi keluaran *fuzzy* dengan cara mengikuti aturan IF-THEN yang telah ditetapkan pada basis pengetahuan *fuzzy*.

Defuzzification, berfungsi untuk mengubah keluaran *fuzzy* yang diperoleh *inference system* menjadi nilai tegas menggunakan fungsi keanggotaan yang sesuai dengan yang dilakukan *fuzzification*.

2.4.1 Himpunan *Fuzzy*

Himpunan *Fuzzy* adalah kelompok yang mewakili kondisi tertentu dalam variabel *fuzzy*. Variabel *fuzzy* adalah variabel yang akan dibahas dalam sistem *fuzzy*, seperti umur, temperature dll[11]. Dalam logika Boolean, seorang individu hanya dapat menempati satu himpunan, sedangkan dalam himpunan *fuzzy*, seorang dapat menjadi anggota dari dua himpunan yang berbeda. Dalam himpunan *fuzzy* nilai keanggotaan selalu berada antara 0 dan 1. Terdapat 2 atribut dalam himpunan *fuzzy*, sebagai berikut :

1. Linguistik merupakan penamaan sebuah kelompok yang mewakili situasi atau keadaan tertentu dengan menggunakan bahasa alami dingin, hangat, panas.
2. Numeris merupakan sebuah nilai yang memperlihatkan besar kecilnya suatu variabel. Seperti 10, 20, 45.

2.4.2 Fungsi Keanggotaan

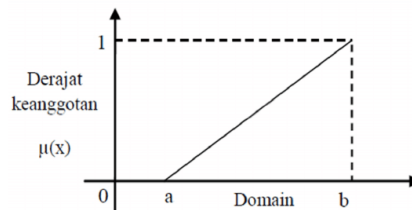
Fungsi keanggotaan adalah kurva yang menunjukkan keanggotaan setiap *input* dengan nilai internal dari 0 hingga 1. Metode fungsional merupakan salah satu metode yang dapat

digunakan untuk mendapatkan nilai keanggotaan. Derajat keanggotaan dalam suatu himpunan *Fuzzy* (*degree of membership*) dilambangkan dengan μ [11].

Ada lebih dari satu bentuk fungsi keanggotaan (*Membership Function*) pada sistem *Fuzzy*. Dalam penelitian ini, penulis hanya akan membahas fungsi keanggotaan yang akan digunakan dalam pemodelan sistem *fuzzy*, beberapa diantaranya adalah[11]:

1. Representasi Linear naik

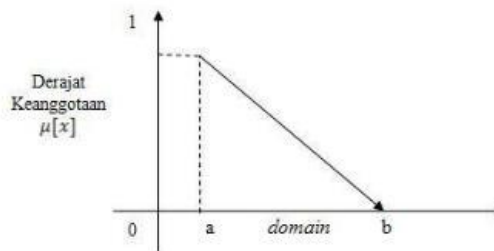
Kenaikan himpunan *Fuzzy* dimulai nilai domain pada derajat keanggotaan terendah, dan bergerak naik ke kanan menuju ke nilai derajat keanggotaan yang lebih tinggi digambarkan sebagai garis lurus



Gambar 2. 6 Representasi Linear Naik[11]

2. Representasi Linear Turun

Kebalikan dari representasi linear naik. Pada model ini kurva berbentuk garis lurus yang bergerak dari nilai tertinggi pada sebelah kiri menuju ke nilai keanggotaannya lebih rendah di sebelah kanan.



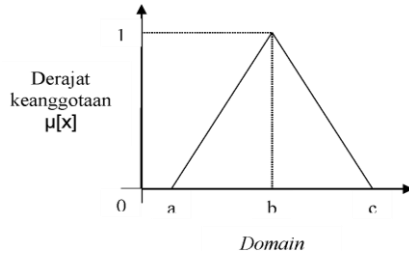
Gambar 2. 7 Representasi Linear Turun[11]

3. Representasi Segitiga

Merupakan bentuk representasi yang paling umum digunakan yang terdiri dari penggabungan antara dua garis linear yaitu representasi linear naik dan representasi linear turun.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

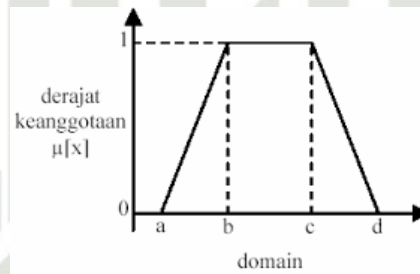
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 8 Fungsi Keanggotaan Kurva Segitiga[11]

4. Representasi Trapesium

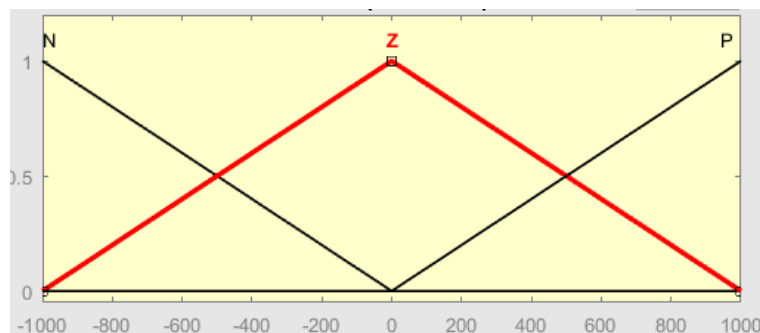
Hampir sama dengan kurva segitiga tapi yang membedakan terdapat anggota himpunan yang memiliki derajat keanggotaan bernilai satu di beberapa titik nilai keanggotaanya.



Gambar 2. 9 Representasi Trapesium[11]

2.4.3 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan suatu proses seluruh variabel *input/output* berupa nilai tegas diubah ke bentuk himpunan *fuzzy*. Rentang nilai variabel *input* dikelompokkan menjadi beberapa himpunan *Fuzzy* dan tiap anggota himpunan memiliki derajat keanggotaan tertentu. Derajat keanggotaan himpunan *Fuzzy* dapat dihitung dengan menggunakan rumus fungsi keanggotaan dari segitiga fuzzifikasi[18]. Untuk dapat menggunakan fuzzifikasi masukan dan keluaran harus terpenuhi dengan memperlihatkan ke dalam variabel *linguistic*[11].



Gambar 2. 10 Contoh Fuzzifikasi[11]

4.4 Interferensi *Fuzzy* (Logika Pengambilan Keputusan)

Interferensi *fuzzy* adalah suatu kerangka komputasi yang didasarkan pada teori himpunan *fuzzy*, aturan *fuzzy* JIKA-MAKA dan penalaran *fuzzy*. Struktur dasar dari sistem inferensi *fuzzy* terdiri dari 3 komponen, yaitu[11]:

- a. Basis Aturan (*Rule Base*) adalah aturan *fuzzy* JIKA-MAKA.
- b. Basis data yang fungsi keanggotaan digunakan dalam aturan *fuzzy*.
- c. Mekanisme penalaran yang menjalankan proses pengambilan keputusan berdasar aturan dan fakta diberikan untuk memperoleh keluaran atau kesimpulan.

Sistem *fuzzy* yang dihasilkan biasanya disebut sistem inferensi *fuzzy* (*fuzzy inference system* / FIS). Sistem ini telah berhasil digunakan di berbagai bidang seperti kesehatan, permesinan, analisis keputusan dan data karena kemampuannya yang fleksibel. Secara umum, ada tiga metode yang digunakan oleh FIS, yaitu Kanno, Tsukamoto dan Mamdani dan metode yang paling sering digunakan adalah mamdani. Metode-metode tersebut hampir sama, bedanya hanya dalam penentuan output FIS. Ada tiga tahapan untuk dapat menggunakan FIS yaitu, input akan dibuat menjadi angka samar dengan fuzzifikasi. Selanjutnya, setelah data sama dilakukan dengan pengolahan menggunakan mesin *inference system*. Terdapat tiga cara untuk melakukan inferensi sistem *Fuzzy*, yaitu *max*, *additive* dan *probabilistic OR* (*prob or*) sebagai berikut[11].

- a. Metode *max* (*Maximum*)

Didapatkan dengan cara mengambil nilai maximum, lalu menggunakannya untuk memodifikasi daerah *Fuzzy*, dan mengaplikasikannya ke *output* dengan menggunakan operator OR (union). Ketika digunakan fungsi implikasi *min*, maka metode komposisi ini sering disebut dengan nama *max-min* atau *min-max* atau *mamdani*.

- b. Metode *Additive* (*Max-Min*)

Pada metode ini, solusi himpunan *Fuzzy* didapat dengan cara melakukan *bounded-Max-Min* terhadap semua *output* daerah *Fuzzy*.

- c. Metode Probabilistik OR (*prob or*)

Pada metode ini, solusi himpunan *Fuzzy* diperoleh dengan cara melakukan *product* terhadap semua *output* daerah *Fuzzy*.

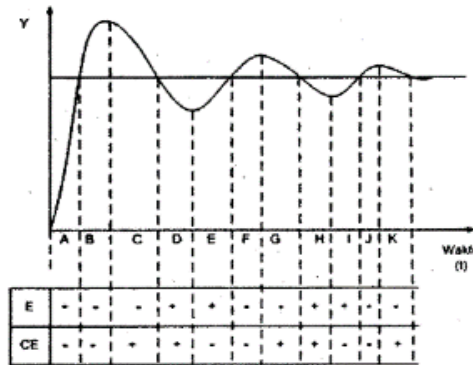
Terdapat 2 cara untuk menentukan *rule base* yaitu deterministic dan heuristic. Pendekatan heuristic dibuat berdasarkan respon kualitatif pada *plant* yang di simulasikan secara *open loop*. Salah satu referensi untuk membuat *rule base* dengan tujuan



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Memperpendek *rise time* dan meminimalkan *overshoot* dimana N (Negatif), Z (Zero), dan P



Gambar 2. 11 Respon Grafik Pada Bidang Fase[19]

Tabel 2. 2 Basis aturan *Fuzzy* dengan tiga nilai linguistik (N, Z, P)[19]

Aturan ke -	Error	Delta error	Output	Referensi	Fungsi
1	P	Z	P	Titik a, e, i	Memperpendek <i>rise time</i>
2	Z	N	N	Titik b, f, j	Mengurangi <i>overshoot</i>
3	N	Z	P	Titik c, g, k	Mengurangi <i>overshoot</i>
4	Z	P	P	Titik d, h, l	Mengurangi osilasi
5	Z	Z	Z	Setpoint	sistem berhenti
6	P	N	P	Rentang a,e	Memperpendek <i>rise time</i>
7	N	N	N	Rentang b,f,j	Mengurangi <i>overshoot</i>
8	n	P	N	Rentang c, g	Mengurangi <i>overshoot</i>
9	P	P	P	Rentang d, h	Mengurangi osilasi
10	P	N	Z	Rentang l	Sistem berhenti
11	N	P	Z	Rentang k	Sistem berhenti

Terdapat 3 aturan yang harus dipatuhi dalam merancang *rule base*, yaitu:

1. Kelengkapan
2. Kekonsistenan
3. Kekontinuan

Sedangkan untuk operasi implikasi dapat memilih antar menggunakan *or* atau *and*.



2.4.5 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi adalah proses kebalikan dari fuzzifikasi, defuzzifikasi berkerja dengan mengganti nilai samar pada *fuzzy* jadi nilai tegas dari masukan sistem. *Input* dari proses defuzzifikasi adalah himpunan *fuzzy* yang diperoleh dari kombinasi aturan *fuzzy*, dan keluaran yang dihasilkan berupa bilangan pada domain himpunan *fuzzy*. Jadi jika diberikan himpunan *fuzzy* dalam suatu range tertentu, harus dapat mengambil nilai yang diberikan (*Crisp*) sebagai keluarannya[11].

Ada beberapa bentuk metode Defuzzifikasi, yaitu [11] :

1. Metode *centroid (composite moment)*
Crisp diperoleh dengan mengambil titik pusat (z^*) daerah *Fuzzy*.
2. Metode *bisector*
Crips diperoleh dari nilai domain *fuzzy* yang mempunyai separuh nilai himpunan dari total keseluruhan himpunan daerah *fuzzy*.
3. Metode *largest of maximum (LOM)*
 Solusi *crisp* didapatkan dari nilai terbesar dari domain yang mempunyai nilai keanggotaan *maximum*.
4. Metode *smallerst of maximum (SOM)*
 Metode *crisp* didapatkan dari angka terkecil dari domain yang mempunyai nilai keanggotaan *maximum*.

