



TESIS - TM185400

**IMPLEMENTASI *FUZZY LOGIC CONTROL* PADA
PROTOTYPE SELF BALANCING KENDARAAN RODA
DUA MENGGUNAKAN *CONTROL MOMENT*
*GYROSCOPE (CMG)***

**KHAFID AZZARKHIYAH
NRP : 6007201005**

**Dosen Pembimbing:
Dr. Eng. Unggul Wasiwitono S.T., M.Eng.Sc**

**Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022**



TESIS - TM185400

**IMPLEMENTASI *FUZZY LOGIC CONTROL* PADA
PROTOTYPE SELF BALANCING KENDARAAN RODA
DUA MENGGUNAKAN *CONTROL MOMENT*
*GYROSCOPE (CMG)***

**KHAFID AZZARKHIYAH
NRP : 6007201005**

**Dosen Pembimbing:
Dr. Eng. Unggul Wasiwitono S.T., M.Eng.Sc**

**Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022**



THESIS - TM185400

***IMPLEMENTATION OF FUZZY LOGIC CONTROL ON
TWO WHEEL SELF BALANCING PROTOTYPE USING
MOMENT CONTROL GYROSCOPE (CMG)***

**KHAFID AZZARKHIYAH
NRP : 6007201005**

**Advisor:
Dr. Eng. Unggul Wasiwitono S.T., M.Eng.Sc**

**Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
2022**

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T)

Di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

KHAFID AZZARKHIYAH

NRP: 6007201005

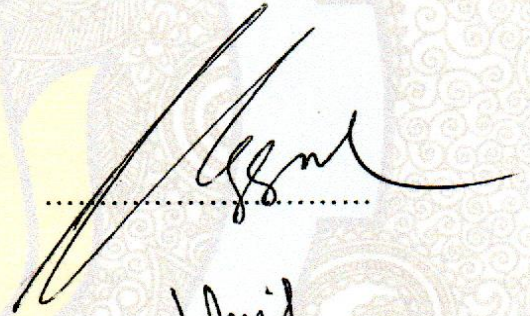
Tanggal Ujian: 18 Juli 2022

Periode Wisuda: September 2022

Disetujui oleh:

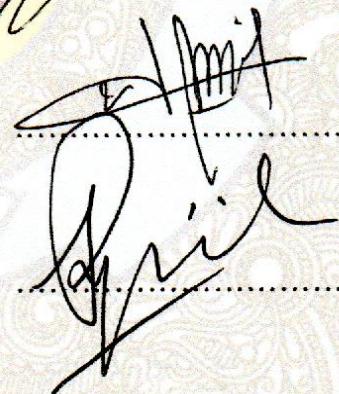
Pembimbing:

- 1 Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc.
NIP. 197805102001121001



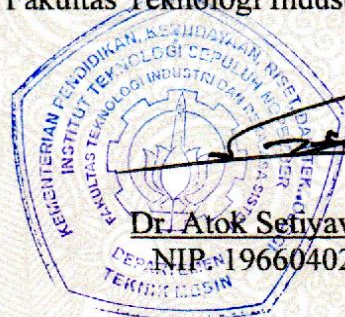
Penguji:

- 1 Dr. Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc.
NIP. 198611162020122012
- 2 Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197303222001121001



Kepala Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem



Dr. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc

NIP. 196604021989031002



(Halaman sengaja dikosongkan)

IMPLEMENTASI *FUZZY LOGIC CONTROL* PADA PROTOTYPE *SELF BALANCING* KENDARAAN RODA DUA MENGUNAKAN *CONTROL MOMENT GYROSCOPE*

Nama Mahasiswa : Khafid Azzarkhiyah
NRP : 6007201005
Pembimbing : Dr. Eng Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc

ABSTRAK

Di era modern saat ini, perkembangan teknologi semakin pesat salah satunya dalam bidang otomotif. Permasalahan pada kendaraan roda dua adalah sistem ini merupakan sistem yang tidak stabil, terutama ketika berhenti. Dari permasalahan ini menjadikan banyak peneliti untuk mengembangkan teknologi *self-balancing* pada kendaraan roda dua. *Self-balancing* kendaraan adalah teknologi kendaraan yang mampu melawan gaya berat yang diakibatkan oleh gaya gravitasi untuk menjaga posisinya tetap seimbang.

Penelitian ini dirancang menggunakan keseimbangan giroskopik. Prinsip kerja keseimbangan giroskopik dipengaruhi adanya putaran gimbal dan putaran *flywheel*. Terdapat 2 *flywheel* di masing-masing gimbal yang dipasang secara vertikal. Sistem giroskopik pada kendaraan ini menggunakan sistem transmisi gear untuk memutar kedua gimbal secara bersamaan ke arah yang berlawanan. Metode kontrol yang digunakan yaitu *fuzzy logic control*.

Desain dari sistem *fuzzy logic control* yang digunakan yaitu 6 model *fuzzy* sugeno dengan perbedaan fungsi membership dan jumlah membership nya. Pengujian dari 6 model *fuzzy* menunjukkan bahwa hasil terbaik didapatkan pada fuzzy fungsi segitiga 9x3. Kriteria terbaik dalam penelitian ini dibuktikan oleh respon yang memiliki osilasi paling kecil dan kemampuan dalam mempertahankan diposisi tegak. Semakin banyak jumlah membership maka semakin besar peluang dalam memvariasikan nilai input ke prototipe.

Kata Kunci: *fuzzy logic control*, giroskopik, *self-balancing* kendaraan

(Halaman sengaja dikosongkan)

IMPLEMENTATION OF FUZZY LOGIC CONTROL ON TWO WHEEL SELF BALANCING PROTOTYPE USING MOMENT CONTROL GYROSCOPE

By : Khafid Azzarkhiyah
Student Identity Number : 6007201005
Advisor : Dr. Eng Unggul Wasiwitono, ST.,M.Eng.Sc

ABSTRACT

In today's modern era, technological developments are increasingly rapid, one of which is in the automotive sector. The problem with two-wheeled vehicles is that this system is an unstable system, especially when it stops. This problem has led many researchers to develop self-balancing technology on two-wheeled vehicles. Self-balancing vehicle is a vehicle technology that is able to fight the gravity caused by gravity to keep its position in balance.

This study was designed using gyroscopic balance. The working principle of gyroscopic balance is influenced by the rotation of the gimbal and the rotation of the flywheel. There are 2 flywheels in each gimbal which are mounted vertically. The gyroscopic system on this vehicle uses a gear transmission system to rotate the two gimbals simultaneously in opposite directions. The control method used is fuzzy logic control.

The design of the fuzzy logic control system used is 6 fuzzy Sugeno models with different membership functions and the number of memberships. Testing of 6 fuzzy models shows that the best results are obtained on the 9x3 fuzzy triangle function. The best criteria in this study were proven by the response that had the smallest oscillation and the ability to maintain an upright position. The greater the number of membership, the greater the opportunity to vary the input value to the prototype.

Keyword: *control moment gyroscope, fuzzy logic control, self-balancing vehicle*

(Halaman sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Implementasi *Fuzzy Logic Control* Pada *Prototype Self Balancing* Kendaraan Roda Dua Menggunakan *Control Moment Gyroscope*”**. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan akademis dalam menempuh pendidikan Program Studi Magister S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung dalam penulisan Tesis ini. Secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Ikhsan dan Ibu Solikhatin yang selalu memberikan semangat dan doa kepada penulis. Tanpa kasih sayang dari mereka penulis tidak akan bisa menyelesaikan Tesis ini.
2. Bapak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M.Eng.Sc selaku dosen pembimbing Tesis yang telah memberikan ilmu, nasihat, dan bimbingan kepada penulis selama ini dengan penuh kesabaran.
3. Bapak dan Ibu dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan untuk penulis dalam penyempurnaan Tesis ini.
4. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran dalam rangka proses akademik dan nonakademik selama penulis menempuh pendidikan magister di Departemen Teknik Mesin.
5. Seluruh rekan-rekan S2 Teknik Mesin angkatan 2020 yang selalu menjadi garda terdepan dalam memberikan inspirasi dan aspirasi kepada penulis selama pembuatan Tesis ini.
6. Seluruh anggota Laboratorium Rekayasa Sistem Kontrol (RSK) yang telah memberikan segala jenis dukungan moral, motivasi, dan mengajarkan arti kebersamaan selama menyelesaikan Tesis ini.

7. Juniar Dwi Kurniawati yang telah memberikan motivasi dan dukungan dalam proses pengerjaan Tesis ini hingga selesai.
8. Semua pihak yang telah membantu dalam proses dalam penyusunan Tesis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Dengan selesainya laporan Tesis ini, penulis menyadari bahwa penelitian ini belum sempurna sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk perbaikan demi kesempurnaan Tesis ini. Semoga apa yang ditulis pada Tesis ini memberikan manfaat dan dapat menambah wawasan keilmuan bagi semua pihak.

Surabaya, 27 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Permasalahan	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Inverted Pendulum.....	8
2.3 Control Moment Gyroscope (CMG)	9
2.4 Lagrange Equation.....	11
2.5 Fuzzy Logic Control	12
2.6 Himpunan Fuzzy.....	13
2.7 Fungsi Keanggotaan	14
2.8 Sistem Interferensi Fuzzy	15
2.9 Jenis-Jenis Fuzzy Logic.....	17
2.10 Hardware	18
2.10.1 BNO055	18

2.10.2	Potensiometer	18
2.10.3	Encoder	19
2.10.4	Dynamixel Shield dan Dynamixel Servo	19
2.10.5	Elektronik Speed Control dan Motor Brushless DC	20
2.10.6	Arduino	20
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN		21
3.1	Diagram Alir Penelitian	21
3.2	Diagram Alir Desain Fuzzy Logic Control	23
3.3	Diagram Alir Pembuatan Prototipe	24
3.4	Diagram Alir Controller	25
3.5	Model Self-Balancing Kendaraan Roda Dua	27
3.5.1	Pemodelan Sistem Giroskopik	27
3.5.2	Model Motor	33
3.6	Wiring Hardware	35
3.7	Rancangan Fuzzy Logic Control	36
3.7.1	Rancangan Fuzzy Segitiga Membership 5x3	36
3.7.2	Rancangan Fuzzy Segitiga Membership 7x3	40
3.7.3	Rancangan Fuzzy Segitiga Membership 9x3	42
3.7.4	Rancangan Fuzzy Trapesium Membership 5x3	45
3.7.5	Rancangan Fuzzy Trapesium Membership 7x3	48
3.7.6	Rancangan Fuzzy Trapesium Membership 9x3	50
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		53
4.1	Hasil Pembuatan Prototipe	53
4.2	Hasil Perancangan Hardware	55
4.2.1	Pengujian Sensor Posisi	55
4.2.2	Pengujian Dynamixel Servo	56

4.2.3	Pengujian Sensor Kecepatan Roll.....	58
4.2.4	Pengujian Sensor Kecepatan Gimbal	59
4.3	Hasil Perancangan Fuzzy.....	60
4.3.1	Pengujian Fuzzy Arduino dengan Matlab	60
4.3.2	Pengujian Fuzzy dengan Perhitungan.....	68
4.4	Hasil Pengujian Prototipe	75
4.4.1	Perbandingan Pengujian Tanpa Penambahan Massa.....	76
4.4.2	Perbandingan Pengujian Massa 100 gram.....	82
4.4.3	Perbandingan Pengujian Massa 500 gram.....	86
4.4.4	Perbandingan Pengujian Penambahan Massa.....	90
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....		97
5.1	Kesimpulan	97
5.2	Saran	97
DAFTAR PUSTAKA		99
LAMPIRAN.....		103
BIODATA PENULIS.....		113

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Lit Motor	1
Gambar 2.1 Rancangan <i>Autodesk Inventor</i>	6
Gambar 2.2 Model Kendaraan Giroskopik 2 <i>Flywheel</i>	6
Gambar 2.3 Kendaraan Giroskopik 1 <i>Flywheel</i>	7
Gambar 2.4 Hasil Perbandingan <i>Control Fuzzy</i> dan PD	8
Gambar 2.5 Hasil <i>Control Fuzzy</i> dengan Gangguan Tertentu.....	8
Gambar 2.6 Inverted Pendulum Sederhana.....	9
Gambar 2.7 Giroskop Moment Control [19].....	9
Gambar 2.8 Torsi Presisi Efektifitas	11
Gambar 2.9 Kontroller Fuzzy	13
Gambar 2.10 Fungsi Segitiga.....	14
Gambar 2.11 Fungsi Trapesium.....	15
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 3.2 Diagram Blok Kontrol Sistem Giroskopik.....	23
Gambar 3.3 Diagram Alir Desain <i>Fuzzy Logic</i>	24
Gambar 3.4 Diagram Alir Pembuatan <i>Prototype</i>	25
Gambar 3.5 Diagram Alir <i>Controller Arduino Mega</i>	26
Gambar 3.6 Diagram Alir <i>Controller Arduino Uno</i>	27
Gambar 3.7 Model Kendaraan <i>Self-Balancing</i> Roda Dua	28
Gambar 3.8 Tampak Samping Kendaraan <i>Self-Balancing</i> Roda Dua	28
Gambar 3.9 Presesi Giroskopik.....	28
Gambar 3.10 <i>Wiring</i> Pada <i>Arduino Mega</i>	36
Gambar 3.11 <i>Wiring</i> Pada <i>Arduino Uno</i>	36
Gambar 3.12 Rancangan Himpunan Error Segitiga 5x3.....	37
Gambar 3.13 Rancangan Himpunan Delta Error Segitiga 5x3	38
Gambar 3.14 Rancangan Himpunan Error Trapesium 5x3.....	46
Gambar 3.15 Rancangan Himpunan Delta Error Trapesium 5x3	47
Gambar 4.1 Hasil Prototipe Self Balancing Kendaraan Roda Dua.....	53
Gambar 4.2 Hasil Minitab Pada Pengujian Posisi Roll	56

Gambar 4.3 Hasil Minitab Pada Pengujian Posisi Gimbal.....	57
Gambar 4.4 Hasil Minitab Pada Pengujian Kecepatan Roll.....	58
Gambar 4.5 Hasil Minitab Pada Pengujian Kecepatan Gimbal.....	60
Gambar 4.6 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Segitiga 5x3)	61
Gambar 4.7 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Segitiga 7x3)	63
Gambar 4.8 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Segitiga 9x3)	63
Gambar 4.9 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Trapeسيوم 5x3)	65
Gambar 4.10 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Trapeسيوم 7x3)	66
Gambar 4.11 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Trapeسيوم 9x3)	67
Gambar 4.12 Hasil Pengujian Perbandingan Membership Segitiga	76
Gambar 4.13 Hasil Pengujian Perbandingan Membership Trapezium	78
Gambar 4.14 Hasil Pengujian Perbandingan Segitiga dan Trapezium 5x3.....	79
Gambar 4.15 Hasil Pengujian Perbandingan Segitiga dan Trapezium 7x3.....	80
Gambar 4.16 Hasil Pengujian Perbandingan Segitiga dan Trapezium 9x3.....	81
Gambar 4.17 Hasil Perbandingan Membership Pada Fungsi Segitiga (100 gram).....	82
Gambar 4.18 Hasil Perbandingan Membership Pada Fungsi Trapezium (100 gram)..	83
Gambar 4.19 Hasil Perbandingan Membership 5x3 dengan Beban 100 gram.....	84
Gambar 4.20 Hasil Perbandingan Membership 7x3 dengan Beban 100gram.....	85
Gambar 4.21 Hasil Perbandingan Membership 9x3 dengan Beban 100 gram.....	85
Gambar 4.22 Hasil Perbandingan Membership Pada Fungsi Segitiga (500 gram).....	86
Gambar 4.23 Hasil Perbandingan Membership Pada Fungsi Trapezium (500 gram)..	87
Gambar 4.24 Hasil Perbandingan Membership 5x3 dengan Beban 500 gram.....	88
Gambar 4.25 Hasil Perbandingan Membership 7x3 dengan Beban 500 gram.....	89
Gambar 4.26 Hasil Perbandingan Membership 9x3 dengan Beban 500 gram.....	90
Gambar 4.27 Hasil Perbandingan Membership Segitiga 5x3 dengan Massa.....	90
Gambar 4.28 Hasil Perbandingan Membership Segitiga 7x3 dengan Massa.....	91
Gambar 4.29 Hasil Perbandingan Membership Segitiga 9x3 dengan Massa.....	92
Gambar 4.30 Hasil Perbandingan Membership Trapezium 5x3 dengan Massa.....	93
Gambar 4.31 Hasil Perbandingan Membership Trapezium 7x3 dengan Massa.....	93
Gambar 4.32 Hasil Perbandingan Membership Trapezium 9x3 dengan Massa.....	94