Tabel 2.3 Kriteria Fuzzifikasi yang sering kali dipakai [11]

	COA	MOM	LOM	SOM	CEA
Kontinuitas	Baik	Kurang baik	Kurang baik	Kurang baik	Kurang baik
Disambiguitas	Baik	Baik	Baik	Baik	Kurang baik
Plausibilitas	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Ya
Komputasi	Kurang baik	Baik	Baik	Baik	Kurang baik

2.4.6 Model Fuzzy Mamdani

Model *Mamdani* sering juga dikenal dengan metode *sum*. Ebrahim Mamdani adalah orang yang memperkenalkan model tersebut di tahun 1975. Terdapat empat tahapan untuk mendapatkan *output*[11]:

1. Pembentukan Himpunan *Fuzzy*
 Variabel *input* dan *output* dibagi menjadi satu atau lebih himpunan *Fuzzy*.
2. Aplikasi Fungsi Implikasi

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang meminumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Fungsi implikasi yang digunakan adalah *min*.

3. Komposisi Aturan

Inferensi didapat dari kumpulan dan hubungan antar aturan. Terdapat tiga cara yang digunakan dalam melakukan inferensi sistem *Fuzzy*, yaitu *max*, *additive* dan *probabilistic OR (prob or)*.

4. Defuzzifikasi

Metode defuzzifikasi yang biasa digunakan adalah : *Centroid, Bisector, Mean of Maximum, Largest of Maximum atau Smallest of Maximum*.

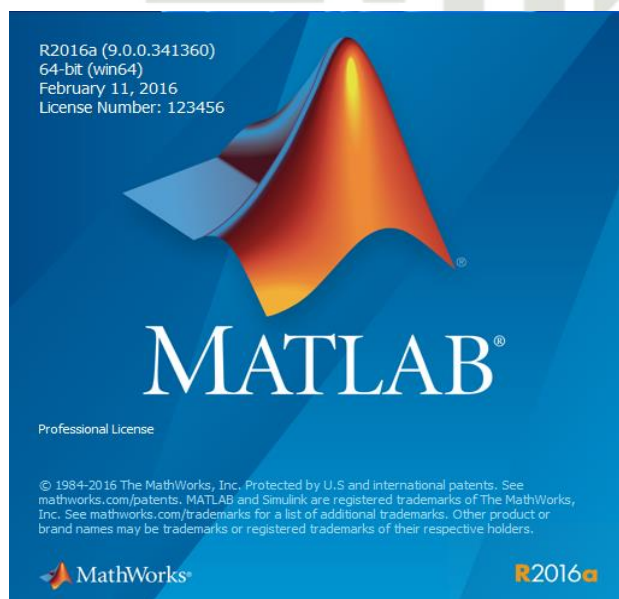
2.4.7 Metode Heuristik

Merupakan metode untuk memecahkan masalah menggunakan eksplorasi dengan *trial and error* untuk menemukan solusi melalui analisa yang diatur dengan merubah parameter sesuai dengan kerja sistem yang akan diatur. Pada pengendali *fuzzy* dilakukan dengan mencari nilai *Kp, Ki, dan Kd* yang digunakan sebagai *output* pada *fuzzy logic designer* hingga mendapat hasil respon keluaran yang baik. Lakukan tahap pengujian, dengan metode heuristic:

1. Penelahan parameter pengendali dimulai dengan menggunakan pengendali P.
2. Penelahan parameter pengendali ditambahkan pengendali I.
3. Penelahan parameter pengendali ditambahkan pengendali D.

Penelahan dilakukan hingga mencapai nilai parameter yang sesuai agar menghasilkan respon sistem yang diinginkan.

2.5 Matlab (Matrix Laboratory)



Gambar 2. 12 Simbol Matlab R2016a

Hak Cipta dan Hak Paten
 Hak Cipta dan Hak Paten
 Hak Cipta dan Hak Paten
 Hak Cipta dan Hak Paten
 Hak Cipta dan Hak Paten

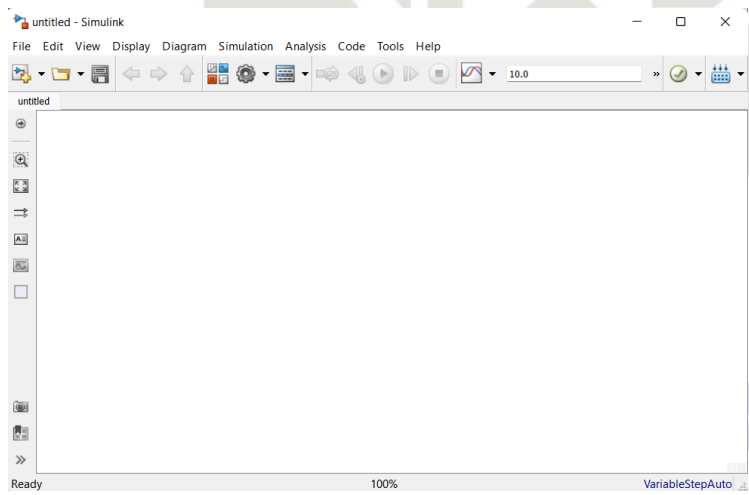
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mempublikasikan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Matlab (*Matrix Laboratory*) suatu pemrograman untuk analisis dan komputasi numerik. Disebut juga sebagai bahasa pemrograman matematika yang dibentuk dengan pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks[20]. Matlab adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh Mathworks Inc. Perangkat lunak ini menggunakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis matriks untuk teknik perhitungan numerik untuk memecahkan masalah yang melibatkan operasi matematika seperti elemen, matriks, optimasi, dan aproksimasi. Matlab banyak digunakan dalam matematika dan perhitungan, pengembangan dan algoritma, pemrograman pemodelan, simulasi, pembuatan prototipe, analisis data, eksplorasi dan visualisasi, analisis numerik dan statistik, pengembangan aplikasi teknik, dan bidang lainnya [20].

Terdapat bagian penting yang digunakan dalam menjalankan program pada matlab yaitu[20]:

1. *Common Window* untuk mengetik fungsi yang ingin dicari.
2. *Current Directory* untuk menampilkan isi dari direktori saat menggunakan Matlab
3. *Common History* untuk menampilkan yang dipakai sebelumnya dan bisa digunakan kembali.
4. *Workspace* untuk membuat variabel yang ada pada matlab.

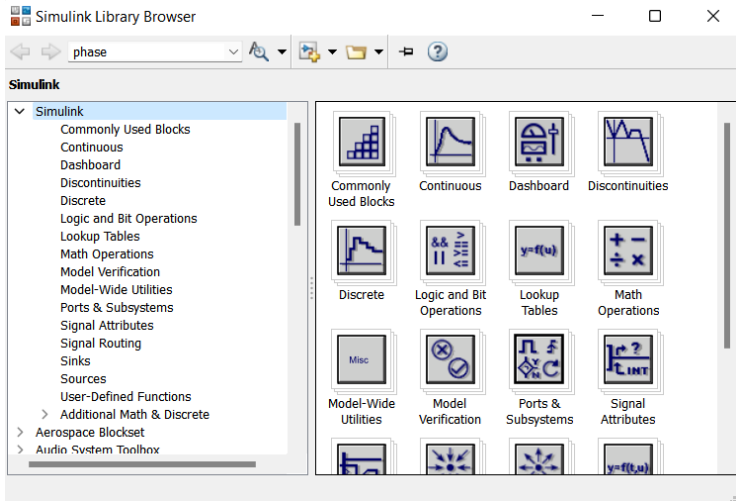
Dilakukan pemrograman modelling dan Simulink untuk mendapatkan hasil yang ingin dicapai. *Fitur* yang digunakan pada Matlab disebut *simulink*.



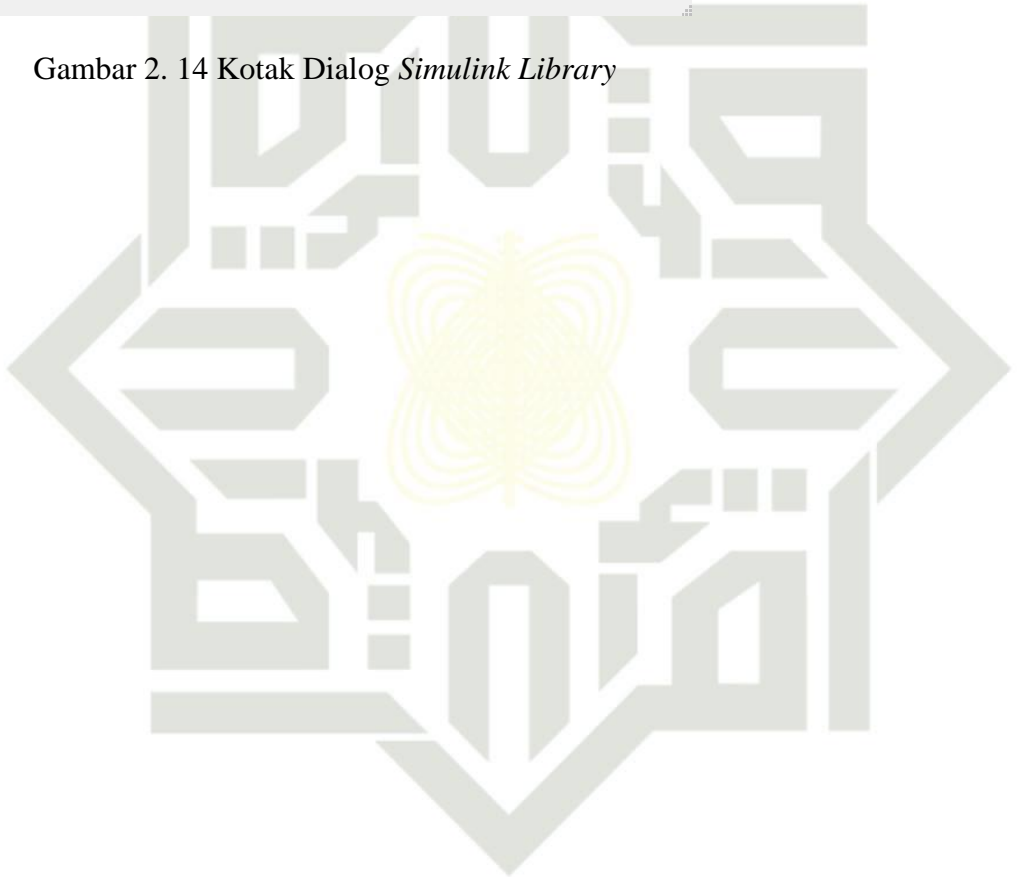
Gambar 2. 13 tampilan model *Simulink* pada Matlab

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2. 14 Kotak Dialog *Simulink Library*