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Parameter Pemodelan Kendaraan	29
Tabel 3.2 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Error Segitiga 5x3	39
Tabel 3.3 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Delta Error Segitiga 5x3	39
Tabel 3.4 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Servo Segitiga 5x3	39
Tabel 3.5 Rulebase Segitiga 5x3	40
Tabel 3.6 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Error Segitiga 7x3	41
Tabel 3.7 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Delta Error Segitiga 7x3	41
Tabel 3.8 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Servo Segitiga 7x3	41
Tabel 3.9 Rulebase Segitiga 7x3	42
Tabel 3.10 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Error Segitiga 9x3	43
Tabel 3.11 Rulebase Segitiga 9x3	44
Tabel 3.12 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Delta Error Segitiga 9x3	45
Tabel 3.13 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Servo Segitiga 9x3	45
Tabel 3.14 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Error Trapesium 5x3	48
Tabel 3.15 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Delta Error Trapesium 5x3	48
Tabel 3.16 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Servo Trapesium 5x3	48
Tabel 3.17 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Error Trapesium 7x3	49
Tabel 3.18 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Delta Error Trapesium 7x3	49
Tabel 3.19 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Servo Trapesium 7x3	49
Tabel 3.20 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Error Trapesium 9x3	51
Tabel 3.21 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Delta Error Trapesium 9x3	52
Tabel 3.22 <i>Range Scala</i> Variabel Linguistik Servo Trapesium 9x3	52
Tabel 4.1 Komponen Penyusun Prototipe	54
Tabel 4.2 Pengujian Pada Sensor Posisi BNO055	55
Tabel 4.3 Pengujian Aktuator Dynamixel Servo	57
Tabel 4.4 Pengujian Kecepatan Pada Sensor BNO055	58
Tabel 4.5 Pengujian Kecepatan Pada Sensor Encoder	59
Tabel 4.6 Segitiga Membership 5x3	61
Tabel 4.7 Segitiga Membership 7x3	62

Tabel 4.8 Segitiga Membership 9x3.....	64
Tabel 4.9 Trapesium Membership 5x3.....	65
Tabel 4.10 Trapesium Membership 7x3.....	66
Tabel 4.11 Trapesium Membership 9x3.....	67
Tabel 4.12 Rulebase Segitiga 5x3 yang Memiliki Nilai.....	69
Tabel 4.13 Rulebase Segitiga 7x3 yang Memiliki Nilai.....	70
Tabel 4.14 Rulebase Segitiga 9x3 yang Memiliki Nilai.....	71
Tabel 4.15 Rulebase Trapesium 5x3 yang Memiliki Nilai.....	72
Tabel 4.16 Rulebase Trapesium 7x3 yang Memiliki Nilai.....	73
Tabel 4.17 Rulebase Trapesium 9x3 yang Memiliki Nilai.....	75

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan
h_B	Ketinggian <i>center of gravity</i> bodi
h_G	Ketinggian <i>center of gravity</i> gimbal
h_F	Ketinggian <i>center of gravity flywheel</i>
m_B	Massa bodi
m_{G_i}	Massa gimbal ($i = 1, 2$)
m_{F_i}	Massa <i>flywheel</i> ($i = 1, 2$)
g	Konstanta gravitasi
ω_B	Kecepatan sudut bodi
ω_{G_i}	Kecepatan sudut gimbal ($i = 1, 2$)
ω_{F_i}	Kecepatan sudut <i>flywheel</i> ($i = 1, 2$)
ϕ	Sudut roll bodi
α_i	Sudut gimbal ($i = 1, 2$)
θ_i	Sudut <i>flywheel</i> ($i = 1, 2$)
I_{B_x}	Inersia bodi
$[I_{G_{ix}}, I_{G_{iy}}, I_{G_{iz}}]$	Inersia gimbal ($i = 1, 2$)
$[I_{F_{ix}}, I_{F_{iy}}, I_{F_{iz}}]$	Inersia <i>flywheel</i> ($i = 1, 2$)
Z	Variabel output
α_i	Nilai α predikat
z_i	Nilai variabel output

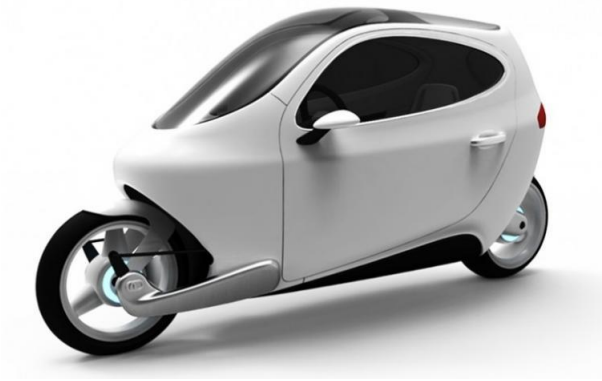
(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era modern saat ini, perkembangan teknologi semakin pesat salah satunya dalam bidang otomotif. Kendaraan roda dua adalah sistem yang tidak stabil, terutama ketika kendaraan roda dua berhenti. Keseimbangan dari kendaraan roda dua digambarkan sejajar dengan sumbu vertikal. Pada saat kendaraan roda dua mengalami perubahan posisi berupa sudut kemiringan, dapat dipastikan kendaraan akan jatuh sehingga mengakibatkan kendaraan tersebut tidak dapat kembali ke posisi stabilnya [1].



Gambar 1.1 Lit motor

Dari permasalahan ini menjadikan banyak peneliti untuk mengembangkan teknologi *self-balancing* pada kendaraan roda dua. Teknologi *self-balancing* roda dua ini sebenarnya implementasi dari konsep teori *inverted* pendulum yang dapat menyeimbangkan dirinya sendiri [2]. *Inverted* pendulum merupakan sistem pendulum yang memiliki kestabilan pada posisi terbalik yang disebut posisi ekuilibrium. Perilaku kendaraan mirip dengan sistem mekanik klasik pendulum terbalik yang dapat menyeimbangkan posisi ketika ada gangguan [3, 4, 5]. Dalam beberapa tahun terakhir, penelitian kendaraan *self-balancing* roda dua banyak

diminati karena memiliki kelebihan diantaranya hemat energi, ramah lingkungan, struktur yang sederhana, operasi yang fleksibel, dan portabilitas [6]. Penelitian ini memiliki signifikansi teoritis yang kuat dan nilai yang praktis [7]. Contoh implementasi teknologi *self-balancing* yang paling terkenal yaitu Lit Motor yang ditunjukkan pada Gambar 1.1, selain itu juga motor listrik Honda dan *segwey*.

Ada beberapa metode yang digunakan untuk mengontrol keseimbangan yaitu giroskopik penyeimbang, penyeimbang roda gila, penyeimbang pendulum terbalik, dan keseimbangan kemudi [8]. Dalam penelitian ini menggunakan tipe penyeimbang giroskopik atau *Control Moment Gyroscope* (CMG) yang merupakan salah satu alat penukar momentum sudut untuk menghasilkan output torsi yang besar pada bodi. Giroskop adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur atau mempertahankan orientasi dan kecepatan sudut [9]. Giroskopik telah menjadi peran penting dalam banyak aplikasi di berbagai bidang teknis. Keuntungan penyeimbang giroskopik menghasilkan torsi yang besar dengan respon yang cepat [9,10,11,12]. Sedangkan kerugiannya adalah sistem ini membutuhkan lebih banyak energi dan beban lebih berat [10]. Eksperimen dilakukan dengan membuat prototipe kendaraan roda dua yang memanfaatkan giroskopik penyeimbang.

Fokus penelitian ini adalah mengimplementasikan kontrol logika *fuzzy* pada *control moment gyroscope* yang digunakan untuk prototipe kendaraan roda dua agar tetap dalam posisi seimbang. Kontrol *fuzzy logic* memberikan hasil yang lebih baik dan respon yang lebih cepat dibandingkan kontrol PID [13,14,15]. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari *fuzzy logic control* dari model penyeimbang giroskopik dalam menyeimbangkan prototipe. Sehingga kedepannya model dan kontrol pada penelitian ini dapat diimplementasikan pada kendaraan roda dua atau robot lainnya.

1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan latar belakang diatas, dapat dirumuskan beberapa rumusan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana menyeimbangkan prototipe kendaraan roda dua menggunakan penyeimbang giroskopik?

2. Bagaimana hasil respon dari prototipe kendaraan roda dua yang dikontrol oleh *fuzzy logic*?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Merancang mekanisme sistem untuk menyeimbangkan prototipe kendaraan roda dua menggunakan penyeimbang giroskopik.
2. Mengetahui hasil respon dari prototipe kendaraan roda dua yang dikontrol oleh *fuzzy logic*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini dideskripsikan sebagai berikut:

1. Prototipe kendaraan penyeimbang yang digunakan adalah *Control Moment Gyroscope* (CMG).
2. Prototipe memanfaatkan *double gyroscope* yang dipasang vertikal untuk sistem penyeimbang.
3. Kedua *flywheel* berputar dengan kecepatan yang sama.
4. Stabilisasi prototipe kendaraan roda dua dirancang menggunakan pengontrol *fuzzy logic*.
5. *Fuzzy logic* yang digunakan adalah tipe sugeno dengan fungsi segitiga dan trapesium.
6. Pengujian dilakukan tanpa penambahan massa selama 60 detik, dengan penambahan massa 100 gram dan 500 gram selama 30 detik.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian berikutnya sehubungan dengan penstabil kendaraan roda dua dengan memanfaatkan *Control Moment Gyroscope*.
2. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai acuan penerapan kontrol *fuzzy logic* pada *inverted pendulum* ayai robot-robot lainnya sebagai penstabil suatu sistem.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB 2

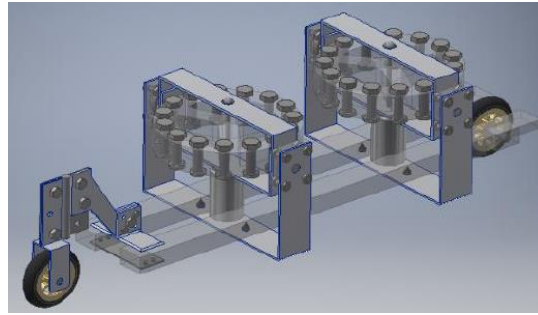
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bagian ini memberikan informasi tentang penelitian sebelumnya dan teori dasar tentang teknologi saat ini yang tersedia untuk merancang pendulum terbalik giroskop. Selain itu juga menyoroti berbagai metode yang digunakan yang mirip dengan topik ini.

2.1 Penelitian Terdahulu

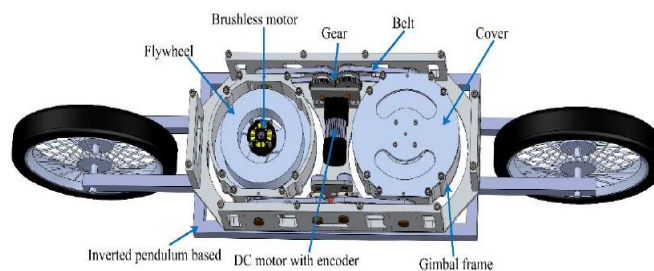
Perkembangan teknologi di bidang otomotif semakin pesat. Hal ini ditunjukkan dengan banyaknya peneliti yang tertarik untuk mengembangkan teknologi *self-balancing* pada kendaraan roda dua. Teknologi *self-balancing* roda dua ini sebenarnya implementasi dari konsep teori *inverted* pendulum yang dapat menyeimbangkan dirinya sendiri [2]. Beberapa metode yang digunakan untuk mengontrol keseimbangan sepeda tanpa pengendara yaitu giroskopik penyeimbang, penyeimbang roda gila, penyeimbang pendulum terbalik, dan keseimbangan kemudi [8]. Dari beberapa metode tersebut memiliki fungsi yang sama yaitu untuk menyeimbangkan pendulum dalam posisi tegak, namun hal yang membedakan adalah cara untuk menstabilkannya.

Wayan Ksamawati [1] melakukan penelitian tentang sistem stabilisasi double giroskop yang menggunakan dua buah benda *rigid* yang berputar pada suatu sistem kendaraan tidak stabil. Pengujian dilakukan pada model kendaraan skala kecil dan dievaluasi secara teoritis, simulasi 3D menggunakan *Autodesk Inventor* 2016, dan eksperimen. Ketiga cara evaluasi tersebut diberi input berupa variasi sudut kemiringan kendaraan (θ), dan posisi awal gimbal (α) dengan output berupa putaran giroskop (Ω) yang dapat menstabilkan kendaraan. Berdasarkan *trendline* dari ketiga jenis evaluasi tersebut menunjukkan semakin besar sudut awal kendaraan maka semakin besar pula nilai putaran *flywheel* yang digunakan. Gambar 2.1 adalah rancangan 3D yang telah dilakukan menggunakan *autodesk inventor*.



Gambar 2.1 Rancangan Autodesk Inventor

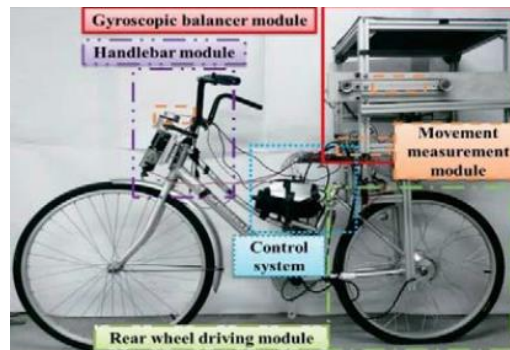
Buntheng Chhon [9] melakukan penelitian tentang stabilisasi giroskopik untuk kendaraan roda dua. Sistem penyeimbang menggunakan dua giroskopik yang dipasang secara horizontal yang ditunjukkan Gambar 2.2. Persamaan gerak nonlinier dikembangkan untuk mengekspresikan kendaraan konsep menggunakan mekanika Lagrangian. Percobaan dilakukan menggunakan dua pengontrol yaitu pengontrol PID dan pengontrol LQR. Kontroler PID mempertahankan poros motor pada posisi nol tetapi jika sudut gimbal tidak dikembalikan ke nol setelah menstabilkan kendaraan maka gyro tidak akan mampu menghasilkan torsi reaksi maksimum untuk gangguan berikutnya. Sedangkan untuk pengontrol LQR, menghasilkan respons yang baik.



Gambar 2.2 Model Kendaraan Giroskopik 2 Flywheel

Cheng-Hung Chi dan Jui-Jen Chou [10] telah mengembangkan kendaraan roda dua tanpa pengendara dengan pengontrol penyeimbang giroskopik oleh *Fuzzy Sliding Mode Controller (FSMC)* dan *Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller*

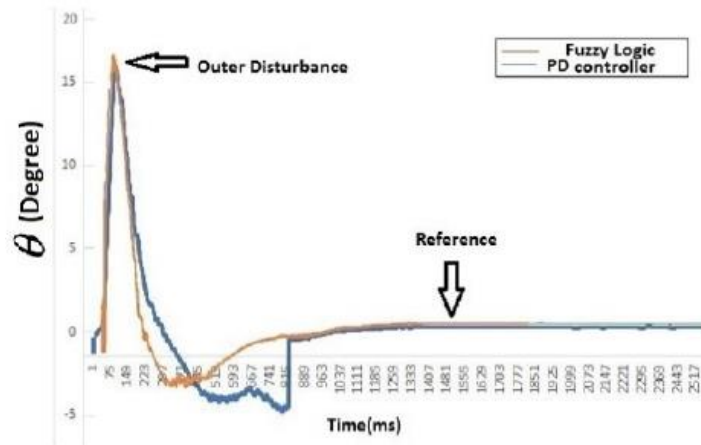
(AFSMC). Kontrol FSMC digunakan karena memiliki kinerja yang lebih baik dalam mengendalikan sistem nonlinier daripada kontrol PID. Dalam penelitian tersebut menggunakan tipe penyeimbang giroskopik dengan 1 *flywheel* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



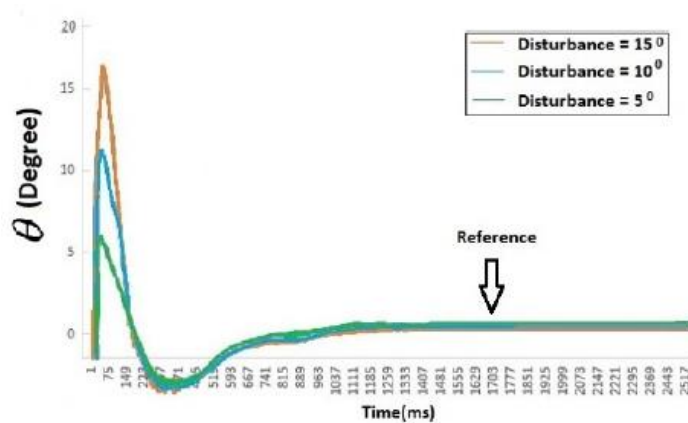
Gambar 2. 3 Kendaraan Giroskopik 1 *Flywheel*

Huabin Wang dkk. [13] menunjukkan hasil implementasi pengontrol PID dan *fuzzy* pada motor DC tanpa sikat (BLDC). Hasil simulasi menghasilkan respon yang lebih cepat dibandingkan dengan kontrol PID tradisional. Selain itu, kontrol *fuzzy* logic juga diterapkan pada aktuator motor servo yang digunakan sebagai penggerak rudder dan menghasilkan respon yang lebih baik [14]. Sedangkan pada penelitian K.S.Krishna Veni dkk. [15] melakukan percobaan menggunakan pengontrol PI dan *Fuzzy*. Pengontrol PI dirancang dengan baik dan parameter disetel dengan baik dengan menggunakan *Ziegler Nichols*. Kontroler *Fuzzy* juga dirancang dan dipertimbangkan untuk perbandingan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pengontrol *fuzzy* memberikan kecepatan respon yang lebih baik dibandingkan dengan PI dan memberikan penyesuaian output yang lebih cepat.

Ali Rohan dkk. [16] menyimpulkan teknik pengendalian yang efektif dan efisien berbasis *fuzzy* dalam penelitiannya. Simulasi dan implementasi untuk menstabilkan pendulum terbalik giroskopik sistem dilakukan. Teknik kontrol *fuzzy* dibandingkan dengan metode kontroler PD. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa teknik kontrol berbasis logika *fuzzy* bekerja dengan baik untuk mengurangi gangguan yang disebabkan oleh beberapa efek eksternal.



Gambar 2.4 Hasil Perbandingan *Control Fuzzy* dan PD

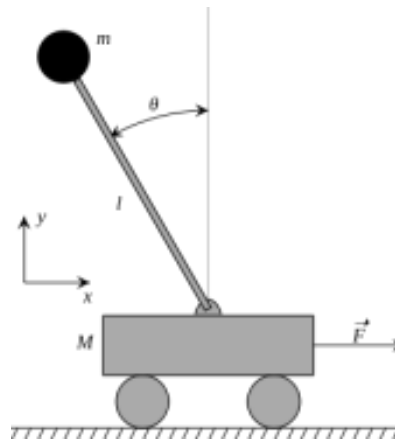


Gambar 2.5 Hasil *Control Fuzzy* dengan Gangguan Tertentu

2.2 Inverted Pendulum

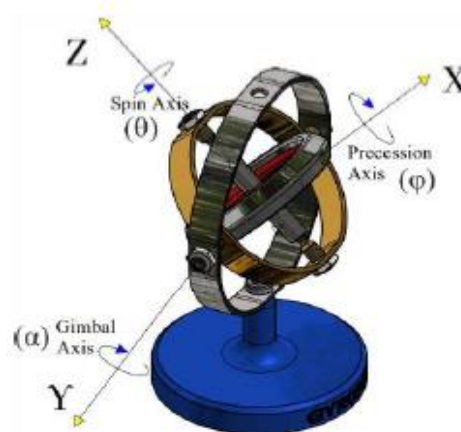
Pada penelitian ini kendaraan yang dianalisa merupakan kendaraan roda dua berupa skuter. Seperti pada umumnya kendaraan roda dua, skuter tidak dapat seimbang dengan sendirinya dibutuhkan suatu alat atau gaya tambahan yang bisa melawan gaya yang menyebabkan skuter tersebut jatuh. Derajat kebebasan pada gerak jatuhnya suatu kendaraan roda dua dikenal sebagai istilah *rolling*. Oleh karena itu peristiwa gerak *rolling* pada kendaraan roda dua dapat dimodelkan sebagai *inverted pendulum* [17]. *Inverted pendulum* adalah sebuah pendulum terbalik yang dalam keadaan normalnya memiliki kondisi yang tidak stabil dan akan

cenderung jatuh. Agar dapat stabil diperlukan gaya lain untuk melawan gaya yang menyebabkan *inverted* pendulum tersebut jatuh. Pemodelan sederhana dari *inverted* pendulum dapat dilihat pada Gambar 2.6 [18].



Gambar 2.6 *Inverted* Pendulum Sederhana

2.3 Control Moment Gyroscope (CMG)



Gambar 2.7 Giroskop Momen Kontrol [19]

Control Moment Gyroscope (CMG) atau giroskop momen kontrol dikenal sebagai penstabil giroskopik yang memiliki respons waktu yang singkat dan sistem dapat stabil. Giroskop adalah perangkat untuk mengukur atau mempertahankan orientasi, yang berlandaskan pada prinsip-prinsip momentum sudut. Giroskop dapat

dijadikan sebagai sensor maupun aktuator. Pada giroskop sederhana terdapat dua hal penting yang menyebabkan terjadinya efek *gyroscopic* yang dapat kita amati. Pertama adalah giroskop yang berputar disekitar sumbunya dan yang kedua adalah torsi eksternal yang dihasilkan untuk memutar salah satu sumbu dari dua sumbu tegak lurus lainnya. Giroskop dapat menjaga posisi dikarenakan terdapat prinsip-prinsip momentum sudut diakibatkan oleh putaran giroskop. Perputaran ini mengakibatkan terjadinya perputaran lain yang secara simultan terjadi pada sumbu yang tegak lurus sumbu putar *flywheel* dan sumbu putar gimbal. Karakteristik lainnya dari giroskop adalah presisi. Presisi adalah gerakan memiringkan atau berputar pada sumbu giroskop sebagai akibat dari gaya eksternal yang berpengaruh terhadap giroskop. Akibat dari presesi ini suatu giroskop menghasilkan torsi yang disebut torsi presisi [19].

Gambar 2.7 menunjukkan *inverted* pendulum sederhana dengan *flywheel* yang terpasang pada gimbal berputar di sekitar sumbu z dengan kecepatan putaran $\omega_z = \dot{\theta}$. Dengan notasi I_f yang menunjukkan momen inersia pada *flywheel* di sekitar sumbu-z, sesuai dengan hukum kedua Newton, momentum sudut yang dibuat oleh putaran giroskop adalah:

$$M_f = I_f \times \dot{\theta} \quad (2.1)$$

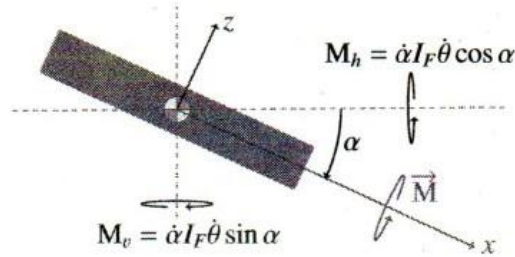
Untuk menciptakan torsi presisi, diperlukan adanya *flywheel* yang berputar pada gimbal dengan nilai kecepatan sudut lebih dari nol dan laju perubahan momentum sudut, sehingga dapat dikatakan bahwa torsi presesi hanya akan terjadi pada nilai $\dot{\omega}_y = \dot{\alpha} > 0$, dimana α adalah sudut presesi gimbal dan $\dot{\alpha}$ adalah kecepatan sudut gimbal. Oleh karena itu besarnya torsi presisi yang dihasilkan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\tau = M_f \times \dot{\alpha} \quad (2.2)$$

Pada Gambar 2.8 merupakan *free body diagram* dari torsi presisi efektivitas, dimana torsi presisi efektivitas yang dapat dihasilkan oleh kontrol momen giroskop pada sumbu horizontal vertikal adalah sebagai berikut:

$$M_h = \dot{\alpha} \times I_f \times \dot{\theta} \times \cos\alpha \quad (2.3)$$

$$M_v = \dot{\alpha} \times I_F \times \dot{\theta} \times \sin \alpha \quad (2.4)$$



Gambar 2.8 Torsi Presisi Efektifitas

Secara garis besar, besarnya torsi presisi dari bergantung pada nilai kecepatan sudut *flywheel* dan juga kecepatan sudut gimbal, sehingga ada empat parameter penting yang berpengaruh pada penelitian ini :

1. massa *flywheel* giroskopik (M_f) ,
2. radius *flywheel* giroskopik (R_f) ,
3. kecepatan berputar *flywheel* ($\dot{\theta}$) ,
4. kecepatan berputar gimbal ($\dot{\alpha}$) ,

Parameter seperti putaran *flywheel* ($\dot{\theta}$) dan putaran gimbal ($\dot{\alpha}$) yang sangat tergantung pada seberapa banyak kekuatan yang bisa kita berikan kepada giroskop.

2.4 Lagrange Equation

Persamaan Lagrangian digunakan untuk menganalisis persamaan gerak berdasarkan energi. Lagrangian adalah sebuah fungsi yang merangkum dinamika keseluruhan sistem. Secara keseluruhan, lagrangian memiliki satuan energi tetapi tidak ada ekspresi tunggal untuk semua sistem fisik. Persamaan gerak Lagrange yang disimbolkan dengan L. Lagrange menggabungkan energi kinetik yang dilambangkan dengan (T) dan energi potensial dilambangkan dengan (V). Hubungan antara kedua energi dapat ditulis dalam persamaan 2.5.

$$L = T - V \quad (2.5)$$

dimana:

$$T = T_t + T_r \quad (2.6)$$

$$T_t = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N m_k v^2 \quad (2.7)$$

$$T_r = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N I_k \omega^2 \quad (2.8)$$

$$V = m g h \quad (2.9)$$

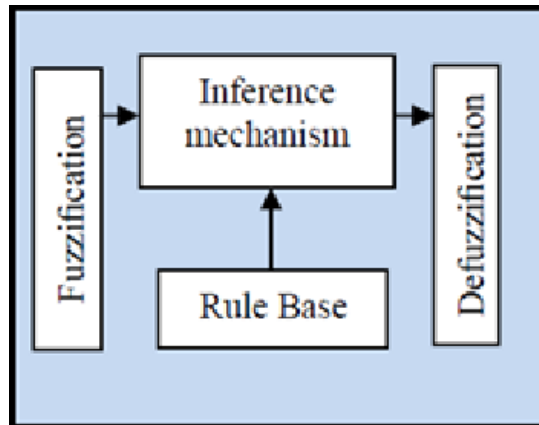
T_t adalah energi kinetik translasi, T_r adalah energi kinetik rotasi dan V adalah potensial energi. Energi kinetik adalah energi gerak sistem. Sedangkan energi potensial sistem mencerminkan energi interaksi antar partikel, yaitu berapa banyak energi yang dimiliki oleh satu partikel karena pengaruh-pengaruh lain dan pengaruh eksternal lainnya. Persamaan gerak tersebut diturunkan sehingga diperoleh:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = T_i \quad (2.10)$$

dimana T_i merupakan torsi dari aktuator.

2.5 Fuzzy Logic Control

Logika *Fuzzy* adalah peningkatan dari logika *Boolean* yang mengenalkan konsep kebenaran sebagian. Di mana logika klasik menyatakan bahwa segala hal dapat diekspresikan dalam istilah *binary* (0 atau 1, hitam atau putih, ya atau tidak), logika *fuzzy* menggantikan kebenaran *boolean* dengan tingkat kebenaran. Logika *Fuzzy* memungkinkan nilai keanggotaan antara 0 dan 1, tingkat keabuan dan juga hitam dan putih, dan dalam bentuk linguistik, konsep tidak pasti seperti "sedikit", "lumayan", dan "sangat". Dia berhubungan dengan set *fuzzy* dan teori kemungkinan. *Fuzzy* diperkenalkan oleh Dr. Lotfi Zadeh dari Universitas California, Berkeley pada 1965. Pada penelitian ini menggunakan *fuzzy* tipe sugeno. *Fuzzy logic control* merupakan tipe controller yang dapat dikerjakan tanpa menggunakan model matematis dari persamaan geraknya. Gambar 2.9 adalah diagram alir dari kontrol *fuzzy logic control*.



Gambar 2.9 Kontroller *Fuzzy*

2.6 Himpunan Fuzzy

Pada himpunan tegas (*crisp set*), perpindahan antara elemen yang termasuk anggota dan elemen yang bukan anggota terjadi secara tegas. Namun pada himpunan *fuzzy* yang menoleransi kesamaran, batas tegas yang memisahkan anggota dan bukan anggota pada himpunan tegas akan dieliminasi. Sehingga perpindahan antara anggota penuh dan bukan anggota akan terjadi berangsur-angsur karena keberadaan daerah *overlapping* pada himpunan *fuzzy*.

Berikut beberapa hal yang perlu diketahui mengenai sistem *fuzzy*, yaitu:

1. Variabel *fuzzy*

Adalah variabel yang dibahas dalam sistem *fuzzy*. Contoh: temperatur, kecepatan, posisi, dll.

2. Himpunan *fuzzy*

Adalah suatu kelompok yang mewakili suatu keadaan tertentu dalam variabel *fuzzy*. Umumnya ciri penamaan dalam himpunan *fuzzy* adalah linguistik. Linguistik merupakan penamaan yang nilainya berupa kata-kata, yang digunakan untuk memperkirakan nilai atau keadaan yang cukup sulit untuk dinyatakan secara eksak. Contoh: lambat, cepat, sangat cepat.

3. Semesta pembicaraan

Adalah seluruh nilai yang diizinkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*. Semesta pembicaraan merupakan himpunan bilangan real

yang nilainya selalu bertambah. Nilai semesta pembicaraan dapat berupa bilangan positif atau negatif. Contoh: semesta pembicaraan untuk variabel kecepatan (km/jam): [0 80].

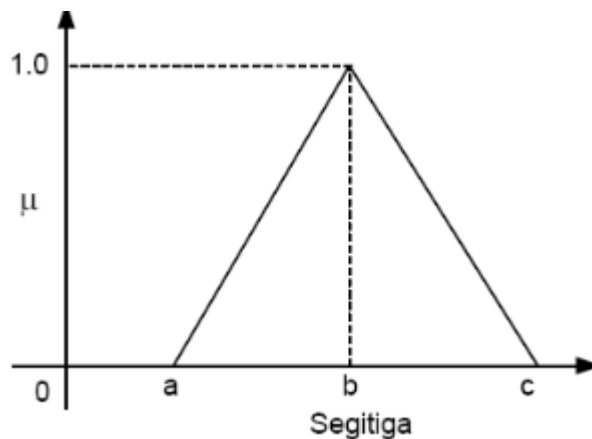
Semesta pembicaraan dapat dibagi menjadi kelompok yang lebih kecil, yaitu: domain. Contoh: domain untuk kecepatan lambat: [0 40].

2.7 Fungsi Keanggotaan

Fungsi keanggotaan (*membership function*) merupakan kurva yang menunjukkan pemetaan *input* data ke dalam nilai keanggotaannya dengan rentang nol sampai satu. Berikut beberapa fungsi keanggotaan yang umum digunakan, yaitu:

a. Fungsi segitiga

$$(x : a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.11)$$



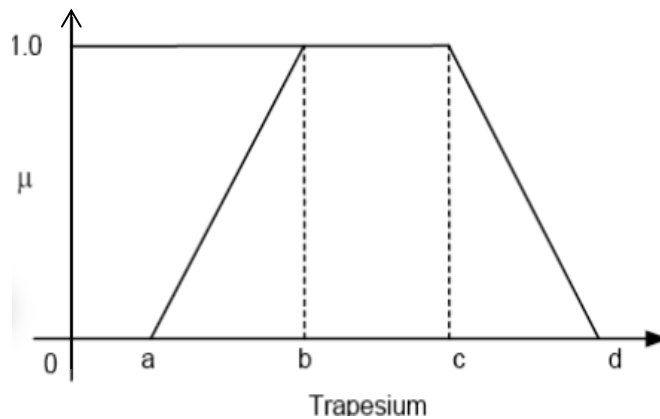
Gambar 2.10 Fungsi Segitiga

Fungsi segitiga merupakan gabungan antara dua fungsi linear. Fungsi ini ditentukan oleh tiga parameter {a,b,c} dengan ketentuan $a < b < c$. Pada Gambar 2.11 ditampilkan bentuk fungsi segitiga. Fungsi keanggotaan fungsi segitiga, yaitu:

b. Fungsi trapesium

Fungsi trapesium pada dasarnya seperti fungsi segitiga yang memiliki beberapa titik dengan nilai keanggotaan satu. Fungsi ini ditentukan oleh empat parameter $\{a,b,c,d\}$ dengan ketentuan $a < b \leq c < d$. Pada Gambar 2.12 ditampilkan bentuk fungsi trapesium. Fungsi keanggotaan fungsi trapesium, yaitu:

$$(x;a,b,c,d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (2.12)$$



Gambar 2.11 Fungsi Trapesium

2.8 Sistem Interferensi Fuzzy

Inferensi *fuzzy* adalah cara penarikan kesimpulan pada sistem *fuzzy*. Pemetaan *input* ke *output* pada sistem *fuzzy* berada dalam sekumpulan aturan kondisi-aksi atau bentuk *IF-THEN*. Premis merupakan kondisi dan konsekuen merupakan aksi. Umumnya *input* sistem *fuzzy* dihubungkan dengan premis sedangkan *output* sistem *fuzzy* dihubungkan dengan konsekuen [22]. Sistem *fuzzy* dibangun oleh empat bagian utama, yaitu:

1. Fuzzifikasi

Mengonversi *input* kontroler kedalam bentuk informasi yang dapat dipahami oleh mekanisme inferensi untuk mengaktifkan dan mengaplikasikan aturan-aturan *IF-THEN*.