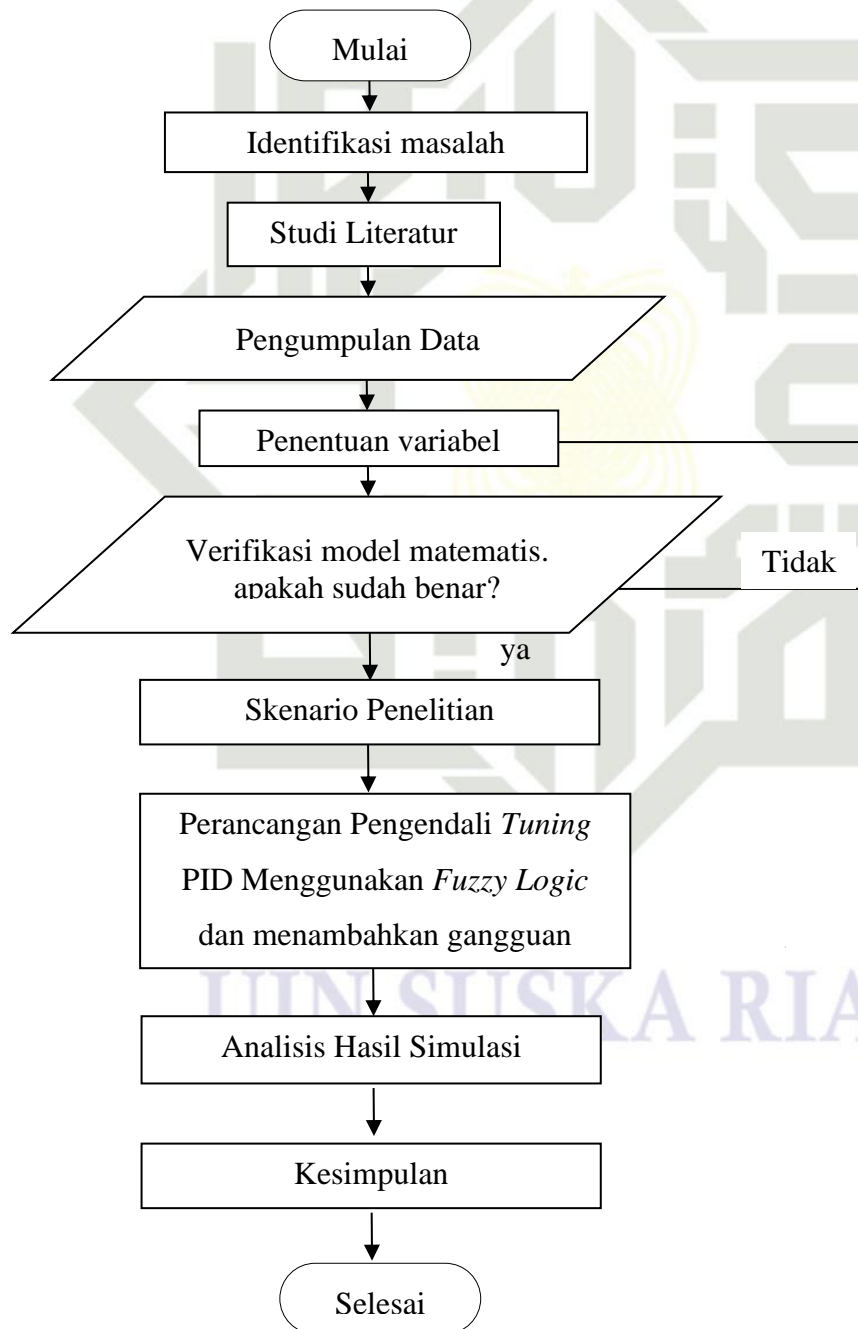


UIN SUSKA RIAU

BAB III METODE PENELITIAN

Proses Alur Penelitian

Pada penelitian tugas akhir ini peneliti melakukan tahapan yang dimulai dari judul, permasalahan masalah, tujuan yang diinginkan dari penelitian yang dilakukan, proses pemodelan matematis sistem, perancangan pengendali hingga mendapatkan hasil akhir dalam penelitian tugas akhir ini. Alur penelitian yang dilakukan dapat digambarkan melalui *flowchart* berikut.



Gambar 3. 1 *Flowchart* penelitian

- Hak Cipta Ditindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Tahapan Penelitian

Berdasarkan *flowchart* penelitian tersebut, untuk mencapai tujuan yang ingin dicapai ada beberapa tahapan yang harus dilakukan sebagai berikut :

1. Studi literatur

Tahap pertama mencari dan memahami penelitian sebelumnya dari beberapa referensi dari jurnal, buku *paper* dan lainnya. Hal yang dipelajari adalah pemodelan matematis *aero pendulum* pada pengendali *Self-tuning* PID dan metode logika *fuzzy*.

2. Identifikasi Masalah

Permasalahan yang akan diangkat pada penelitian Tugas Akhir ini yakni pengendalian sudut pada *aero pendulum* menggunakan pengendali *tuning* PID menggunakan *fuzzy* logic untuk mendapatkan respon yang stabil serta menghilangkan *ess* dan juga *overshoot*.

3. Pengumpulan Data

Dilakukan untuk mendapatkan karakteristik dari *plant* yang nantinya diteliti dan diketahui model matematis *Aero Pendulum* dalam bentuk *transfer function*.

4. Penentuan Variabel

Setelah nilai dari masing-masing variabel didapatkan, lalu variabel disubstitusikan ke dalam pemodelan matematis sistem dalam bentuk persamaan *transfer function* sebagai berikut :

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

5. Verifikasi Model Matematis

Verifikasi model matematis sistem adalah tahap pengujian model matematis dalam bentuk *transfer function* dari sistem yang sudah diubah ke dalam bentuk bahasa pemrograman Matlab *Simulink*.

6. Skenario penelitian

Penelitian ini menggunakan pengendali PID *Tuning*-logika *Fuzzy* yang diharapkan mampu mengendalikan *aero pendulum* dengan memasukkan data data yang didapatkan dari penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini dilakukan pengujian dengan melihat hasil simulasi, data yang diambil yaitu respon *transient* dari pengujian, yang dilakukan :

1. Pengujian simulasi secara *open loop* dengan *setpoint* 45° tanpa pengendali.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

3. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

2. Pengujian simulasi dengan menggunakan pengendali PID *tuning*-logika *fuzzy* dengan *setpoint* yang diberikan 45°, 70° dan 90°.
3. Pengujian pengendali terhadap gangguan sinyal kendali 6% dan 8%.

7. Perancangan Pengendali

Pada tahapan ini dilakukan perancangan pengendali *Tuning-PID* menggunakan *fuzzy logic* agar respon *output* sistem mampu mengikuti nilai *setpoint* yang didapatkan pada jurnal rujukan.

8. Analisa Hasil Simulasi

Setelah melakukan pengujian terhadap pengendali *Fuzzy* ditambah pengendali PID pada *plant*, kemudian dianalisa hasil dari *plant* setelah dan sebelum dipasang pengendali, apakah respon sistem sudah sesuai dengan tujuan.

9. Kesimpulan dan Saran

Setelah dilakukan analisa hasil dan sudah disinkronkan dengan tujuan, maka penelitian yang dilakukan berhasil lalu bisa ditarik kesimpulan dan juga memberikan saran sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

3.3 Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan cara mencari data apa saja yang dibutuhkan pada penelitian terkait, tujuannya agar dapat menentukan *setpoint* yang akan digunakan. Berdasarkan penelitian terkait telah dilakukan *review* bahwa *setpoint* yang digunakan yaitu 45°, 70°, dan 90°.

3.4 Permodelan Matematis Aero Pendulum

Untuk pemodelan matematis nilai-nilai parameter yang telah ditetapkan sebelumnya pada *aero pendulum* disubstitusikan ke dalam model matematis persamaan (2.6). adapun parameter pada *aero pendulum* yang digunakan yaitu :

Tabel 3.1 Spesifikasi *aero pendulum*[6]

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

7.	Koefisien Motor Propeller (Km)	0,7	$\frac{rad / s}{v}$
----	--------------------------------	-----	---------------------

Nilai nilai parameter yang telah didapatkan didesain kembali ke model matematis yang dimana berbentuk persamaan *transfer function* sebagai berikut :

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

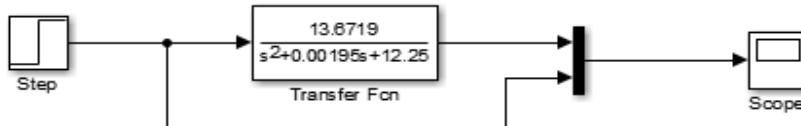
Maka diperoleh *transfer function* Aero Pendulum :

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{0.7}{s^2 + \frac{0.0001}{0.0512} \cdot s + \frac{0.32 \times 9.8 \times 0.2}{0.0512}}$$

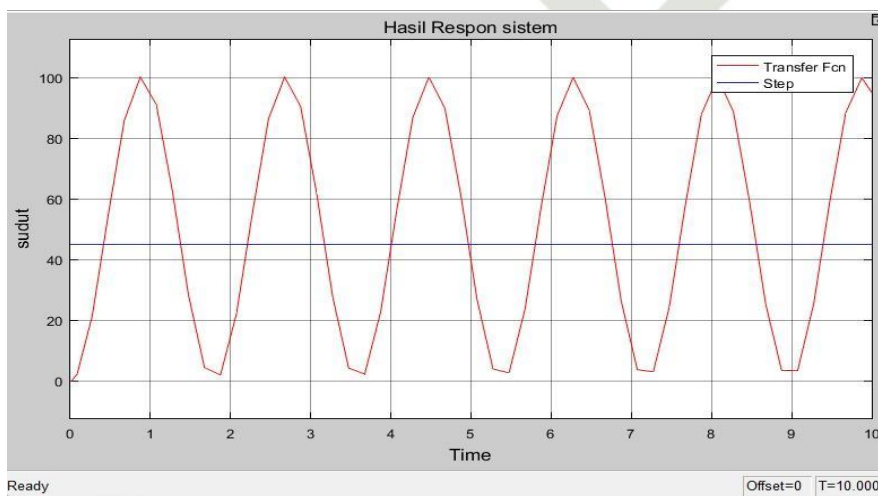
$$G(s) = \frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{13.6719}{s^2 + 0.00195s + 12.25} \quad (3.1)$$

3.5 Verifikasi Model Matematis

Pada tahap verifikasi model matematis pengujian *aero pendulum* yang telah dilakukan menggunakan *software Simulink* Matlab R2016a. Blok diagram dari simulasi yang telah dilakukan dengan cara menjalankan sistem secara *open loop* tanpa menggunakan pengendali dengan *setpoint* 45° yang bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari *aero pendulum* sebelum didesain dengan menggunakan pengendali.



Gambar 3. 2 Blok Simulink *Open Loop* Aero pendulum



Gambar 3. 3 Respon sistem *Open Loop* posisi sudut *aero pendulum*

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Hasil pengujian sistem secara *Open loop* tanpa pengendali di atas menunjukkan respon keluaran sistem tidak stabil dalam mencapai *setpoint*, terdapat osilasi dan juga adanya *overshoot* yang cukup besar. Sesuai dengan pengujian simulasi yang tidak menggunakan pengendali, maka *aero pendulum* perlu dikendalikan oleh pengendali yang mampu menghilangkan osilasi dan juga dapat menstabilkan sistem.

3.6 Skenario Penelitian

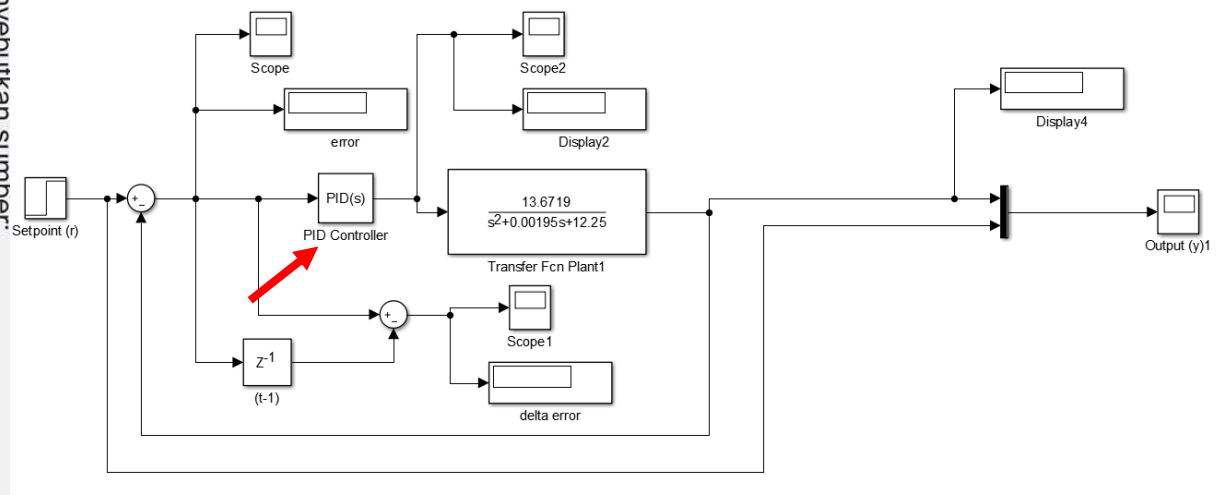
Penelitian ini menggunakan pengendali PID *Tuning*-logika *Fuzzy* yang diharapkan mampu mengendalikan *aero pendulum* dengan memasukkan data data yang didapatkan dari penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini dilakukan pengujian dengan melihat hasil simulasi, data yang diambil yaitu respon *transient* dari pengujian, yang dilakukan :

4. Pengujian simulasi secara *open loop* dengan *setpoint* 45° tanpa pengendali.
5. Pengujian simulasi dengan menggunakan pengendali PID *tuning*-logika *fuzzy* dengan *setpoint* yang diberikan 45°, 70° dan 90°.
6. Pengujian pengendali terhadap gangguan sinyal kendali 6% dan 8%.

3.7 Perancangan Pengendali

3.7.1 Perancangan Pengendali *Tuning* PID

Pada perancangan *Tuning* PID, langkah pertama yang dilakukan adalah membuat rangkaian Simulink pada Matlab seperti yang ditunjukkan pada 3.4 di bawah ini.