2. Dasar-aturan

Dasar-aturan merupakan sekumpulan aturan *IF-THEN* yang berisi kuantifikasi uraian linguistik pakar tentang cara mencapai *control* yang baik.

3. Mekanisme inferensi

Disebut juga inferensi *fuzzy*, yang menyamai cara pengambilan keputusan pakar dalam menerjemahkan dan mengaplikasikan pengetahuan tentang cara terbaik untuk mengontrol *plant*.

4. Defuzzifikasi

Mengonversi kesimpulan yang dihasilkan mekanisme inferensi menjadi *input* aktual untuk proses.

Tahapan-tahapan dalam metode Fuzzy Sugeno yang digunakan yaitu sebagai berikut:

1. Pembentukan variabel fuzzy ini terdiri dari variabel yang akan dijadikan variabel input dan variabel output. Variabel tersebut memiliki notasi dan masing-masing semesta pembicaraan dengan jumlah dari yang terkecil dan terbesar.
2. Pembentukan variabel linguistik fuzzy ini terdiri dari variabel keadaan pada variabel input dan variabel output. Keadaan tersebut memiliki notasi dan *range* nilai masing-masing.
3. Pembentukan himpunan fuzzy. Tahapan ini terdapat variabel input dari sistem fuzzy dibuat ke dalam himpunan fuzzy untuk dapat digunakan dalam perhitungan. Pada tahap ini menentukan derajat keanggotaan dari setiap himpunan fuzzy.
4. Fungsi implikasi yang digunakan dalam metode Fuzzy Sugeno adalah min. Namun hal itu berlaku jika input lebih dari satu. Pembuatan himpunan fuzzy dapat dibuat berdasarkan dengan variabel input dan output yang sudah dibuat sebelumnya. Rumusnya sebagai berikut :

$$\mu A \cap B = \min (\mu A (x), \mu B (y)) \quad (2.13)$$

5. Defuzzifikasi merupakan tahap perhitungan crisp output dimana outputnya adalah bilangan dari domain himpunan fuzzy tersebut [21]. Rumus berikut *fuzzy* sugeno dapat dilihat sebagai berikut:

$$Z = \frac{(\alpha - \text{predikat}_1 * z_1) + (\alpha - \text{predikat}_2 * z_2) + \dots + (\alpha - \text{predikat}_n * z_n)}{\alpha - \text{predikat}_1 + \alpha - \text{predikat}_2 + \dots + \alpha - \text{predikat}_n} \quad (2.14)$$

2.9 Jenis-Jenis Fuzzy Logic

➤ Fuzzy Tsukamoto

Pada metode Tsukamoto, setiap konsekuen pada aturan yang berbentuk *if – then* harus direpresentasikan dengan suatu himpunan *fuzzy* dengan fungsi keanggotaan monoton. Sebagai hasilnya, keluaran hasil inferensi dari tiap-tiap aturan diberikan secara tegas (*crisp*) berdasarkan α -predikat (*fire strength*). Hasil akhir menggunakan rata-rata terbobot. Implikasi dengan fungsi MIN untuk mendapatkan nilai α -predikat tiap-tiap rule ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$) Kemudian masing-masing nilai α -predikat ini digunakan untuk menghitung keluaran hasil inferensi secara tegas (*crisp*) masing-masing rule ($z_1, z_2, z_3, \dots, z_n$). Defuzzifikasi menggunakan metode rata-rata.

$$Z = \frac{\sum(\alpha_i * z_i)}{\sum \alpha_i} \quad (2.15)$$

dimana :
 Z = Variabel output
 α_i = Nilai α predikat
 z_i = Nilai variabel output

➤ Fuzzy Mamdani

Metode Mamdani pertama kali dikemukakan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975, metode ini biasanya digunakan untuk mengendalikan mesin uap dan boiler yang dikombinasikan dengan sekumpulan aturan kontrol linguistik yang diperoleh dari operator yang berpengalaman. *Fuzzy* mamdani juga disebut *fuzzy min-max*. Implikasi digunakan untuk menentukan bentuk akhir fuzzy set keluaran. Fungsi implikasi yang digunakan adalah Min. Sedangkan proses mengkombinasikan keluaran semua aturan *if - then* menjadi sebuah kumpulan fuzzy tunggal menggunakan fungsi Max. metode untuk defuzzifikasi yaitu metode

centroid atau (composite moment). Metode ini mengambil titik pusat (z^*) daerah fuzzy dengan menghitung momen dan luas setiap daerah.

$$Z^* = \frac{M_1 + M_2 \dots + M_i}{A_1 + A_2 \dots + A_i} \quad (2.16)$$

➤ **Fuzzy Sugeno**

Metode Sugeno diperkenalkan pada tahun 1985 oleh Takagi-Sugeno Kang. Penalaran metode Sugeno hampir sama dengan metode Mamdani, yang membedakan adalah output yang berupa konstanta dan bukan himpunan fuzzy. Defuzzifikasi dilakukan dengan cara mencari nilai rata-ratanya. Untuk menentukan output menggunakan Persamaan 2.15.

2.10 Hardware

Pada penelitian ini menggunakan beberapa hardware diantaranya yaitu:

2.10.1 BNO055

BNO055 yang merupakan sebuah modul sensor IMU 9 DoF yang mengkombinasikan 3-axis accelerometer 14-bit, 3-axis gyroscope 16-bit, 3-axis geomagnetic sensor, serta mikrokontroler ARM Cortex-M0 32-bit dalam satu modul yang ringkas. Output data yang dihasilkan dapat diakses dengan mudah oleh mikrokontroler atau mini PC melalui antarmuka serial secara default, atau Anda juga dapat menggunakan antarmuka I2C dengan cara menghubungkan jalur komunikasi yang disediakan pada board. jalur komunikasi serial memiliki baud rate 115.200 bps dan jalur I2C memiliki alamat 0x50 (0x28 7 bit) dengan clock hingga 400 KHz. Kompatibel penuh dengan Arduino dan raspberry Pi.

2.10.2 Potensiometer

Potensiometer adalah salah satu jenis *resistor* yang nilai resistansinya dapat diatur sesuai dengan kebutuhan rangkaian elektronika ataupun kebutuhan pemakainya. *Potensiometer* merupakan keluarga resistor yang tergolong dalam kategori *variable resistor*. Secara struktur, *potensiometer* terdiri dari 3 kaki Terminal dengan sebuah shaft atau tuas yang berfungsi sebagai pengaturnya.

2.10.3 Encoder

Encoder adalah salah satu sensor yang sering ditemukan hampir di semua industri dan pada proyek-proyek lainnya. Berdasarkan penggunaannya, encoder adalah sensor gerak mekanis yang menghasilkan sinyal digital sebagai respons terhadap gerakan. Sebagai perangkat elektro-mekanis, encoder dapat memberikan informasi kepada pengguna sistem kontrol gerak mengenai posisi, kecepatan, dan arah. Ada dua jenis encoders yaitu linear dan rotary. Encoder linier merespons gerakan di sepanjang jalur, sedangkan rotary encoder merespons gerakan rotasi. Disamping encoder linier dan rotary, berdasarkan sinyalnya ada yang disebut incremental encoders dan absolut encoders.

2.10.4 Dynamixel Shield dan Dynamixel Servo

Dynamixel Shield adalah *shield* tambahan untuk Arduino yang dapat digunakan untuk mengontrol servo *dynamixel* secara langsung melalui Arduino. Shield dapat dipasang ke Arduino secara plug-and-play tanpa perlu menambahkan kabel jumper. Shield ini juga mendukung komunikasi TTL dan RS-485 untuk terhubung ke servo *dynamixel*. Kompatibel dengan sebagian besar servo *dynamixel* dan library juga disediakan untuk memudahkan menghubungkan Arduino ke servo *dynamixel*.

Dynamixel Servo adalah sistem aktuator cerdas yang dikembangkan untuk menjadi sambungan sambungan eksklusif pada robot atau struktur mekanik. *Dynamixel Servo* dirancang untuk menjadi modular dan daisy dirantai pada robot atau desain mekanis apa pun untuk gerakan robot yang kuat dan fleksibel. servo *dynamixel* adalah aktuator berkinerja tinggi dengan Motor DC (*Direct Current*) sepenuhnya + Pengurangan Gearhead + Pengendali + Driver + Jaringan, semua dalam satu aktuator modul servo. Dapat diprogram dan jaringan, status aktuator dapat dibaca dan dipantau melalui aliran paket data. *Dynamixel X-Series* adalah seri servomotor ROBOTIS saat ini. Servo motor XM540-W270-T dilengkapi dengan encoder magnetik tanpa kontak yang memungkinkan rotasi 360° hingga 37RPM. Servo tersebut mampu menghasilkan torsi hingga 12.9 N.m dengan tegangan 14,8V. Fitur luar biasa ini dipadankan dengan bobot 165g yang rendah menghasilkan servomotor yang sangat efisien untuk bidang aplikasi universal.

2.10.5 Elektronik Speed Control dan Motor Brushless DC

ESC (*Elektronik Speed Control*) yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan motor, selain itu juga berfungsi untuk menaikkan jumlah arus yang diperlukan oleh motor. ESC dapat dikatakan juga sebagai *driver* motor dengan mengeluarkan pulsa untuk *brushless* motor yang berasal dari *mikrokontroller*.

Motor *brushless* DC atau BLDC merupakan jenis motor listrik synchronous. Pada umumnya motor BLDC bekerja dengan gaya tarik antara dua magnet dengan kutub yang sama. Secara konstruksi Motor BLDC terdiri dari rotor yang berupa magnet permanen sehingga kutubnya tetap sedangkan stator berupa belitan kawat email sehingga kutub magnet tersebut dapat berubah tergantung polaritas arus belitan stator yang diberikan. Pada motor BLDC ini memiliki lebih besar, kecepatan motor yang stabil dan lebih efisien, suara putaran lebih halus, dan tidak membutuhkan *gear* tambahan bila dibandingkan dengan motor jenis *brushed* [2]. T-Motor MN40 series motor dilengkapi dengan bantalan dua kali lebih besar dari ukuran motor yang sama. Bantalan bola besar yang memenuhi syarat, yang sesuai dengan kelancaran kecepatan rendah dan memungkinkan frame yang stabil terhadap tekanan, dimasukkan ke dalam presisi aplikasi.

2.10.6 Arduino

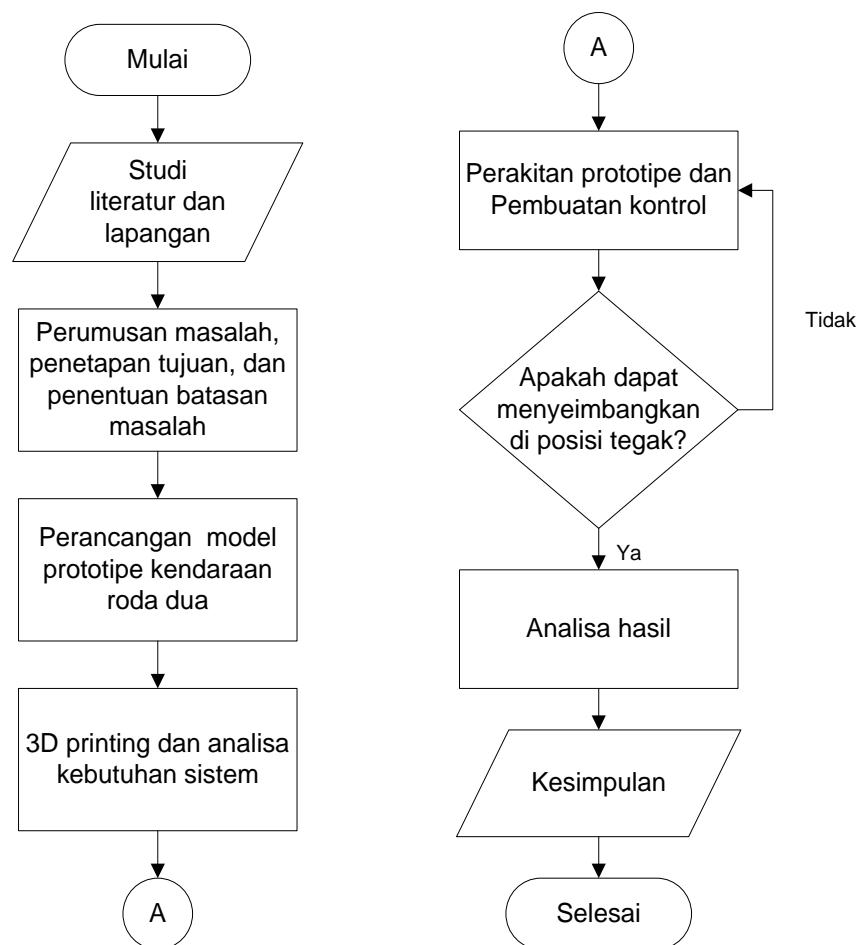
Arduino adalah sebuah minimum sistem *mikrokontroller* bersifat open-source yang banyak digunakan untuk membangun sebuah project elektronika. Platform Arduino berisi dua yaitu hardware berupa board dan sebuah software atau IDE (*Integrated Development Environment*) yang berjalan pada komputer, digunakan untuk menulis dan mengisikan program ke board Arduino. Arduino merupakan salah satu mikrokontroller yang banyak digunakan, karena secara mudah terhubung dengan kabel power USB atau kabel power supply adaptor AC ke DC atau juga battery [20]. Arduino memiliki beberapa jenis seperti arduino mega, uno, nano, dan lain-lain.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian ini dilakukan simulasi software Matlab untuk desain *fuzzy logic control* dan metode pengujian secara *real time* pada *prototype* menggunakan arduino sebagai kontrol utamanya.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini dilakukan untuk analisa kontrol momen giroskop untuk menyeimbangkan *prototype* kendaraan roda dua. Dalam menganalisa giroskop pada kendaraan roda dua dan pembuatan sistem *fuzzy logic control* dilakukan beberapa tahapan yang ditunjukkan oleh Gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Langkah–langkah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur dan Lapangan

Pada tahap studi literatur dilakukan kajian secara teoritis mengenai pemahaman dasar mengenai *inverted* pendulum, giroskopik, sistem instrumen, rangkaian elektronika dan *software* yang mendukung untuk penyelesaian permasalahan dalam penelitian ini. Studi pustaka yang digunakan diperoleh dari buku, jurnal, internet atau penelitian sebelumnya. Sedangkan studi lapangan dilakukan dengan melakukan kajian terhadap model mekanik, komponen elektronika, dan software yang digunakan pada penelitian ini maupun pada penelitian sebelumnya.

2. Perumusan Masalah, Penetapan Tujuan, dan Penentuan Batasan Masalah

Perumusan masalah penelitian ini adalah Bagaimana menyeimbangkan prototipe kendaraan roda dua menggunakan penyeimbang giroskopik dan Bagaimana mengimplementasikan *fuzzy logic control* pada prototipe nya. Sedangkan tujuan penelitian ini yaitu merancang prototipe kendaraan roda dua menggunakan penyeimbang giroskopik serta mengimplementasikan *fuzzy logic control* pada prototipe nya. Batasan masalah dari peneliti ini adalah model kendaraan roda dua masih dalam bentuk prototype, sistem penyeimbang menggunakan *CMG*, dan metode kontrol yang digunakan adalah *fuzzy logic*.