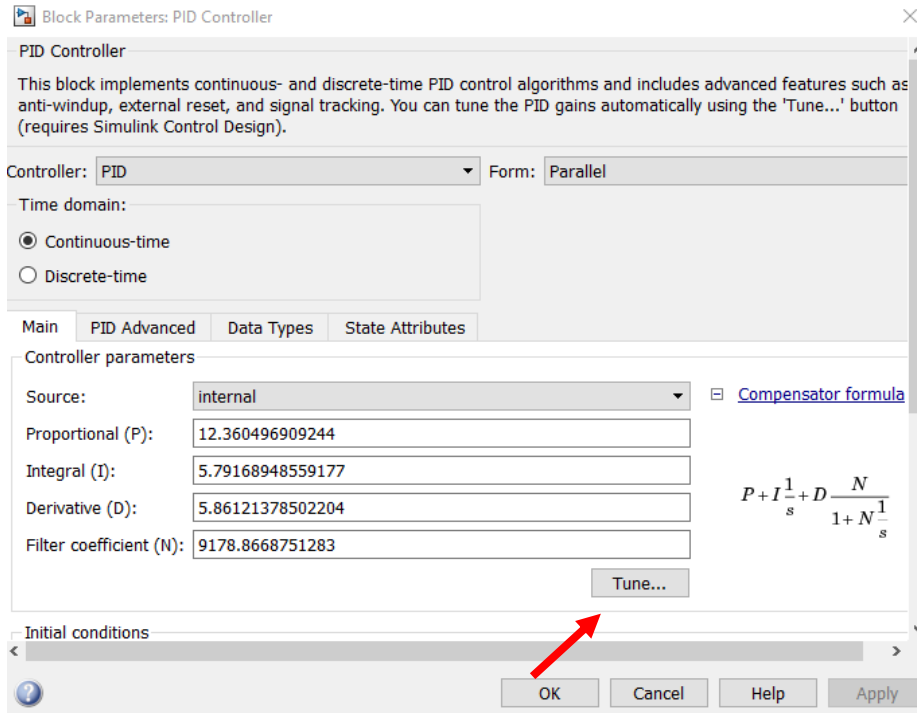


Gambar 3. 4 Rangkaian *Simulink* PID *Tuning*

Kemudian *double klik* pada blok *PID controller* dan akan muncul tampilan seperti gambar 3.5 berikut.

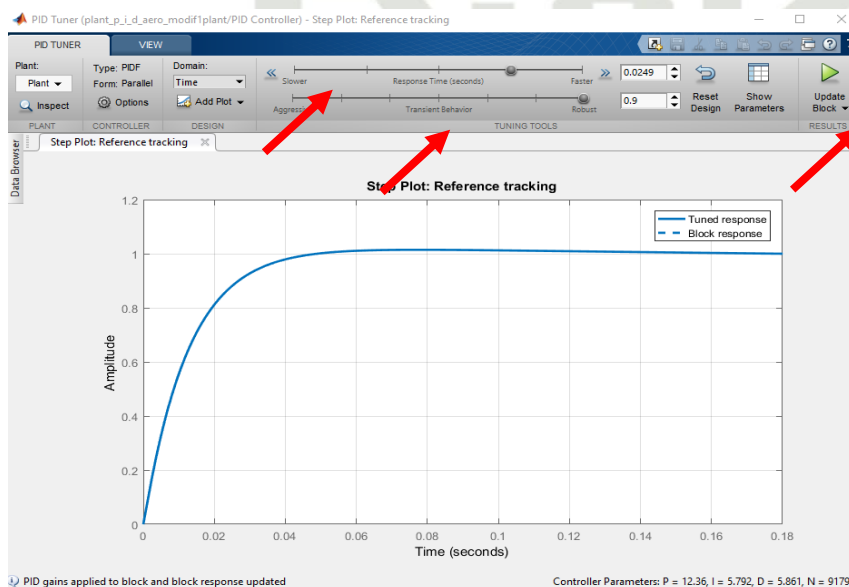
Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Diararng mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diararng mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3. 5 Tampilan blok PID controller

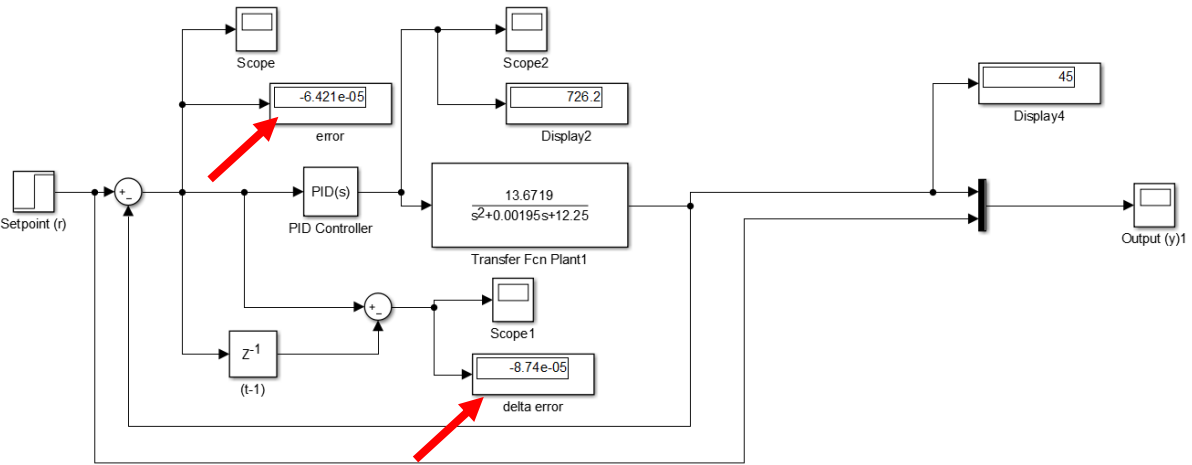
Langkah selanjutnya adalah melakukan *tuning* dengan klik tombol *tune* yang ada pada tampilan blok *PID controller* di atas. Kemudian geser tombol bulat yang ada pada garis *slower* dan *Aggressive* hingga mendapatkan nilai P, I dan D yang menghasilkan grafik *scope* yang mencapai *setpoint*, respon sistem yang cepat dan stabil seperti gambar yang ditunjukkan pada gambar 3.6 di bawah ini



Gambar 3. 6 Tampilan PID Tuner

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

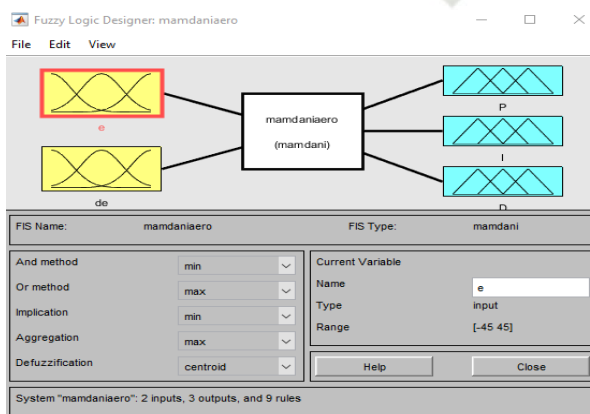
Setelah didapatkan nilai P, I, dan D yang tepat selanjutnya klik *update block and run* untuk menyimpan nilai P,I, dan D yang nantinya akan digunakan sebagai *output* dalam *fuzzy*. Matlab akan menghitung nilai E dan De secara otomatis untuk dimasukkan ke *fuzzy* nanti.



Gambar 3. 7 Nilai E dan De

3.7.2 Perancangan Pengendali *Tuning* PID menggunakan *Fuzzy Logic*

Pada perancangan ini digunakan metode *fuzzy* mamdani. Logika *fuzzy* digunakan karena salah satu metode yang digunakan untuk *tuning* kontroler PID. Logika *fuzzy* digunakan sebagai *tuning* parameter kontroler PID dengan *error* (*e*) dan *delta error* (Δe) sebagai masukan (*input*), dan parameter *Kp*, *Ki*, sebagai *output*. Logika *fuzzy* dapat mengatasi sistem yang non linear seperti *Aero Pendulum*, dapat beradaptasi terhadap perubahan parameter dan lingkungan, desain yang sederhana dan mudah diterapkan. Setelah mendapatkan nilai error, delta error, konstanta P, konstanta I, dan konstanta D nilainya akan digunakan di *fuzzy*. Berikut merupakan tampilan *fuzzy* dengan 2 input yaitu error dan delta error dan 3 output yaitu *Kp*, *Ki*, dan *Kd*.

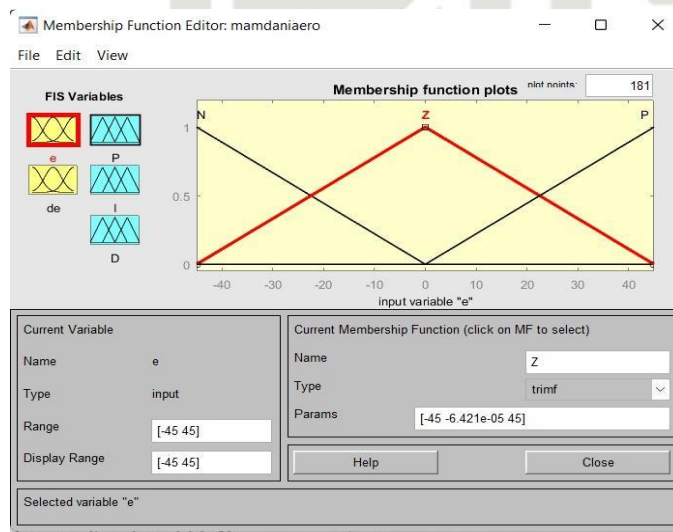


Gambar 3. 8 Tampilan *Fuzzy logic*

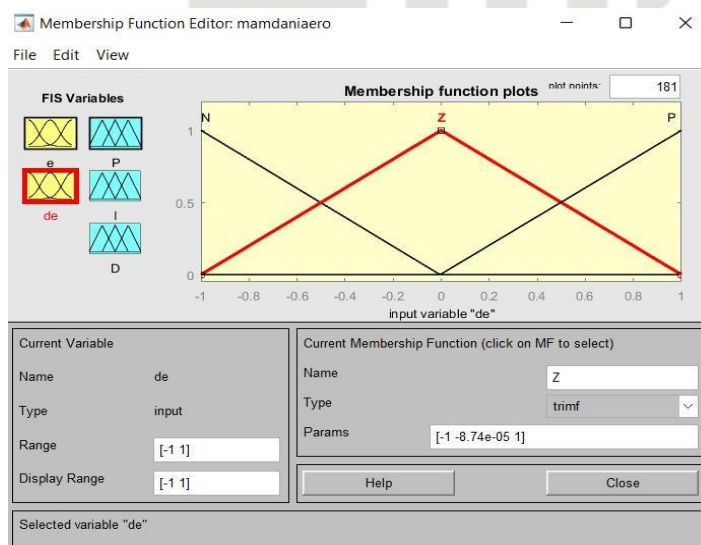
Perancangan *fuzzy* terdiri dari 3 tahapan yaitu fuzzifikasi, inferensi *fuzzy* dan defuzzifikasi sebagai berikut :

1. Fuzzifikasi

Pada perancangan fuzzifikasi ini, untuk nilai *input* fungsi keanggotaan untuk *error* dan *delta error* didapatkan dari rangkaian penentuan *error* dan *Delta error* dan menggunakan 3 fungsi keanggotaan yaitu N(Negative), Z(Zero), dan P(Possotive) seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah. Rentang parameter himpunan *fuzzy* dari *error* [-90 -45 0] untuk nilai N, [-45 6.421e-05 45] untuk nilai Z, dan [0 45 90] untuk nilai P. untuk nilai *delta error* dimulai dari [-2 1 0] untuk nilai N, [-1 -8.74e-05 1] untuk nilai Z, dan [0 1 2] untuk nilai P seperti gambar berikut.



Gambar 3. 9 Fungsi keanggotaan *input error*

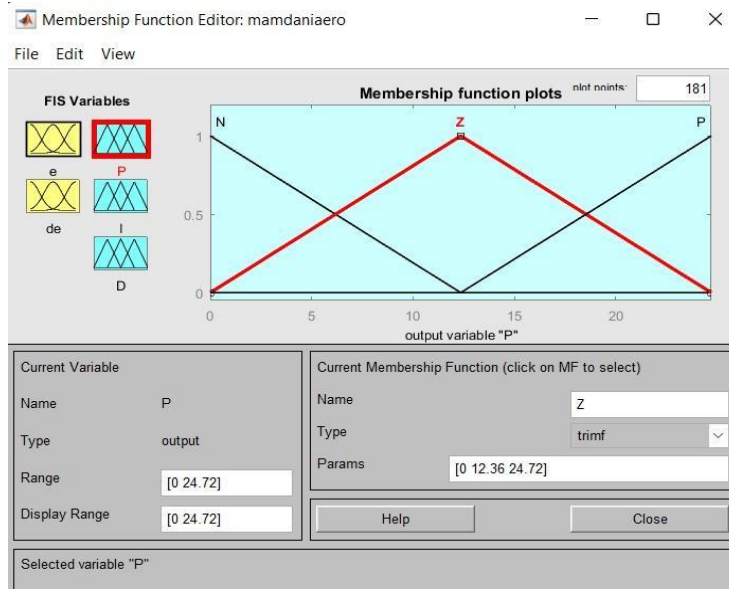


Gambar 3. 10 Fungsi keanggotaan *input delta error*

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

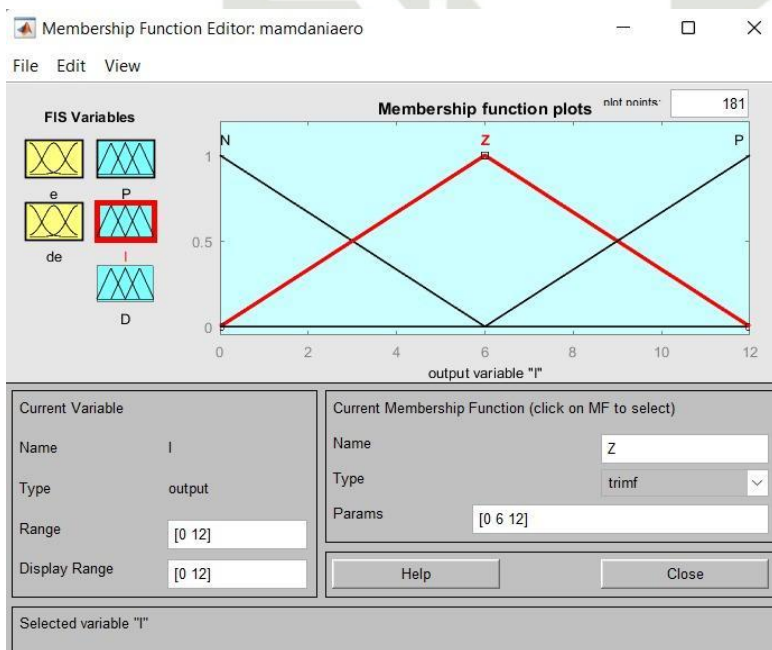
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Selanjutnya nilai *range* 1, 2, 3 dari nilai K_p , K_i dan K_d yang didapatkan *heuristic*. Untuk *output* 1 K_p juga menggunakan fungsi keanggotaan himpunan *fuzzy* N, Z dan P dengan nilai N yaitu $[-12.36 \ 0 \ 12.36]$, nilai Z $[0 \ 12.36 \ 24.72]$, dan nilai P yaitu $[12.36 \ 24.72 \ 37.11]$ seperti pada gambar dibawah ini.



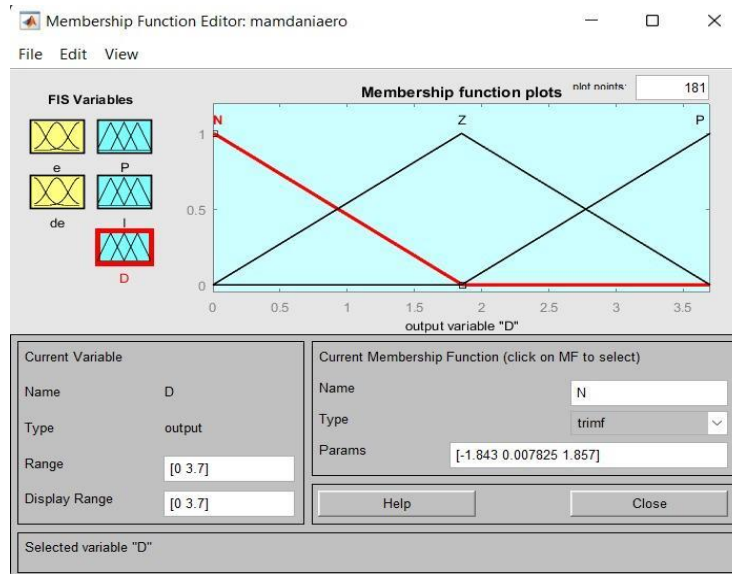
Gambar 3. 11 Fungsi keanggotaan *output* 1 K_p

Untuk fungsi keanggotaan *output* 2 K_i dengan nilai N $[-5.85 \ 0 \ 5.85]$, nilai Z $[0 \ 5.85 \ 11.7]$, dan nilai P $[5.85 \ 11.7 \ 17.55]$ seperti pada gambar berikut.



Gambar 3. 12 fungsi keanggotaan *output* 2 K_i

Selanjutnya untuk fungsi keanggotaan *output* 3 Kd dimasukkan nilai N yaitu [-1.85 0 1.85], nilai Z [0 1.85 3.7], dan nilai P yaitu [1.85 3.7 5.555].



Gambar 3. 13 Fungsi keanggotaan *output* 3 Kd

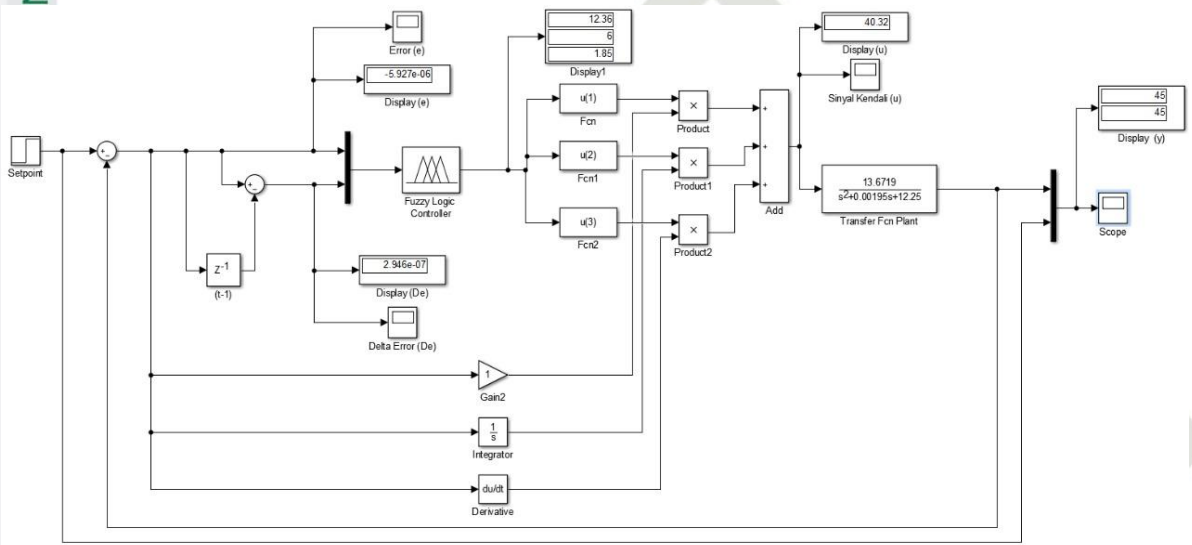
2. Rule Base Fuzzy

Terdapat dua pendekatan yang dipakai dalam membuat *rule base*, yaitu pendekatan heuristic dan pendekatan deterministic. Pada penelitian ini penulis akan menggunakan pendekatan heuristic, pendekatan ini lebih mudah dalam pengaplikasiannya. Pada pendekatan heuristic *rule base* dirancang berdasarkan pengetahuan kualitatif dari respon *plant* secara *open loop*. Pada perancangan *plant* yang bertujuan untuk menghasilkan respon *plant* dengan nilai *error steady state* yang kecil maka aturan aturan Tabel 2.2 dapat dijadikan sebagai acuan dalam membuat *rule base*. Adapun *rule base* yang dibuat adalah sebagai berikut :

1. *If (Error is N) and (D error is N) then (Output1 is N) and (Output2 is N)*
2. *If (Error is N) and (D error is Z) then (Output1 is N) and (Output2 is N)*
3. *If (Error is N) and (D error is P) then (Output1 is Z) and (Output2 is Z)*
4. *If (Error is Z) and (D error is N) then (Output1 is N) and (Output2 is N)*
5. *If (Error is Z) and (D error is Z) then (Output1 is Z) and (Output2 is Z)*
6. *If (Error is Z) and (D error is P) then (Output1 is P) and (Output2 is P)*
7. *If (Error is P) and (D error is N) then (Output1 is Z) and (Output2 is Z)*
8. *If (Error is P) and (D error is Z) then (Output1 is P) and (Output2 is P)*
9. *If (Error is P) and (D error is P) then (Output1 is P) and (Output2 is P)*

3. Defuzzifikasi

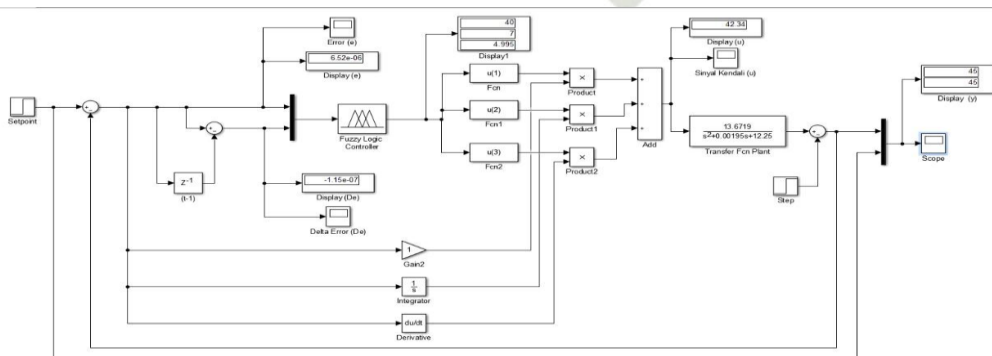
Setelah membuat rangkaian sistem kendali *fuzzy*, selanjutnya sistem disimulasikan dan dianalisa. Gambar 3.13 dibawah merupakan rancangan pengendali *Tuning* menggunakan *fuzzy* pada *aero pendulum* dengan nilai K_p, K_i , dan K_d didapatkan menggunakan metode *PID Tuning* yang disesuaikan dengan hasil respon *plant*. Setelah mendapatkan nilai K_p, K_i , dan K_d yang sesuai dengan respon *plant*, untuk menentukan respon *transient* dari sistem.



Gambar 3. 14 Rangkaian Simulink Pengendali PIDFuzzy

3.7.3 Perancangan Pengendali *Tuning* PID Menggunakan Logika *Fuzzy* dengan Gangguan Sinyal Kendali

Pada perancangan ini pengendali diberi gangguan sinyal kendali untuk diuji ketahanan pengendali terhadap sistem dengan melihat keadaan *steady state* pada grafik. Pada pengujian diberi gangguan dengan nilai 6% dan 8% dari *setpoint* pada waktu 4 detik dan 8 detik.