3. Perancangan Model Prototipe

Perancangan model prototipe dilakukan menggunakan *software solidworks* untuk membuat komponen-komponen yang nantinya di *print* 3D. Model rancangan prototipe dalam bentuk 3D yang terdiri dari *flywheel*, gimbal, dan *body*, dan komponen pendukung lainnya.

4. 3D *Printing* dan Analisa Kebutuhan Sistem

Setelah didapatkan model rancangan *prototype* maka dilanjutkan proses cetak 3D menggunakan bahan PLA. Selain itu dilakukan identifikasi kebutuhan hardware meliputi sensor dan aktuatornya.

5. Perakitan *Prototype* dan *Controller*

Dalam tahap ini perakitan mekanik dan hardware yang digunakan sesuai kebutuhan sistem. juga digunakan software *Matlab* untuk membantu mendesain sistem kendali *fuzzy logic* meliputi input, rulebase, dan output. Diagram alir dari

desain *controller fuzzy logic* ditunjukkan pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Sedangkan Diagram alir yang nantinya akan dijadikan acuan pembuatan *prototype* dan *controller* masing-masing ditunjukkan Gambar 3.4, Gambar 3.5 dan Gambar 3.6.

6. Analisa Hasil

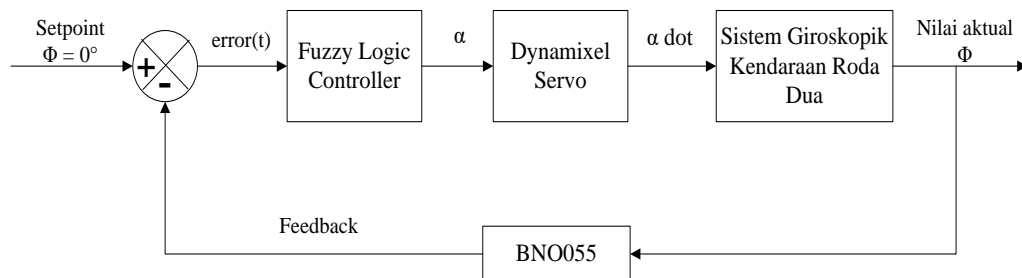
Setelah mekanik, hardware, dan software sudah terintegrasi, maka dilakukan pengujian untuk mengetahui performa terbaiknya. Pada tahap ini adalah untuk menganalisa hasil respon dari prototipe yang telah dibuat menggunakan *fuzzy logic control*.

7. Kesimpulan

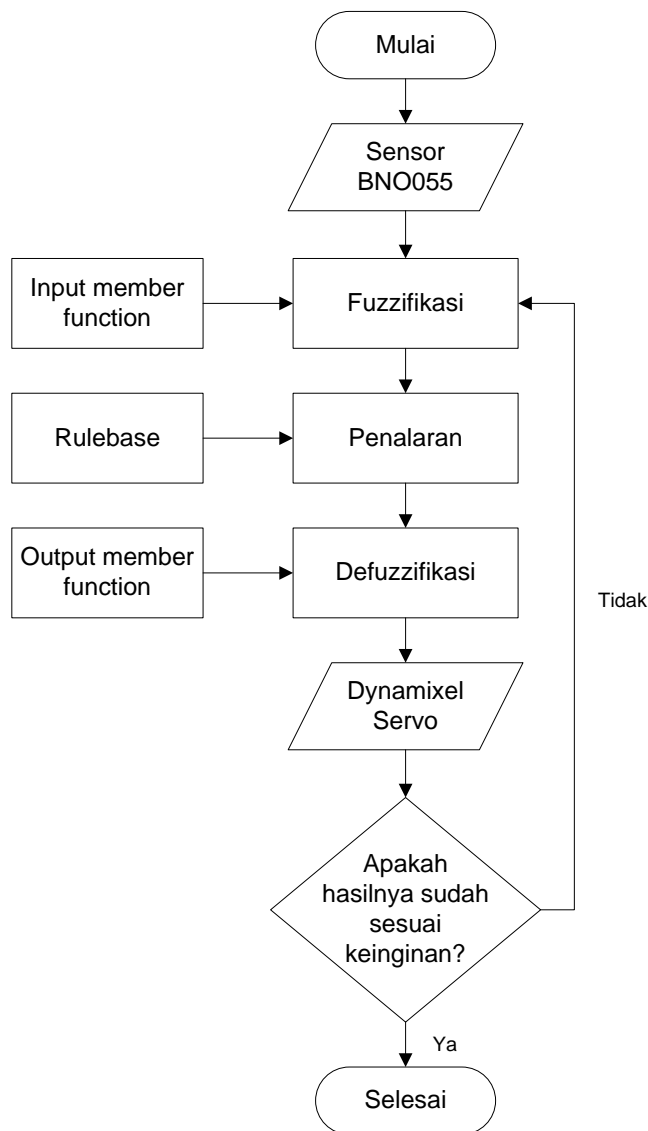
Kesimpulan diambil dari hasil penelitian yang dilakukan berupa hasil pengujian *prototype* secara *realtime*. Kesimpulan juga berupa jawaban dari perumusan masalah dan juga tujuan dari penelitian ini.

3.2 Diagram Alir Desain Fuzzy Logic Control

Pada Gambar 3.2 merupakan diagram blok dari sistem giroskopik yang menggunakan kontroller *fuzzy logic*, hasil kontroller yang diberikan ke servo berupa posisi (α) dan input dari sistem berupa kecepatan (α dot). Sedangkan output dari sistem berupa kemiringan prototipe (ϕ) yang di dibandingkan dengan pembacaan setpoint nya. Gambar 3.3 menunjukkan diagram alir desain fuzzy logic. Sensor BNO055 sebagai *input* yang diproses *fuzzifikasi*. Kemudian *rulebase* digunakan untuk memasukkan logika sistem yang diinginkan. Sedangkan *defuzzifikasi* berfungsi untuk menghasilkan nilai akhir yang dimasukkan aktuator, aktuator pada penelitian ini yaitu *dynamixel servo*.



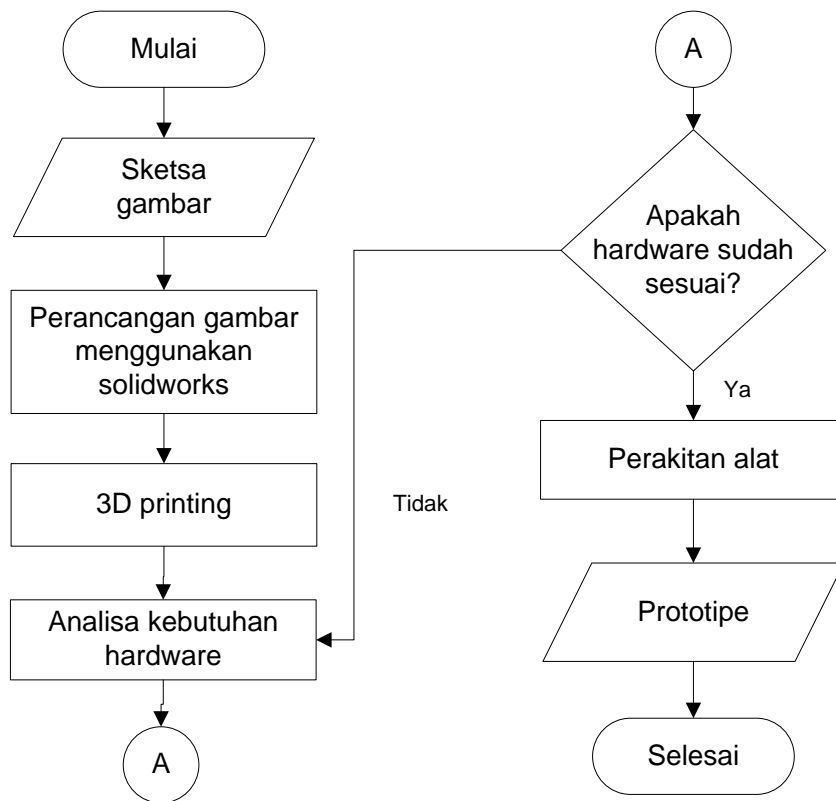
Gambar 3.2 Diagram Blok Kontrol Sistem Giroskopik



Gambar 3.3 Diagram Alir Desain *Fuzzy Logic*

3.3 Diagram Alir Pembuatan Prototipe

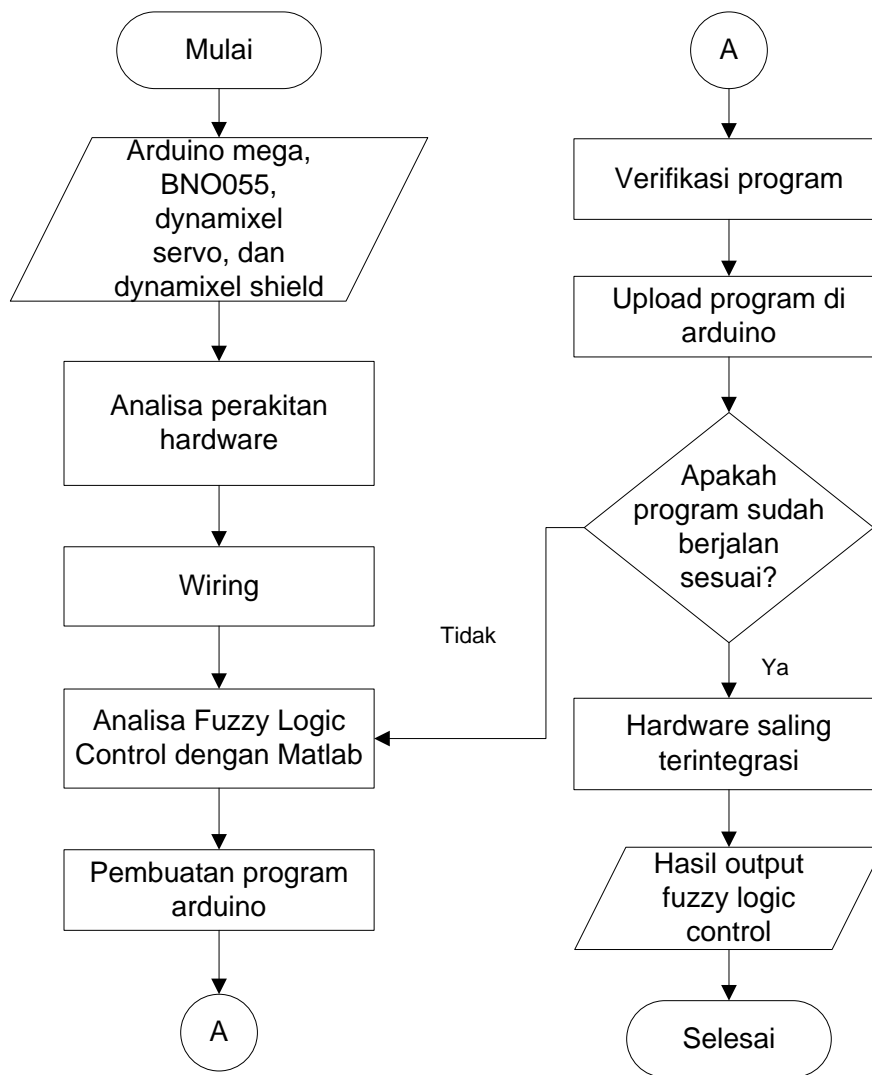
Pada Gambar 3.4 menunjukkan diagram alir pembuatan prototipe. Berawal dari sketsa gambar kemudian dirancang menggunakan software solidworks, Setelah itu gambar dicetak menggunakan 3D *printing*. Analisa kebutuhan *hardware* digunakan untuk menentukan kebutuhan komponen elektronika yang sesuai dengan rancangan yang telah dibuat. Kemudian hasil 3D *printing* dan *hardware* dirakit dan menjadi sebuah prototipe.



Gambar 3.4 Diagram Alir Pembuatan *Prototype*

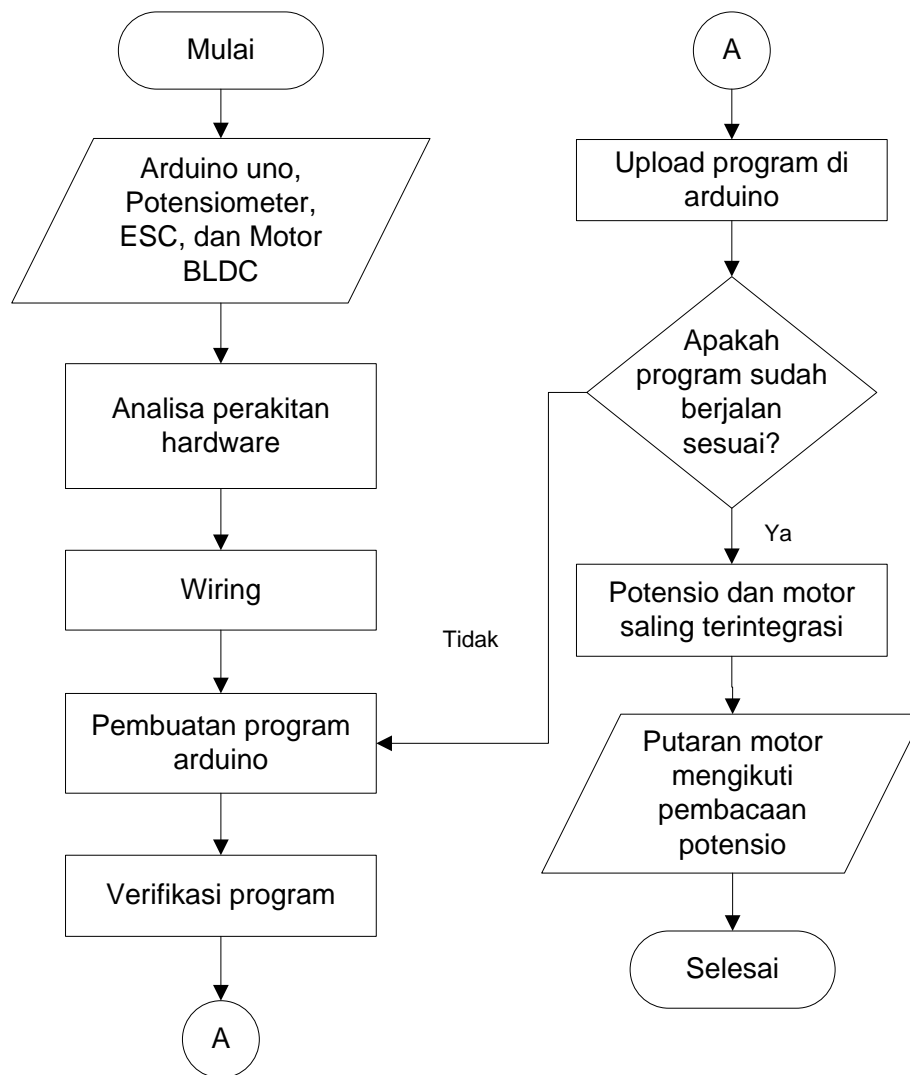
3.4 Diagram Alir Controller

Pada penelitian ini menggunakan dua arduino yaitu mega dan uno. Gambar 3.5 menunjukkan diagram alir *controller* pada arduino mega. Arduino mega sebagai kontrol keseimbangan yang mana putaran gimbal dipengaruhi oleh kemiringan dari prototipe. Pada kendali keseimbangan ini mengimplementasikan *fuzzy logic control*. Sensor BNO055 sebagai input *fuzzy logic* yang mempengaruhi gerak *dynamixel servo* sebagai outputnya. Hasil dari fuzzy pada mikrokontroller arduino divalidasi oleh *fuzzy toolbox matlab* untuk membuktikan kebenarannya.



Gambar 3.5 Diagram Alir *Controller* Arduino Mega

Sedangkan Gambar 3.6 menunjukkan diagram alir *controller* pada arduino uno. Arduino uno digunakan untuk mengatur kecepatan motor BLDC pada *flywheel* prototipe. Motor dapat berputar dengan kecepatan tertentu disebabkan oleh potensiometer. Semakin besar pembacaan nilai potensiometer pada Arduino, semakin besar juga kecepatan yang dihasilkan motor.