Gambar 3. 15 Rangkaian Simulink Pengendali PIDFuzzy

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Diarangi mengumumkkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Data Penelitian yang Akan Dianalisa

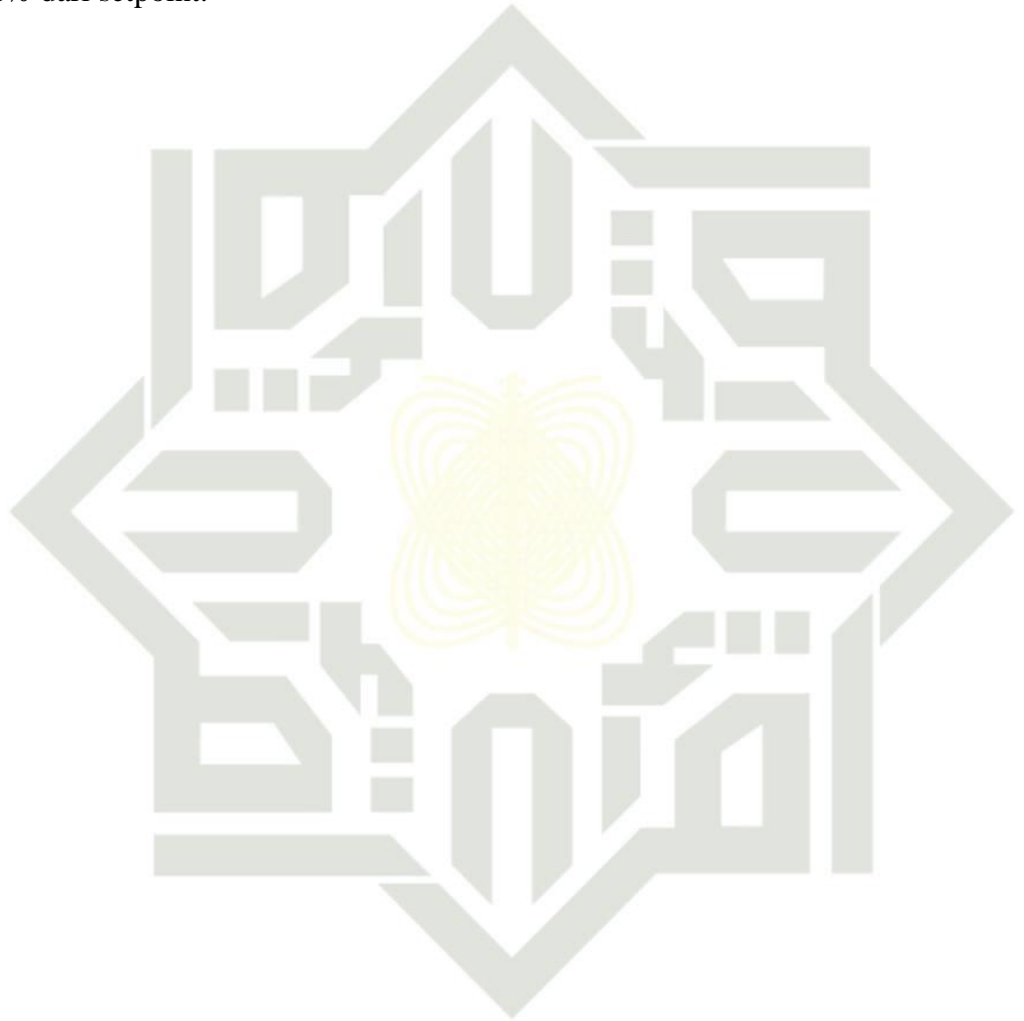
Berikut data yang perlu dianalisa dengan bentuk grafik respon keluaran sistem :

Respon transient dari grafik respon keluaran simulasi *open loop*.

Respon transient dari grafik respon keluaran simulasi menggunakan pengendali *Tuning* PID menggunakan fuzzy logic.

Respon transient dari grafik respon keluaran saat diberikan gangguan sinyal kendali sebesar 6% dan 8% dari setpoint.

3. **Daftar Pustaka**
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



UIN SUSKA RIAU



Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi yang dan analisa respon sistem yang telah dilakukan pada penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa pengendali Tuning PID menggunakan fuzzy logic dapat meminimalisir *overshoot* dan *error steady state* yang terjadi pada aero pendulum. Untuk mendapatkan kombinasi nilai PID terbaik dilakukan dengan penalaan nilai K_p , K_i , dan K_d atau dengan heuristic, kemudian analisa respon sistem yang dihasilkan. Hasil yang didapatkan pada sudut 45° dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 6$, $K_d = 1.85$ menghasilkan respon sistem *delay time* (t_d) sebesar 0.125 detik, *settling time* (t_s) sebesar 0.466 detik, *rise time* (t_r) sebesar 0.343 detik, *maximum Overshoot* (M_p) sebesar 0.08% dan *error steady state* (ess) sebesar 0.000015° . Lalu pada sudut 70° dengan nilai $K_p = 14.65$, $K_i = 7.25$, $K_d = 1.75$ menghasilkan respon sistem *delay time* (t_d) sebesar 0.108 detik, *settling time* (t_s) sebesar 0.356 detik, *rise time* (t_r) sebesar 0.25 detik, *maximum Overshoot* (M_p) sebesar 0.107% dan *error steady state* (ess) sebesar 0.000007° . Lalu pada sudut 90° dengan nilai $K_p = 19.603$, $K_i = 6.8$, $K_d = 2.5$ menghasilkan respon sistem *delay time* (t_d) sebesar 0.108 detik, *settling time* (t_s) sebesar 0.466 detik, *rise time* (t_r) sebesar 0.348 detik, *maximum Overshoot* (M_p) sebesar 0.251% dan *error steady state* (ess) sebesar 0.0026° . Pengujian yang dilakukan yang bertujuan menguji ketahanan pengendali dalam mempertahankan keadaan stabil dengan memberikan gangguan sinyal kendali sebesar 6% dan 8% terbukti bahwa pengendali Tuning PID menggunakan fuzzy logic dapat mengatasi gangguan yang diberikan dan mampu mempertahankan keadaan steady state nya.

5.2 Saran

Pada penelitian ini, penulis menggunakan metode heuristic dalam proses penalaan nilai K_p , K_i , dan K_d . Pada penalaan nilai PID ini banyak data yang digunakan dan membutuhkan waktu yang banyak. Kemudian dilakukan beberapa pengujian yang bertujuan untuk membuktikan bahwa pengendali *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* mampu mengatasi masalah respon keluaran. Pada penelitian selanjutnya dapat menggunakan metode Ziegler Nichols karena metode ini dalam penalaan nilai PID dilakukan secara otomatis tanpa memodifikasi sistem dan menambahkan pengujian dengan menambahkan *setpoint*. Diharapkan dengan metode tersebut dapat menghasilkan respon keluaran yang baik.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

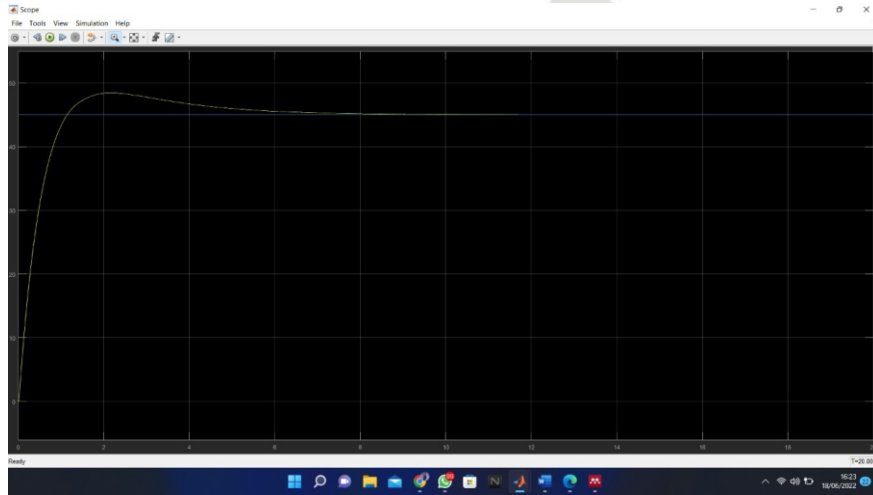
1. [1] Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. [2] Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. [3] Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. [4] Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
- [5] A. Setiawan, B. Yanto, and K. Yasdomi, *Logika Fuzzy Dengan Matlab (Contoh Kasus Penelitian Penyakit Bayi dengan Fuzzy Tsukamoto)*, no. July. 2018.
- [6] H. Kizmaz, S. Aksoy, and A. Muhurcu, "Sliding mode control of suspended pendulum," *Proc. - Int. Symp. Mod. Electr. Power Syst. MEPS'10*, no. September 2014, 2010.
- [7] LAVITRY, RISER, FOURNY, and CAMPAN, "Myasthénie guérie par l'ablation d'un thymus non tumoral;," *Bull. mémoires la Société*, vol. 69, no. 21–23, pp. 764–767, 1953.
- [8] O. J. Oguntoyinbo, "Pid Control of Brushless Dc Motor and Robot Trajectory Planning and Simulation With," 2009.
- [9] D. Akbar and S. Riyadi, "Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless Dc (BlDc) Menggunakan Pwm (Pulse Width Modulation)," pp. 255–262, 2019, doi: 10.5614/sniko.2018.30.
- [10] Siswoyo, *Teknik Listrik Industri*, vol. 1. 2008.
- [11] K. Ogata, *Modern control engineering*, 4th ed. New Jersey: Prentice Hal, 2002. doi: 10.1201/9781315214573.
- [12] K. Ogata, *MODERN CONTROL ENGINEERING*, 5th ed., vol. 39, no. 12. New jersey, 2010.
- [13] D. ana ratna Wati, *Sistem Kendali Cerdas*, 1st ed. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2011.
- [14] B. Cahyono, "Penggunaan Software Matrix Laboratory (Matlab) Dalam Pembelajaran Aljabar Linier," *Phenom. J. Pendidik. MIPA*, vol. 3, no. 1, pp. 45–62, 2016, doi: 10.21580/phen.2013.3.1.174.
- [15] H. M. Sartika, "Simulasi Karakteristik Motor BLDC UAV," *Semin. FORTEI 2019 Ed. kasus Pros. FORTEI 2019 Vol 5, No 1.1*, vol. 5, no. 1.1, pp. 1–4, 2019, [Online]. Available: <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/article/view/106120>

LAMPIRAN

PROSES PENALAAN PARAMETER PID DENGAN PENGENDALI *TUNING* PID MENGUNAKAN *FUZZY LOGIC* UNTUK PENGENDALIAN POSISI SUDUT PADA *AERO PENDULUM*

SUDUT 45°

1. Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 5.79$, $K_d = 5.861$



2. Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 5.79$, $K_d = 6.5$



- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 5.79$, $K_d = 4$



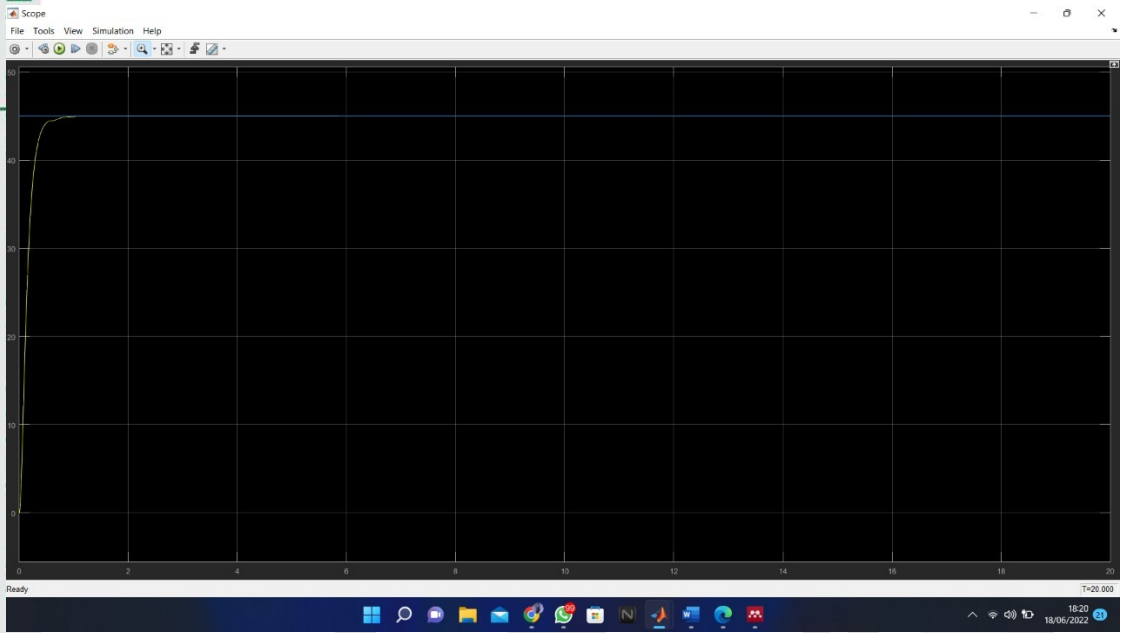
Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 5.79$, $K_d = 2$