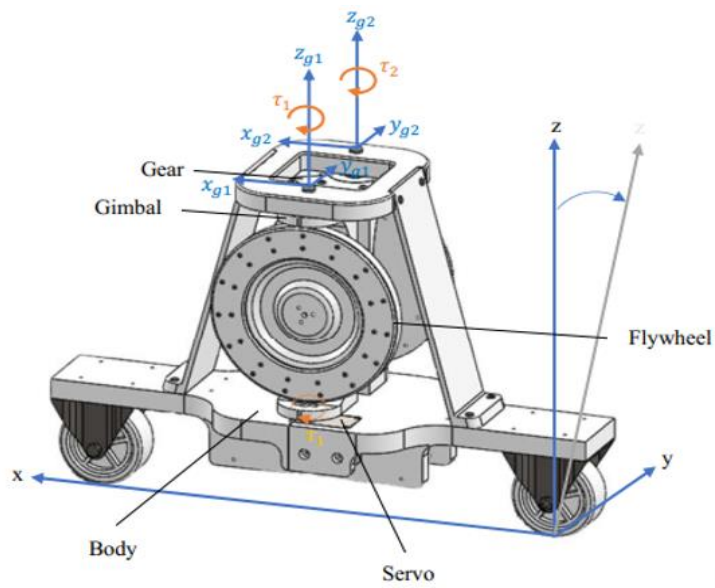


Gambar 3.6 Diagram Alir *Controller* Arduino Uno

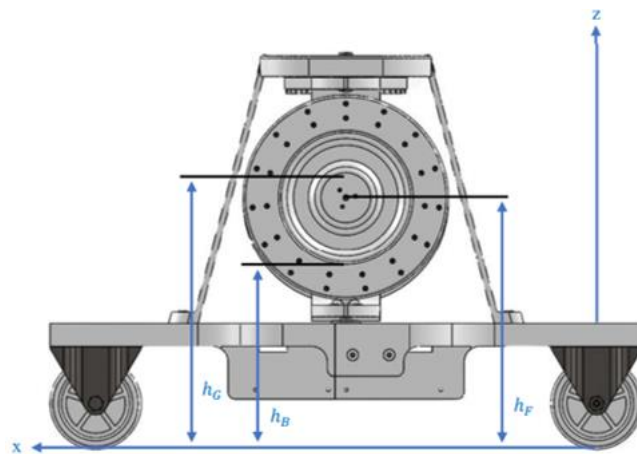
3.5 Model Sistem Giroskopik Pada Self-Balancing Kendaraan Roda Dua

3.5.1 Pemodelan Sistem Giroskopik

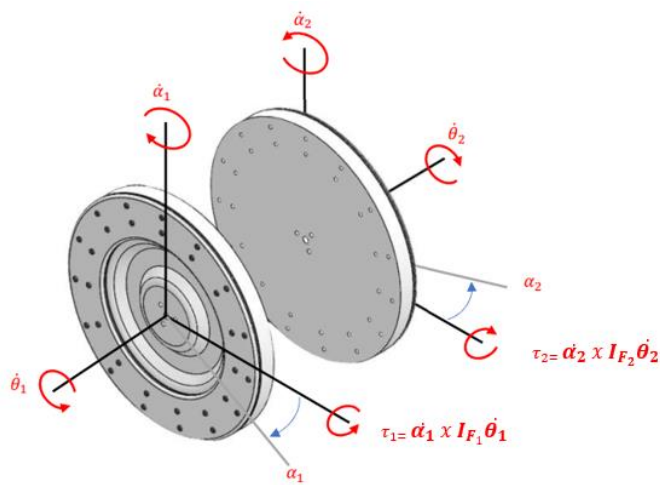
Perancangan kendaraan roda dua menggunakan kendali giroskop dalam bentuk 3D dibuat menggunakan *software solidworks* dengan memodelkan bentuk dari kendaraan roda dua jenis *scooter* yang memiliki dua roda bagian depan dan belakang yang dapat berputar searah sumbu-x. Sistem kendali giroskop yang digunakan dalam pemodelan kendaraan roda dua dipasang diatas kendaraan menggunakan dua *flywheel* yang masing-masing dipasang secara vertikal yang berputar searah sumbu-x dan gimbal yang dapat berputar searah sumbu-y.



Gambar 3.7 Model Kendaraan *Self-Balancing* Roda Dua



Gambar 3.8 Tampak Samping Kendaraan *Self-Balancing* Roda Dua



Gambar 3.9 Presesi Giroskopik

Tabel 3.1 Parameter Pemodelan Kendaraan

Simbol	Keterangan
h_B	Ketinggian <i>center of gravity</i> bodi
h_G	Ketinggian <i>center of gravity</i> gimbal
h_F	Ketinggian <i>center of gravity</i> flywheel
m_B	Massa bodi
m_{Gi}	Massa gimbal ($i = 1, 2$)
m_{Fi}	Massa flywheel ($i = 1, 2$)
g	Konstanta gravitasi
ω_B	Kecepatan sudut bodi
ω_{Gi}	Kecepatan sudut gimbal ($i = 1, 2$)
ω_{Fi}	Kecepatan sudut flywheel ($i = 1, 2$)
ϕ	Sudut roll bodi
α_i	Sudut gimbal ($i = 1, 2$)
θ_i	Sudut flywheel ($i = 1, 2$)
I_{Bx}	Inersia bodi
$[I_{Gix}, I_{Giy}, I_{Giz}]$	Inersia gimbal ($i = 1, 2$)
$[I_{Fix}, I_{Fiy}, I_{Fiz}]$	Inersia flywheel ($i = 1, 2$)

$O - xyz$ merupakan koordinat sistem referensi, $o - x_B y_B z_B$ adalah koordinat bodi terhadap titik O dan $o - x_{gi} y_{gi} z_{gi}$ ($i = 1, 2$) merupakan koordinat gimbal. Rotasi matrix bodi roll yang sesuai dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R_B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Matriks rotasi gimbal yang sesuai yaitu:

$$R_{Gi} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, (i = 1, 2) \quad (3.2)$$

Kecepatan sudut bodi ω_B , gimbal ω_{Gi} dan flywheel ω_{Fi} , dapat ditulis sebagai berikut:

$$\omega_B = [\dot{\phi} \quad 0 \quad 0]^T \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \omega_{Gi} &= R_{Gi}\omega_B + [0 \quad 0 \quad \dot{\alpha}_i]^T \\ &= [\dot{\phi}\cos\alpha_i \quad \dot{\phi}\sin\alpha_i \quad \dot{\alpha}_i]^T \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \omega_{Fi} &= \omega_{Gi} + [0 \quad \dot{\theta}_i \quad 0]^T \\ &= [\dot{\phi}\cos\alpha_i \quad \dot{\phi}\sin\alpha_i + \dot{\theta}_i \quad \dot{\alpha}_i]^T \end{aligned} \quad (3.5)$$

Energi kinetik diperoleh dari jumlah energi kinetik linear dan rotasi pada masing-masing part, dengan persamaan berikut:

$$T_B = \frac{1}{2} m_B v_B^2 + \frac{1}{2} I_{Bx} \omega_B^2 = \frac{1}{2} m_B (h_B \dot{\phi})^2 + \frac{1}{2} I_{Bx} \dot{\phi}^2 \quad (3.6)$$

$$T_{Gi} = \frac{1}{2} m_{Gi} v_{Gi}^2 + \frac{1}{2} (I_{Gix} \omega_{Gix}^2 + I_{Giy} \omega_{Giy}^2 + I_{Giz} \omega_{Giz}^2) \quad (3.7)$$

$$= \frac{1}{2} m_{Gi} (\dot{\phi} h_{Gi})^2 + \frac{1}{2} [I_{Gix} (\dot{\phi} \cos \alpha_i)^2 + I_{Giy} (\dot{\phi} \sin \alpha_i)^2 + I_{Giz} \dot{\alpha}_i^2] \quad (3.8)$$

$$T_{Fi} = \frac{1}{2} m_{Fi} v_{Fi}^2 + \frac{1}{2} (I_{Fix} \omega_{Fix}^2 + I_{Fiy} \omega_{Fiy}^2 + I_{Fiz} \omega_{Fiz}^2) \quad (3.9)$$

$$= \frac{1}{2} m_{Fi} (\dot{\phi} h_{Fi})^2 + \frac{1}{2} [I_{Fix} (\dot{\phi} \cos \alpha_i)^2 + I_{Fiy} (\dot{\phi} \sin \alpha_i + \dot{\theta}_i)^2 + I_{Fiz} \dot{\alpha}_i^2] \quad (3.10)$$

sehingga dapat diperoleh total energi kinetik sebagai berikut:

$$T = T_B + \sum_{i=1}^2 T_{Gi} + \sum_{i=1}^2 T_{Fi} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 \left(m_B h_B^2 + I_{Bx} + \sum_{i=1}^2 m_{Gi} h_{Gi}^2 + \sum_{i=1}^2 m_{Fi} h_{Fi}^2 \right) \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (I_{Giz} + I_{Fiz}) \dot{\alpha}_i^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (I_{Gix} + I_{Fix}) (\dot{\phi} \cos \alpha_i)^2 \\ &+ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 (I_{Giy} + I_{Fiy}) (\dot{\phi} \sin \alpha_i)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 I_{Fiy} \dot{\theta}_i^2 \\ &+ \sum_{i=1}^2 I_{Fiy} \dot{\theta}_i \dot{\phi} \sin \alpha_i \end{aligned} \quad (3.12)$$

Energi potensial sistem merupakan penjumlahan dari energi potensial yang terdiri dari energi potensial bodi, gimbale dan flywheel. Dapat dituliskan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} U &= U_B + \sum_{i=1}^2 U_{Gi} + \sum_{i=1}^2 U_{Fi} \\ &= (m_B h_B + \sum_{i=1}^2 m_{Gi} h_{Gi} + \sum_{i=1}^2 m_{Fi} h_{Fi}) g \cos \phi \end{aligned} \quad (3.13)$$

Model matematika dapat diperoleh melalui pendekatan Lagrangian sebagai $L = T - U$ dengan menerapkan persamaan Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_j} = Q_j, \quad (j = 1, 2, 3) \quad (3.14)$$

Dimana q_j adalah koordinat umum ke- j , Q_j adalah gaya umum yang sesuai untuk setiap koordinat umum. Koordinat umum adalah $q_1 = \phi, q_2 = \alpha_1$ and $q_3 = \alpha_2$. Dalam penelitian ini, gaya umum merupakan $Q_1 = d, Q_2 = T_1$ dan $Q_3 = T_2$ mewakili gangguan yang diterapkan pada giroskop, torsi yang dihasilkan untuk gimbal 1 dan gimbal 2. Persamaan lagrange ϕ dan α_i dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \phi} = d \quad (3.15)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha_i} = T_i, i = 1, 2 \quad (3.16)$$

Pada flywheel $\dot{\theta}_1$ dan $\dot{\theta}_2$ berputar dengan kecepatan yang konstan namun berlawanan arah, sehingga $\ddot{\theta}_i = 0$. Persamaan 3.12 dan 3.13 disubstitusikan ke persamaan 3.15 dan 3.16, dapat diperoleh persamaan gerak sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \left(m_B h_B^2 + I_{Bx} + \sum_{i=1}^2 m_{Gi} h_{Gi}^2 + \sum_{i=1}^2 m_{Fi} h_{Fi}^2 \right) \ddot{\phi} \\ & + \sum_{i=1}^2 (I_{Giz} + I_{Fiz}) \cos^2 \alpha_i \ddot{\phi} \\ & - 2 \sum_{i=1}^2 (I_{Giz} + I_{Fiz}) \cos \alpha_i \sin \alpha_i \dot{\alpha}_i \dot{\phi} \\ & + \sum_{i=1}^2 (I_{Giy} + I_{Fiy}) \sin^2 \alpha_i \ddot{\phi} \\ & + 2 \sum_{i=1}^2 (I_{Giy} + I_{Fiy}) \cos \alpha_i \sin \alpha_i \dot{\alpha}_i \dot{\phi} \\ & + \sum_{i=1}^2 I_{Fiy} \cos \alpha_i \dot{\alpha}_i \dot{\theta}_i \\ & - (m_B d_B + \sum_{i=1}^2 m_{Gi} d_{Gi} + \sum_{i=1}^2 m_{Fi} d_{Fi}) g \sin \phi = d \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} & (I_{G1z} + I_{F1z}) \ddot{\alpha}_1 + (I_{G1x} + I_{F1x}) \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 \dot{\phi}^2 \\ & - (I_{G1y} + I_{F1y}) \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 \dot{\phi}^2 - I_{F1y} \dot{\theta}_1 \dot{\phi} \cos \alpha_1 = T_1 - T_2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} & (I_{G2z} + I_{F2z}) \ddot{\alpha}_2 + (I_{G2x} + I_{F2x}) \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 \dot{\phi}^2 \\ & - (I_{G2y} + I_{F2y}) \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 \dot{\phi}^2 - I_{F2y} \dot{\theta}_2 \dot{\phi} \cos \alpha_2 = T_2 \end{aligned} \quad (3.19)$$

didefinisikan sebagai,

$$M_1 = m_B h_B^2 + I_{Bx} + \sum_{i=1}^2 m_{G_i} h_{G_i}^2 + \sum_{i=1}^2 m_{F_i} h_{F_i}^2$$

$$M_2 = \left(m_B d_B + \sum_{i=1}^2 m_{G_i} d_{G_i} + \sum_{i=1}^2 m_{F_i} d_{F_i} \right)$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$$

Kemudian persamaan 3.19 disubstitusikan ke persamaan 3.18, didapatkan:

$$M_1 \ddot{\phi} + \sum_{i=1}^2 (I_{G_{ix}} + I_{F_{ix}}) \cos^2 \alpha_i \ddot{\phi} + \sum_{i=1}^2 (I_{G_{iy}} + I_{F_{iy}}) \sin^2 \alpha_i \ddot{\phi}$$

$$- 2 \sum_{i=1}^2 (I_{G_{ix}} + I_{F_{ix}}) \cos \alpha_i \sin \alpha_i \dot{\alpha}_i \dot{\phi} + 2 \sum_{i=1}^2 (I_{G_{ix}} + I_{F_{ix}}) \cos \alpha_i \sin \alpha_i \ddot{\alpha}_i \phi$$

$$+ \sum_{i=1}^2 I_{F_{iy}} \cos \alpha_i \dot{\alpha}_i \dot{\theta}_i + M_2 g \sin \phi = d$$

$$\sum_{i=1}^2 (I_{G_{iz}} + I_{F_{iz}}) \ddot{\alpha} + \sum_{i=1}^2 (I_{G_{ix}} + I_{F_{ix}}) \cos \alpha \sin \alpha \dot{\phi}^2$$

$$- \sum_{i=1}^2 (I_{G_{iy}} + I_{F_{iy}}) \cos \alpha \sin \alpha \dot{\phi}^2 - \sum_{i=1}^2 (I_{F_{iy}} \dot{\theta}_i) \dot{\phi} \cos \alpha = T_1$$

Melinearkan persamaan 3.17 – 3.19 di sekitar titik kesetimbangan, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\ddot{\phi} = \frac{M_v}{M_p} \phi - \frac{(I_{F_{1y}} + I_{F_{2y}}) \dot{\theta}}{M_p} \dot{\alpha} + \frac{1}{M_p} d \quad (3.20)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{(I_{F_{1y}} + I_{F_{2y}}) \dot{\theta}}{2I_{GF}} \dot{\alpha} + \frac{1}{4I_{GF}} \tau_1 \quad (3.21)$$

dimana,

$$M_p = m_B h_B^2 + I_{Bx} + \sum_{i=1}^2 m_{G_i} h_{G_i}^2 + \sum_{i=1}^2 m_{F_i} h_{F_i}^2 + \sum_{i=1}^2 (I_{G_{ix}} + I_{F_{ix}})$$

$$M_v = \left(m_B h_B + \sum_{i=1}^2 m_{G_i} h_{G_i} + \sum_{i=1}^2 m_{F_i} h_{F_i} \right) g, \quad I_{GF} = I_{F_{1z}} + I_{G_{1z}} + I_{F_{2z}} + I_{G_{2z}}$$

Menentukan state variabel berikut:

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [\phi \quad \alpha \quad \dot{\phi} \quad \dot{\alpha}]^T$$

Persamaan state space dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + B_d d + B_u \tau_\alpha \quad (3.22)$$

dimana,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{M_v}{M_P} & 0 & 0 & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{34} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{41} \end{bmatrix}$$

$$a_{34} = \frac{(I_{F_{1y}} + I_{F_{2y}})\dot{\theta}}{M_P}$$

$$a_{34} = \frac{(I_{F_{1y}} + I_{F_{2y}})\dot{\theta}}{2(I_{F_{1z}} + I_{G_{1z}} + I_{F_{2z}} + I_{G_{2z}})}$$

$$b_{41} = \frac{1}{4(I_{F_{1z}} + I_{G_{1z}} + I_{F_{2z}} + I_{G_{2z}})}$$

3.5.2 Model Motor

Torsi τ yang dihasilkan oleh motor DC pada umumnya sebanding dengan arus I dan kuat medan magnet. Asumsikan bahwa medan magnet adalah konstan. Dalam hal ini torsi motor sebanding dengan arus dengan faktor konstan k_m .

$$\tau = k_m i \quad (3.23)$$

Saat poros berputar, terdapat tegangan gaya gerak listrik v_e dan sebanding dengan kecepatan sudut poros dengan faktor konstan k_e .

$$v_e = k_e \dot{\alpha}_m \quad (3.24)$$

Dengan mempertimbangkan sumber tegangan v_a , diterapkan pada motor, berdasarkan hukum tegangan Kirchoff, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$v_a = Ri + L \frac{di}{dt} + v_e = Ri + L \frac{di}{dt} + k_e \dot{\alpha}_m \quad (3.25)$$

Mengingat bahwa nilai induktansi L motor DC sangat rendah dibandingkan dengan resistansi R, maka dapat diabaikan.

$$\frac{v_a}{R} - \frac{k_e}{R} \dot{\alpha}_m = i \quad (3.26)$$

Hukum II Newton untuk motor dinamis:

$$I_m \ddot{\alpha}_m = \tau - b_m \dot{\alpha}_m - \tau_a \quad (3.27)$$

Dimana b_m adalah faktor viskositas gesekan bantalan motor, persamaan (3.23) disubstitusikan ke persamaan 3.27, sehingga didapatkan:

$$I_m \ddot{\alpha}_m = k_m i - b_m \dot{\alpha}_m - \tau_a \quad (3.28)$$

Substitusikan persamaan 3.26 menjadi 3.28, didapatkan:

$$I_m \ddot{\alpha}_m = \frac{k_m}{R} v_a - \left(\frac{k_m k_e}{R} + b_m \right) \dot{\alpha}_m - \tau_a \quad (3.29)$$

Asumsikan bahwa faktor viskositas gesekan bearing sangat rendah, kita dapat mengabaikannya dan persamaan 3.29 menjadi:

$$I_m \ddot{\alpha}_m = \frac{k_m}{R} v_a - \frac{k_m k_e}{R} \dot{\alpha}_m - \tau_a \quad (3.30)$$

Asumsikan $\alpha_m = \alpha$ dan $\tau_a = \tau_1$

$$\tau_1 = \frac{k_m}{R} v_a - \frac{k_m k_e}{R} \dot{\alpha} - I_m \ddot{\alpha} \quad (3.31)$$

Substitusikan persamaan 3.31 ke 3.21, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} &= \frac{(I_{F1y} + I_{F2y}) \dot{\theta}}{2I_{GF}} \dot{\phi} + \left(\frac{k_m}{4I_{GFR}} v_a - \frac{k_m k_e}{4I_{GFR}} \dot{\alpha} - \frac{I_m}{4I_{GF}} \ddot{\alpha} \right) \\ \left(1 + \frac{I_m}{4I_{GF}} \right) \ddot{\alpha} &= \frac{(I_{F1y} + I_{F2y}) \dot{\theta}}{2I_{GF}} \dot{\phi} + \frac{k_m}{4I_{GFR}} v_a - \frac{k_m k_e}{4I_{GFR}} \dot{\alpha} \\ (4I_{GF} + I_m) \ddot{\alpha} &= (2I_{GF} (I_{F1y} + I_{F2y}) \dot{\theta}) \dot{\phi} + \frac{k_m}{R} v_a - \frac{k_m k_e}{R} \dot{\alpha} \\ \ddot{\alpha} &= \frac{2I_{GF} (I_{F1y} + I_{F2y}) \dot{\theta}}{(4I_{GF} + I_m)} \dot{\phi} + \frac{k_m}{(4I_{GF} + I_m) R} v_a \\ &\quad - \frac{k_m k_e}{(4I_{GF} + I_m) R} \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Sehingga persamaan state space 3.22 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\dot{x} = Ax + B_d d + B_u v_a \quad (3.33)$$

dimana,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{M_V}{M_P} & 0 & 0 & a_{34} \\ 0 & 0 & \hat{a}_{43} & \hat{a}_{44} \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hat{b}_{41} \end{bmatrix}$$

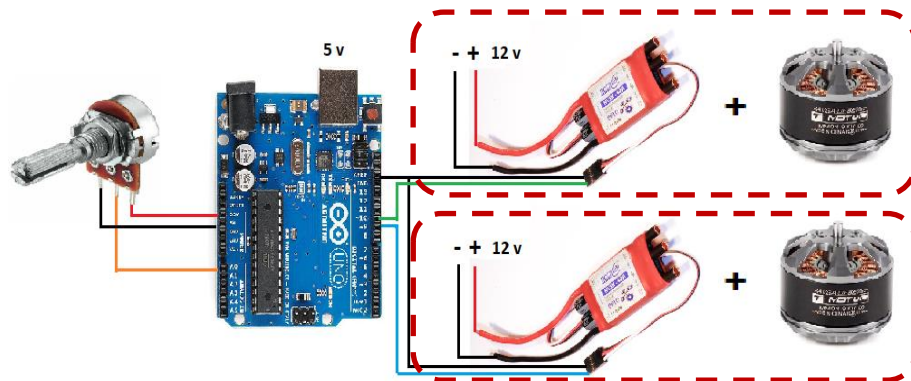
$$\hat{a}_{43} = \frac{2I_{GF}(I_{F1Y} + I_{F2Y})\dot{\theta}}{(4I_{GF} + I_m)},$$

$$\hat{a}_{44} = \frac{k_m k_e}{(4I_{GF} + I_m)R},$$

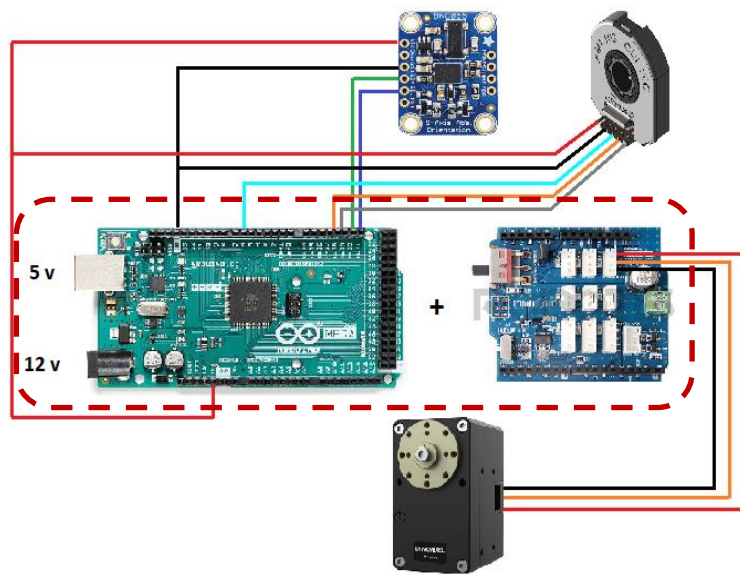
$$\hat{b}_{41} = \frac{k_m}{(4I_{GF} + I_m)R}$$

3.6 Wiring Hardware

Pada Gambar 3.10 dijelaskan konektivitas *potensiometer* dan aktuator *brushless motor* DC (BLDC) menggunakan arduino uno sebagai pengendali. Pin yang digunakan yaitu *vcc*, *ground*, dan A0 untuk sensornya. Pada *Electronic Speed Controller* (ESC) dihubungkan *plug and play* ke BLDC, sedangkan untuk pin ESC dihubungkan dengan pin 9, 10, dan dua *ground*. ESC berfungsi sebagai *driver* dari BLDC.



Gambar 3.10 Wiring Pada Arduino Uno



Gambar 3.11 Wiring Pada Arduino Mega

Pada Gambar 3.11 dijelaskan konektivitas sensor BNO055 dan aktuator *dynamixel servo* menggunakan arduino mega sebagai pengendali. Pin yang digunakan yaitu *vcc*, *ground*, *SDA*, dan *SDL* untuk sensornya. Pada *dynamixel shield* dihubungkan *plug and play* ke arduino mega, sedangkan untuk pin *dynamixel servo* dihubungkan dengan pin pada *dynamixel shield*. *Dynamixel shield* berfungsi sebagai driver dari *dynamixel servo*. Kemudian encoder juga terhubung di mega.

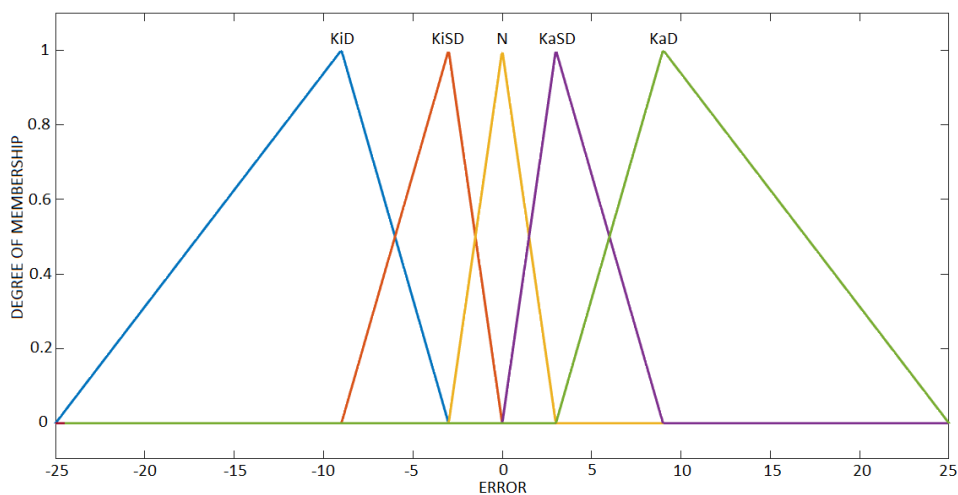
3.7 Rancangan Fuzzy Logic Control

Dalam perancangan dan pembuatan *fuzzy sugeno* untuk proses pengendalian dari sistem dalam penelitian ini, maka dibutuhkan rancangan simulasi untuk menentukan *input*, *output*, dan *rulebase* yang akan diterapkan. *Software Matlab* digunakan simulasi *fuzzy logic* menggunakan *fuzzy toolbox*.

3.7.1 Rancangan Fuzzy Segitiga Membership 5x3

Pada sub bab ini menjelaskan rancangan dari fungsi segitiga dengan membership 5x3, artinya jenis fungsi yang dipilih untuk menggambarkan derajat keanggotaannya yaitu menggunakan fungsi segitiga. Sedangkan makna 5x3 artinya rancangan ini memiliki 2 variabel input yaitu variabel *error* (input 1) dan variabel

delta error (input 2), nilai 5 menunjukkan jumlah membership dari variabel error dan nilai 3 menunjukkan jumlah membership dari variabel delta error. Oleh karena itu disebut membership 5x3 yang menunjukkan jumlah membership nya. Gambar 3.12 menunjukkan bahwa pada variabel error memiliki 5 himpunan atau variabel lingusitik dan Gambar 3.13 menunjukkan bahwa pada variabel delta error memiliki 3 himpunan atau variabel lingusitik. Data error dan delta error yang diproses adalah data dari sensor BNO055 yang telah diolah.

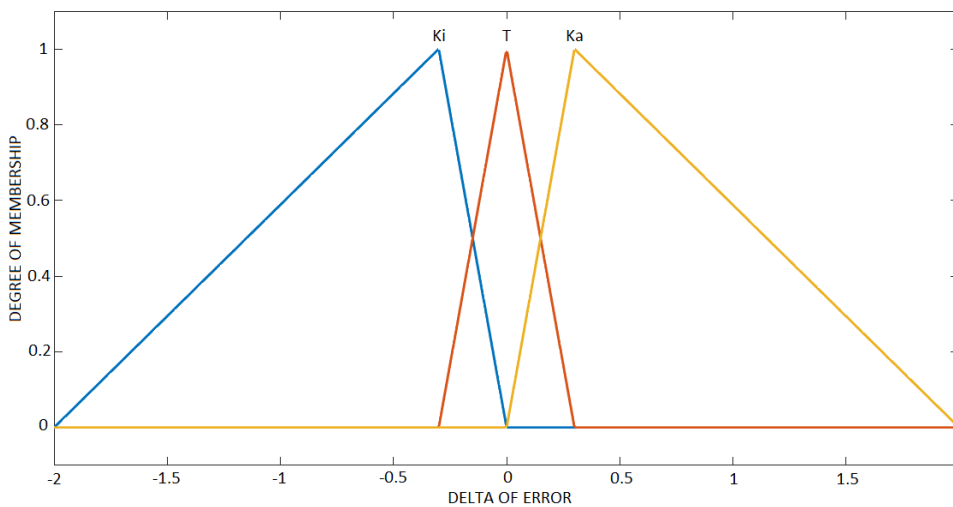


Gambar 3.12 Rancangan Himpunan Error Segitiga 5x3

Pemilihan *range scala* pada variabel error yaitu -25 derajat sampai 25 derajat yang menunjukkan titik tegak prototipe bernilai 0 derajat, untuk posisi sudut maksimal kekiri bernilai -25 dan ke kanan bernilai 25. Dari 5 membership tersebut memiliki bentuk segitiga yang berbeda-beda. Hal ini bertujuan untuk memberikan performa yang lebih baik sesuai kebutuhan sistem. Pada segitiga netral (N) memiliki bentuk segitiga sama kaki yang menunjukkan titik pusat dari sistem yang telah dibuat. Pada segitiga KiSD menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kiri, bentuk segitiga tidak simetris bertujuan untuk memberikan hasil output yang tidak linier antara kondisi di kaki 1 (-9 sampai -3) dan di kaki 2 (-3 sampai 0). Pada kaki 1 memiliki range lebih besar dari kaki 2 karena ketika di kondisi kaki 1 memiliki range yang sama maka pergerakan roll prototipe menjadi lebih besar sehingga menyebabkan prototipe tidak dapat seimbang. Oleh karena itu range kaki

1 dibesarkan untuk memberikan output yang lebih kecil agar dapat seimbang. Hal itu juga berlaku pada segitiga KaSD yang menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kanan.

Sedangkan pada segitiga KiD juga memiliki bentuk tidak simetris dan range yang lebih besar. Pada kaki 1 (-25 sampai -9) menggambarkan tidak ada perubahan nilai pada output nya karena nilai fuzzifikasi pada kondisi tersebut bernilai 1. Namun range tersebut masih menunjukkan kondisi kemiringan prototipe agar dapat terbaca oleh mikrokontroller. Kondisi kaki 1 juga digunakan sebagai proteksi karena ketika pembacaan dilakukan diluar range maka akan terjadi error pada mikrokontroller. Oleh karena itu desain variabel error dilakukan pembacaan kemiringan prototipe hingga kondisi maksimalnya yaitu -25 derajat. Untuk kaki 2 memiliki range -9 sampai -3 karena menyesuaikan kebutuhan sistem seperti kaki 1 pada segitiga KiSD. Hal itu juga berlaku pada segitiga KaD yang menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kanan.



Gambar 3.13 Rancangan Himpunan Delta Error Segitiga 5x3

Pemilihan *range scala* pada variabel delta error yaitu -2 derajat sampai 2 derajat yang menunjukkan perubahan error. Pembacaan perubahan error terbesar ketika tidak ada gangguan yaitu 0 sampai ± 0.12 . Sedangkan ketika ada gangguan bernilai lebih dari ± 0.3 sampai ± 1.8 . Oleh karena itu dibuat desain variabel delta error dengan 3 membership menggambarkan kondisi tanpa gangguan, gangguan kekiri, dan gangguan kekanan. Pada segitiga T memiliki bentuk segitiga sama kaki

yang menunjukkan sistem ketika tidak ada gangguan. Pada segitiga Ki menunjukkan gangguan ke kiri, bentuk tidak simetris bertujuan untuk ketika terjadi perubahan error lebih besar -0.3 maka sistem menganggap terdapat gangguan kekiri. Desain range segitiga Ki mencapai -2 agar sistem dapat membaca perubahan error sebesar itu, karena jika sistem membaca perubahan error yang melebihi desain range yang dibuat maka akan terjadi error pada mikrokontroller. Hal itu juga berlaku pada segitiga Ka.

Range scala variabel linguistik dapat dilihat pada Tabel 3.2 dan Tabel 3.3. Sedangkan pada Tabel 3.4 menunjukkan *range scala* sudut servo yang memiliki 5 variabel linguistik.