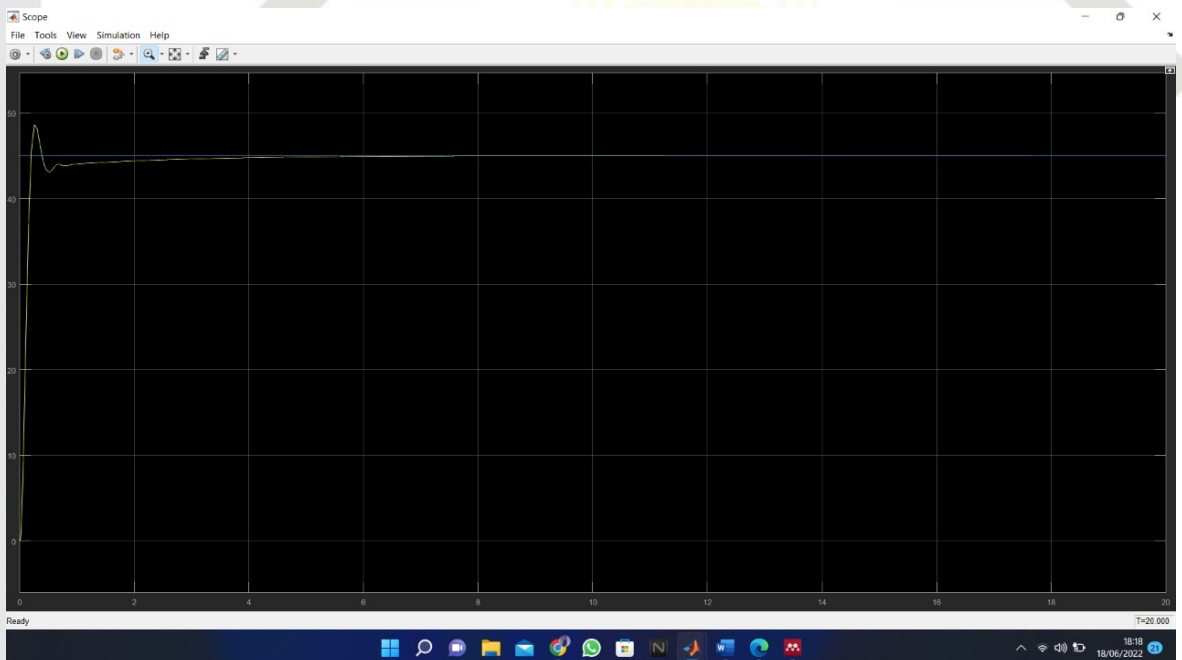
Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

5. Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 5.79$, $K_d = 1.85$

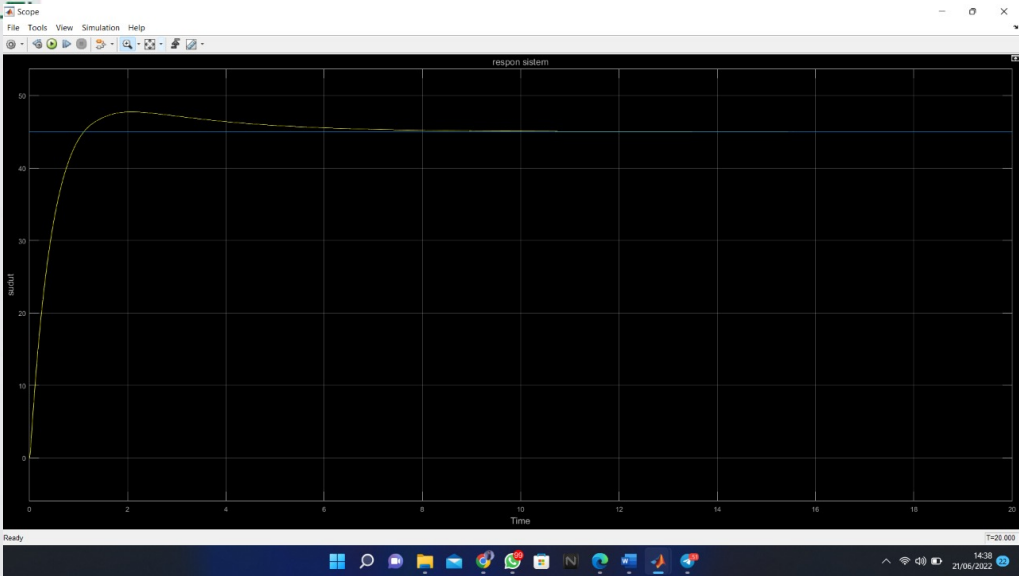


6. Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 5.79$, $K_d = 1$

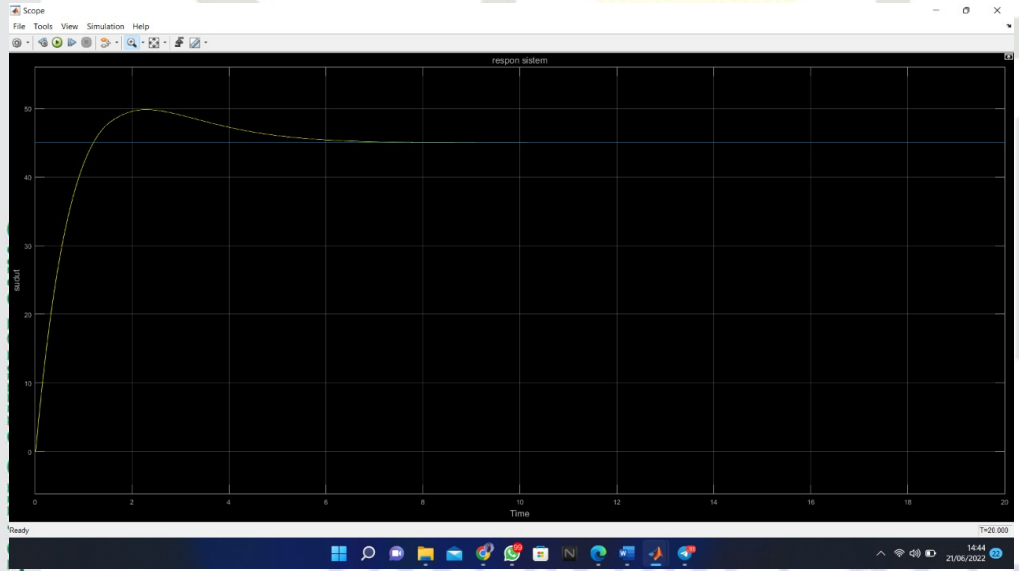


- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang**
5. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 14$, $K_i = 5.79$, $K_d = 6.5$



Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 10$, $K_i = 5.79$, $K_d = 6.5$

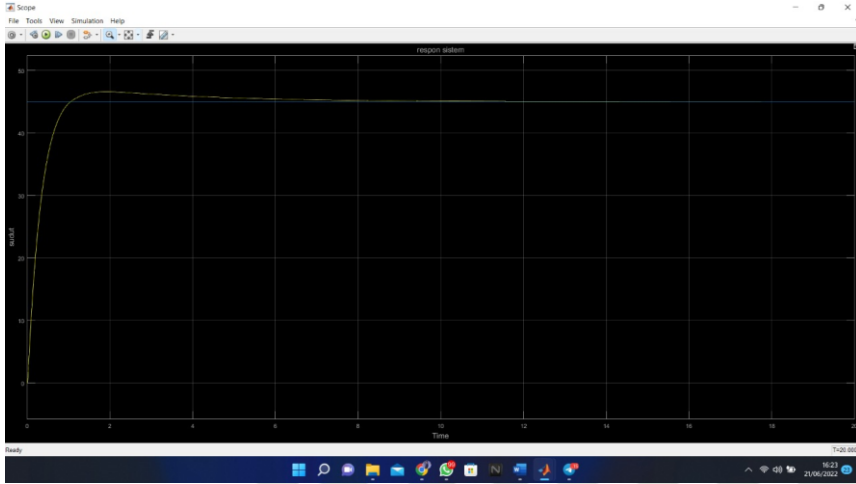


- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



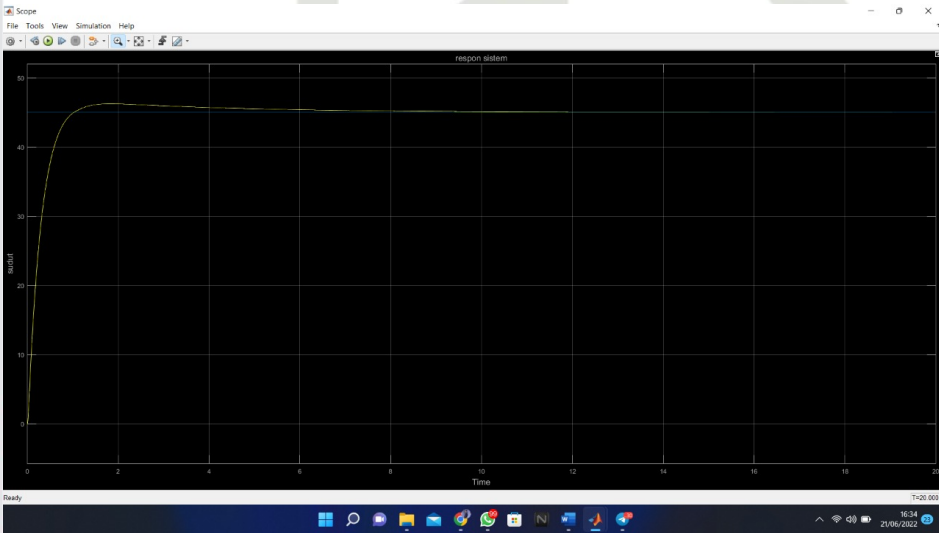
Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 18$, $K_i = 5.79$, $K_d = 0.5$

9. Hak cipta milik UIN Suska Riau



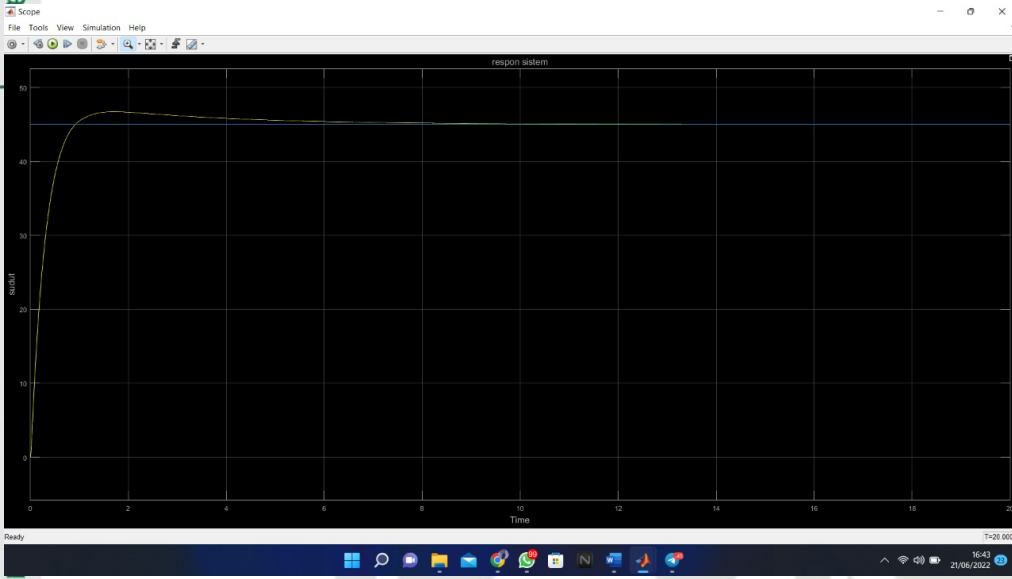
Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 20$, $K_i = 5.79$, $K_d = 0.5$

10. Hak cipta milik UIN Suska Riau

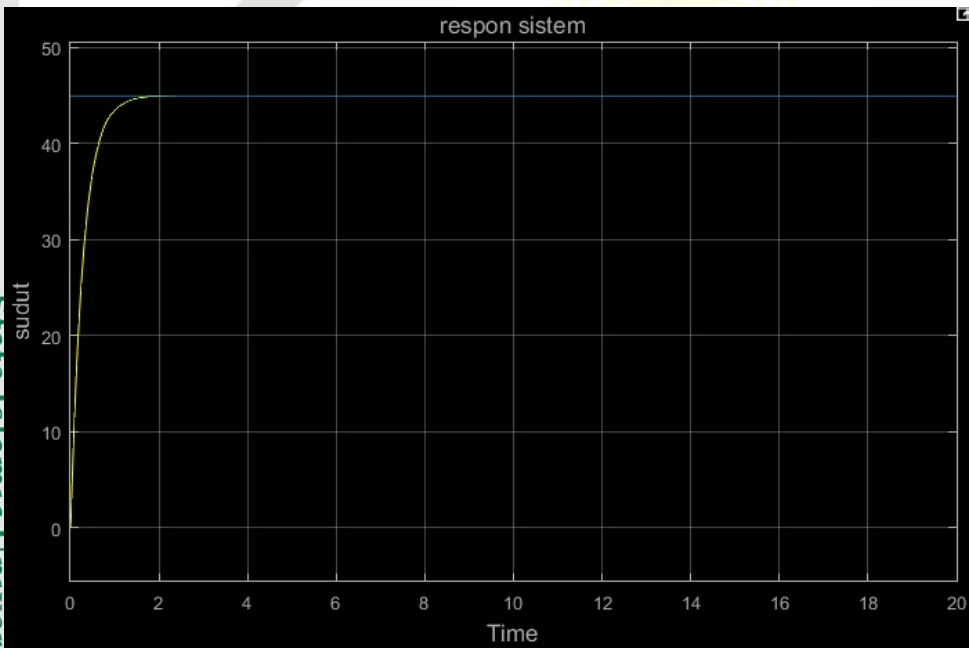


- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang**
9. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

11. Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 7$, $K_d = 6.5$

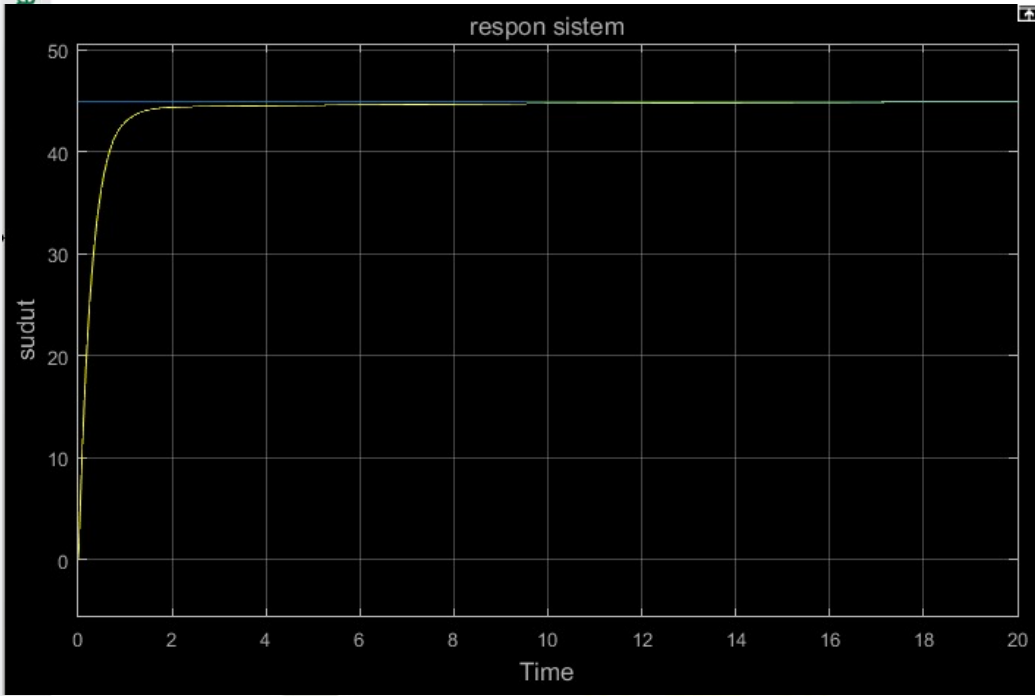


12. Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 7$, $K_d = 6.5$

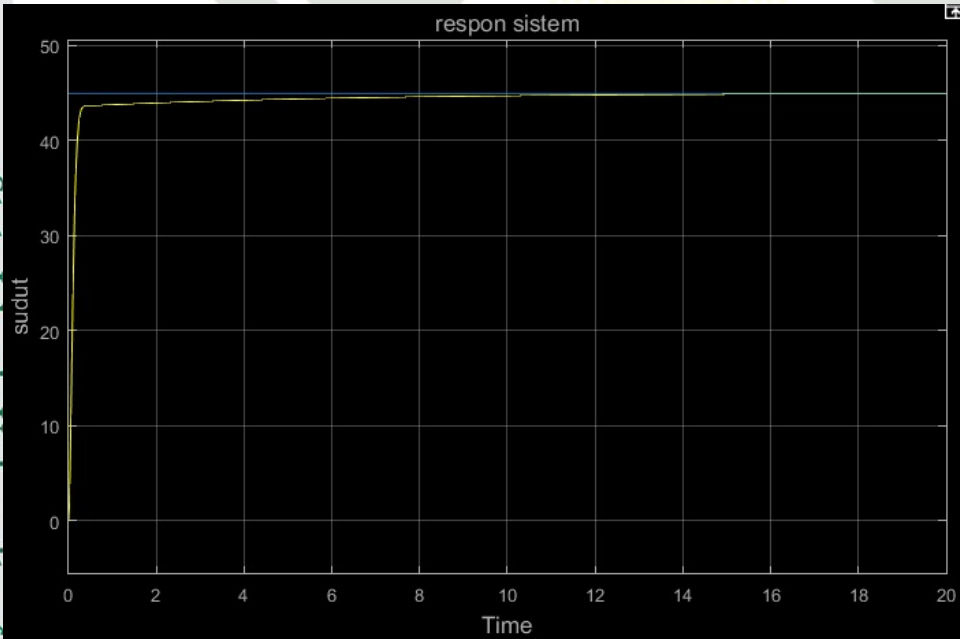


- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang**
1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Diarangi mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 2$, $K_d = 0.5$

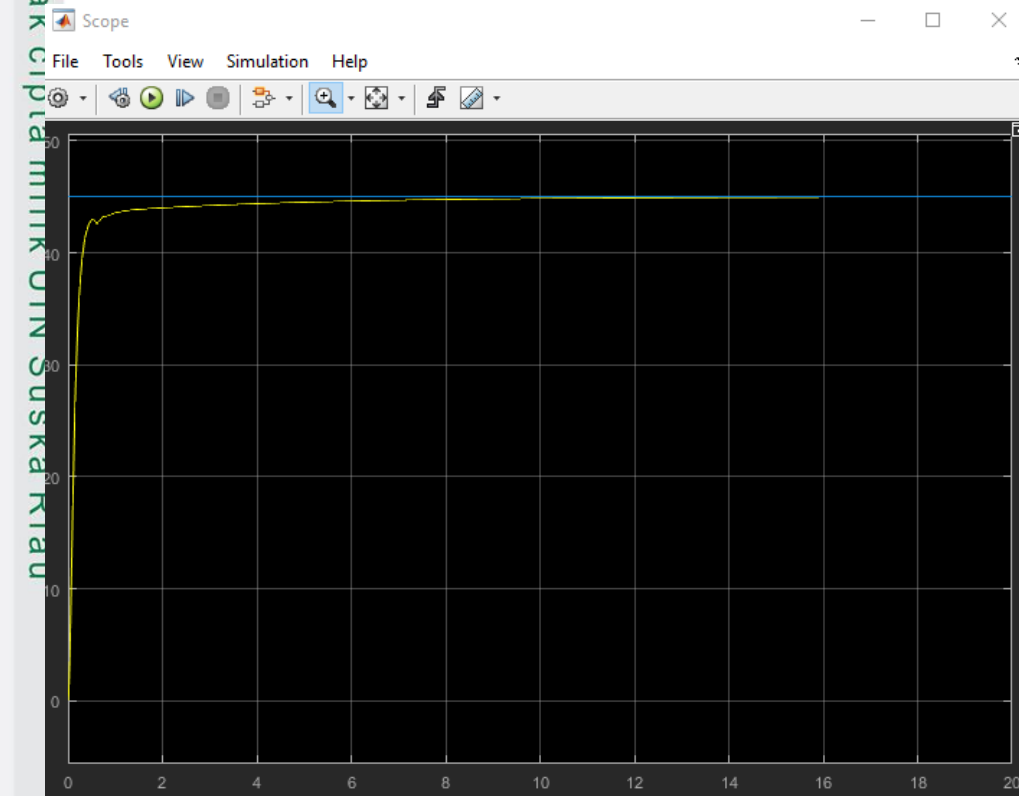


Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 18$, $K_i = 3$, $K_d = 1.85$

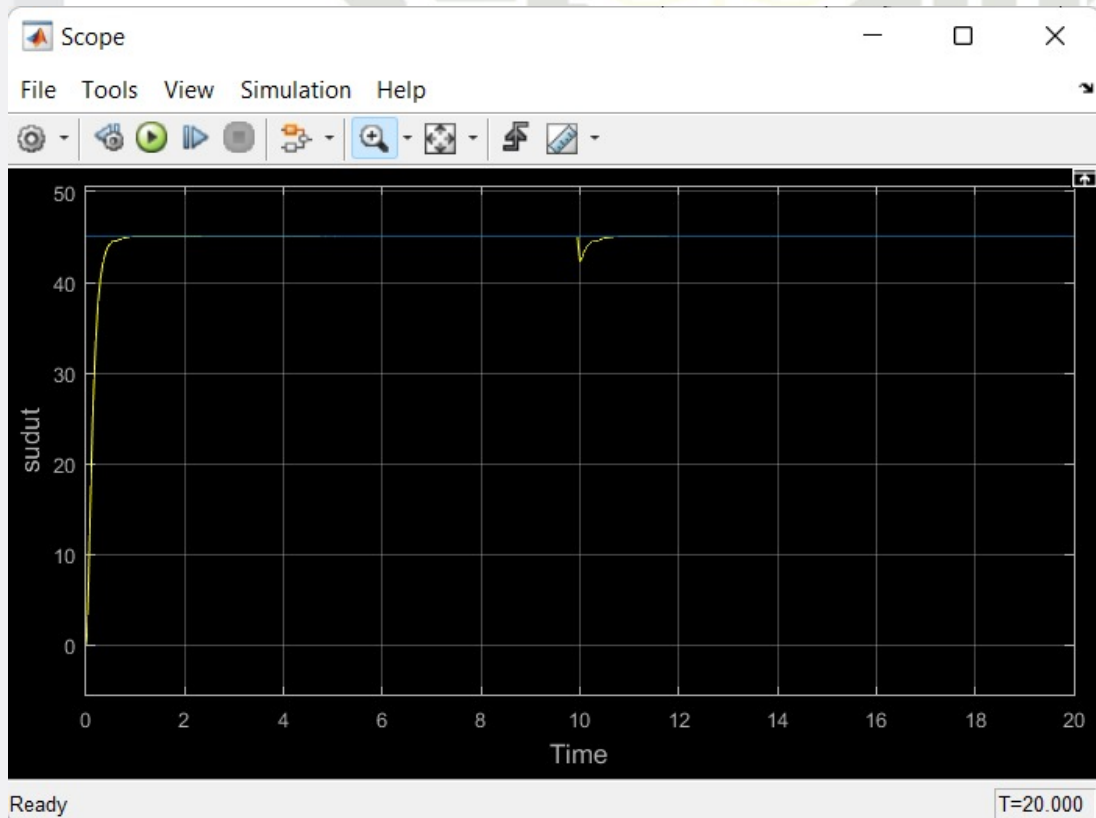


- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang**
1. Diarangi mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 3$, $K_d = 1.85$



Hasil simulasi *tuning* PID menggunakan *fuzzy logic* dengan nilai $K_p = 12.36$, $K_i = 6$, $K_d = 1.85$



Ready

T=20.000

- Hak Cipta Diindungi Undang-Undang**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Tabel Spesifikasi motor *brushless* dc[21]

No.	Alat	Spesifikasi	Satuan
1.	Rotor Inertia (J)	0.00061	Kg.m ²
2.	Voltage constant (K _e)	0.0637	V/(rad/s)
3.	Torque constant (K _t)	0.2663	Nm/A
4.	Armature resistance (R _a)	0.6187	Ω
5.	Armature inductance (L _a)	2.62	mH
6.	Friction coefficient (K _f)	0.00291	N/(rad/s)
7.	Time constant of the ESC model (τ)	0.0781	s

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nada Rahmi Zamra lahir pada tanggal 24 Mei 2000 sebagai anak kedua dari Zamrefrizal dan Susi Erawati dengan jumlah saudara sebanyak 2 saudara. Beralamat di Kp. Melayu, Kototinggi Kec.Gunuang Omeh.. Penulis menempuh pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 07 Kototinggi dan lulus pada tahun 2012, kemudian melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri 1 Kec.Gunuang Omeh dan lulus pada tahun 2015, selanjutnya melanjutkan pendidikan ke Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Kec.Suliki. Kemudian setelah lulus SMA pada tahun 2018 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dengan jurusan Teknik Elektro. Pada semester 4 penulis mengambil konsentrasi Elektronika Instrumentasi.

Dengan karunia Allah SWT, ketekunan serta rasa motivasi yang tinggi untuk terus belajar dan berusaha, penulis telah berhasil menyelesaikan tugas akhir ini. Semoga dengan penulisan tugas akhir ini mampu memberikan manfaat dan kontribusi untuk siapa saja yang membutuhkannya.

Akhir kata penulis mengucapkan rasa syukur yang sebesar-besarnya kepada Allah SWT atas terselesaikannya tugas akhir yang berjudul **“Desain Kendali *Tuning* PID Menggunakan *Fuzzy Logic* Untuk Pengendalian Posisi Sudut Pada Aero Pendulum”**.

No. HP : 082283275206

Email : 11850522346@students.uin-suska.ac.id

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.