Tabel 3.2 *Range Scala* Variabel Linguistik Error Segitiga 5x3

variabel linguistik	point 1	point 2	point 3
kiri dekat	-25	-9	-3
kiri sangat dekat	-9	-3	0
netral	-3	0	3
kanan sangat dekat	0	3	9
kanan dekat	3	9	25

Tabel 3.3 *Range Scala* Variabel Linguistik Delta Error Segitiga 5x3

variabel linguistik	point 1	point 2	point 3
kiri	-2	-0.3	0
tengah	-0.3	0	0.3
kanan	0	0.3	2

Tabel 3.4 *Range Scala* Variabel Linguistik Servo Segitiga 5x3

variabel linguistik	point
kiri pelan	-1
kiri sangat pelan	-0.4
nol	0
kanan sangat dekat	0.4
kanan dekat	1

Tabel 3.5 Rulebase Segitiga 5x3

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri dekat	Kiri	Kiri sangat pelan
2	Kiri dekat	Tengah	Kiri pelan
3	Kiri dekat	Kanan	Kiri pelan
4	Kiri sangat dekat	Kiri	Nol
5	Kiri sangat dekat	Tengah	Kiri sangat pelan
6	Kiri sangat dekat	Kanan	Kiri pelan
7	Netral	Kiri	Kiri sangat pelan
8	Netral	Tengah	Nol
9	Netral	Kanan	Kanan sangat pelan
10	Kanan sangat dekat	Kiri	Kanan pelan
11	Kanan sangat dekat	Tengah	Kanan sangat pelan
12	Kanan sangat dekat	Kanan	Nol
13	Kanan dekat	Kiri	Kanan pelan
14	Kanan dekat	Tengah	Kanan pelan
15	Kanan dekat	Kanan	Kanan sangat pelan

3.7.2 Rancangan Fuzzy Segitiga Membership 7x3

Pada sub bab ini menjelaskan rancangan dari fungsi segitiga dengan membership 7x3, artinya jenis fungsi yang dipilih untuk menggambarkan derajat keanggotaannya yaitu menggunakan fungsi segitiga. Sedangkan makna 7x3 artinya rancangan ini memiliki 2 variabel input yaitu variabel error dan variabel delta error, nilai 7 menunjukkan jumlah membership dari variabel error dan nilai 3 menunjukkan jumlah membership dari variabel delta error. Oleh karena itu disebut membership 7x3 yang menunjukkan jumlah membership nya. Tabel 3.6 menunjukkan bahwa variabel error memiliki 7 variabel lingusitik dan Tabel 3.7 menunjukkan bahwa variabel delta error memiliki 3 variabel lingusitik. *Range scala* variabel lingusitik juga dapat dilihat pada Tabel tersebut. Data error dan delta error yang diproses adalah data dari sensor BNO055 yang telah diolah. Sedangkan pada Tabel 3.8 menunjukkan *range scala* sudut servo yang memiliki 7 variabel lingusitik.

Dari 7 membership variabel error memiliki bentuk segitiga yang simetris, kecuali pada kondisi kiri jauh dan kanan jauh. Pada kondisi segitiga tidak simetris tersebut menunjukkan kemiringan prototipe agar dapat terbaca oleh mikrokontroller hingga kondisi maksimal nya. Kondisi tersebut juga digunakan

sebagai proteksi karena ketika pembacaan dilakukan diluar range maka menyebabkan error pada mikrokontroller. Sedangkan pada variabel delta error dengan 3 membership menggambarkan kondisi tanpa gangguan, gangguan kekiri, dan gangguan kekanan.

Tabel 3.6 *Range Scala* Variabel Linguistik Error Segitiga 7x3

variabel linguistik	point 1	point 2	point 3
kiri jauh	-25	-9	-6
kiri dekat	-9	-6	-3
kiri sangat dekat	-6	-3	0
netral	-3	0	3
kanan sangat dekat	0	3	6
kanan dekat	3	6	9
kanan jauh	6	9	25

Tabel 3.7 *Range Scala* Variabel Linguistik Delta Error Segitiga 7x3

variabel linguistik	point 1	point 2	point 3
kiri	-2	-0.3	0
tengah	-0.3	0	0.3
kanan	0	0.3	2

Tabel 3.8 *Range Scala* Variabel Linguistik Servo Segitiga 7x3

variabel linguistik	point
kiri cepat	-3
kiri pelan	-0.8
kiri sangat pelan	-0.3
nol	0
kanan sangat pelan	0.3
kanan pelan	0.8
kanan cepat	3

Tabel 3.9 menunjukkan data aturan-aturan logika atau *rulebase fuzzy* yang telah dibuat di *Matlab*. Rulebase dari segitiga 7x3 memiliki 21 kondisi. Aturan-aturan tersebut memberikan informasi cara kerja dari sistem yang telah dibuat.

Tabel 3.9 Rulebase Segitiga 7x3

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri jauh	Kiri	Kiri pelan
2	Kiri jauh	Tengah	Kiri cepat
3	Kiri jauh	Kanan	Kiri cepat
4	Kiri dekat	Kiri	Kiri sangat pelan
5	Kiri dekat	Tengah	Kiri pelan
6	Kiri dekat	Kanan	Kiri cepat
7	Kiri sangat dekat	Kiri	Nol
8	Kiri sangat dekat	Tengah	Kiri sangat pelan
9	Kiri sangat dekat	Kanan	Kiri pelan
10	Netral	Kiri	Kiri sangat pelan
11	Netral	Tengah	Nol
12	Netral	Kanan	Kanan sangat pelan
13	Kanan sangat dekat	Kiri	Kanan pelan
14	Kanan sangat dekat	Tengah	Kanan sangat pelan
15	Kanan sangat dekat	Kanan	Nol
16	Kanan dekat	Kiri	Kanan cepat
17	Kanan dekat	Tengah	Kanan pelan
18	Kanan dekat	Kanan	Kanan sangat pelan
19	Kanan jauh	Kiri	Kanan cepat
20	Kanan jauh	Tengah	Kanan cepat
21	Kanan jauh	Kanan	Kanan pelan

3.7.3 Rancangan Fuzzy Segitiga Membership 9x3

Pada sub bab ini menjelaskan rancangan dari fungsi segitiga dengan membership 9x3, artinya jenis fungsi yang dipilih untuk menggambarkan derajat keanggotaannya yaitu menggunakan fungsi segitiga. Sedangkan makna 9x3 artinya rancangan ini memiliki 2 variabel input yaitu variabel error dan variabel delta error, nilai 9 menunjukkan jumlah membership dari variabel error dan nilai 3 menunjukkan jumlah membership dari variabel delta error. Oleh karena itu disebut membership 9x3 yang menunjukkan jumlah membership nya. Tabel 3.10 menunjukkan bahwa variabel error memiliki 9 variabel lingusitik dan Tabel 3.12 menunjukkan bahwa variabel delta error memiliki 3 variabel lingusitik. *Range scala* variabel lingusitik juga dapat dilihat pada tabel tersebut.

Dari 9 membership tersebut memiliki bentuk segitiga yang berbeda-beda. Hal ini bertujuan untuk memberikan performa yang lebih baik sesuai kebutuhan sistem. Semakin banyak jumlah membership maka semakin bervariasi dalam

membuat desain kontrol sesuai kebutuhan sistem nya. Pada kondisi netral memiliki bentuk segitiga sama kaki yang menunjukkan titik pusat dari sistem yang telah dibuat. Pada kondisi KiSD menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kiri, bentuk segitiga tidak simetris bertujuan untuk memberikan hasil output yang tidak linier antara kondisi di kaki 1 (-3 sampai -1) dan di kaki 2 (-1 sampai 0). Pada kaki 1 range nya dibesarkan untuk memberikan output yang lebih kecil. Kemudian pada kondisi KiD memiliki bentuk simetris yang menunjukkan nilai output yang linier antara kaki 1 dengan kaki 2. Pada kondisi KiJ memiliki bentuk segitiga tidak simetris bertujuan untuk memberikan hasil output yang tidak linier antara kondisi di kaki 1 dan di kaki 2 nya. Pada kondisi tersebut memberikan output yang lebih kecil di kaki 1. Sedangkan pada kondisi KiSJ juga memiliki bentuk tidak simetris dan range yang lebih besar. Pada kaki 1 (-25 sampai -9) menggambarkan tidak ada perubahan nilai pada output nya karena nilai fuzzifikasi pada kondisi tersebut bernilai 1. Namun range tersebut masih menunjukkan kondisi kemiringan prototipe agar dapat terbaca oleh mikrokontroller. Kondisi kaki 1 juga digunakan sebagai proteksi karena ketika pembacaan dilakukan diluar range maka akan terjadi error pada mikrokontroller. Oleh karena itu desain variabel error dilakukan pembacaan kemiringan prototipe hingga kondisi maksimalnya yaitu -25 derajat. Untuk kaki 2 memiliki range -9 sampai -5 karena menyesuaikan kebutuhan sistem seperti kaki 1 pada kondisi KiJ. Dari penjelasan kondisi kemiringan disisi kiri tersebut juga menggambarkan kondisi kemiringan disisi kanan.

Tabel 3.10 *Range Scala* Variabel Linguistik Error Segitiga 9x3

variabel linguistik	point 1	point 2	point 3
kiri sangat jauh	-25	-9	-5
kiri jauh	-9	-5	-3
kiri dekat	-5	-3	-1
kiri sangat dekat	-3	-1	0
netral	-1	0	1
kanan sangat dekat	0	1	3
kanan dekat	1	3	5
kanan jauh	3	5	9
kanan sangat jauh	5	9	25

Data error dan delta error yang diproses adalah data dari sensor BNO055 yang telah diolah. Sedangkan pada Tabel 3.13 menunjukkan *range scala* sudut servo yang memiliki 9 variabel linguistik.

Tabel 3.11 menunjukkan data aturan-aturan logika atau *rulebase fuzzy* yang telah dibuat di *Matlab*. Rulebase dari segitiga 9x3 memiliki 27 kondisi. Aturan-aturan tersebut memberikan informasi cara kerja dari sistem yang telah dibuat.

Tabel 3.11 Rulebase Segitiga 9x3

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri sangat jauh	Kiri	Kiri cepat
2	Kiri sangat jauh	Tengah	Kiri sangat cepat
3	Kiri sangat jauh	Kanan	Kiri sangat cepat
4	Kiri jauh	Kiri	Kiri pelan
5	Kiri jauh	Tengah	Kiri cepat
6	Kiri jauh	Kanan	Kiri sangat cepat
7	Kiri dekat	Kiri	Kiri sangat pelan
8	Kiri dekat	Tengah	Kiri pelan
9	Kiri dekat	Kanan	Kiri cepat
10	Kiri sangat dekat	Kiri	Nol
11	Kiri sangat dekat	Tengah	Kiri sangat pelan
12	Kiri sangat dekat	Kanan	Kiri pelan
13	Netral	Kiri	Kiri sangat pelan
14	Netral	Tengah	Nol
15	Netral	Kanan	Kanan sangat pelan
16	Kanan sangat dekat	Kiri	Kanan pelan
17	Kanan sangat dekat	Tengah	Kanan sangat pelan
18	Kanan sangat dekat	Kanan	Nol
19	Kanan dekat	Kiri	Kanan cepat
20	Kanan dekat	Tengah	Kanan pelan
21	Kanan dekat	Kanan	Kanan sangat pelan
22	Kanan jauh	Kiri	Kanan sangat cepat
23	Kanan jauh	Tengah	Kanan cepat
24	Kanan jauh	Kanan	Kanan pelan
25	Kanan sangat jauh	Kiri	Kanan sangat cepat
26	Kanan sangat jauh	Tengah	Kanan sangat cepat
27	Kanan sangat jauh	Kanan	Kanan cepat

Tabel 3.12 *Range Scala* Variabel Linguistik Delta Error Segitiga 9x3

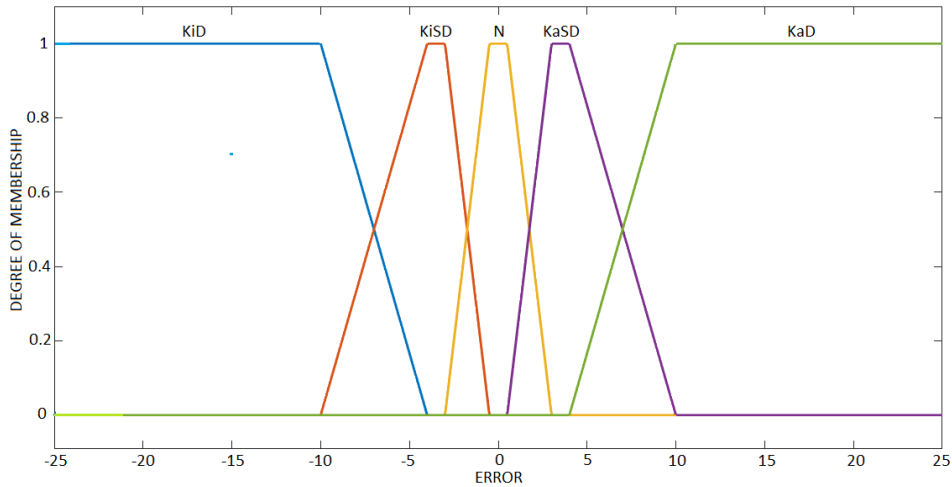
variabel linguistik	point 1	point 2	point 3
kiri	-2	-0.3	0
tengah	-0.3	0	0.3
kanan	0	0.3	2

Tabel 3.13 *Range Scala* Variabel Linguistik Servo Segitiga 9x3

variabel linguistik	point
kiri sangat cepat	-3
kiri cepat	-1
kiri pelan	-0.3
kiri sangat pelan	-0.15
nol	0
kanan sangat pelan	0.15
kanan pelan	0.3
kanan cepat	1
kanan sangat cepat	3

3.7.4 Rancangan Fuzzy Trapesium Membership 5x3

Pada sub bab ini menjelaskan rancangan dari fungsi trapesium dengan membership 5x3, artinya jenis fungsi yang dipilih untuk menggambarkan derajat keanggotaannya yaitu menggunakan fungsi trapesium. Sedangkan makna 5x3 artinya rancangan ini memiliki 2 variabel input yaitu variabel error dan variabel delta error, nilai 5 menunjukkan jumlah membership dari variabel error dan nilai 3 menunjukkan jumlah membership dari variabel delta error. Oleh karena itu disebut membership 5x3 yang menunjukkan jumlah membership nya. Gambar 3.14 menunjukkan bahwa pada variabel error memiliki 5 variabel linguistik dan Gambar 3.15 menunjukkan bahwa pada variabel delta error memiliki 3 variabel linguistik. Data error dan delta error yang diproses adalah data dari sensor BNO055 yang telah diolah. *Range scala* variabel linguistik dapat dilihat pada Tabel 3.14 dan Tabel 3.15. Sedangkan pada Tabel 3.16 menunjukkan *range scala* sudut servo yang memiliki 5 variabel linguistik.

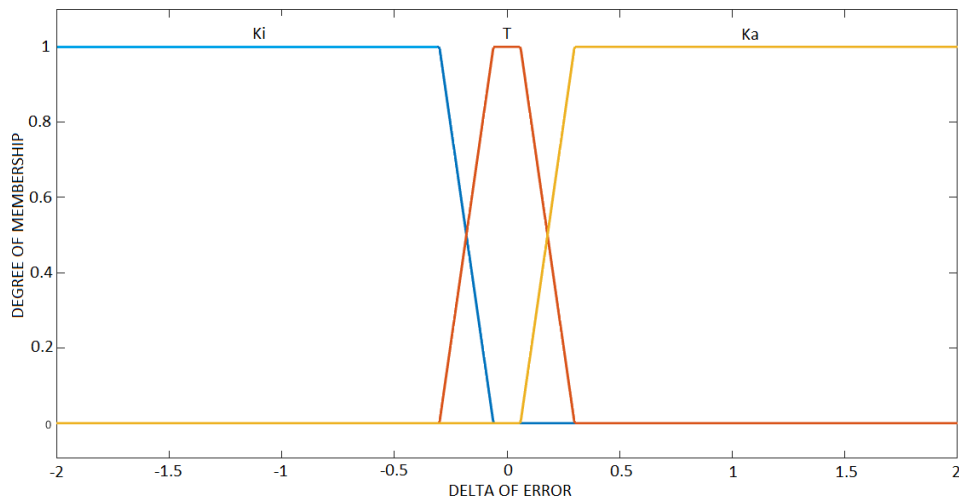


Gambar 3.14 Rancangan Himpunan Error Trapesium 5x3

Pemilihan *range scala* pada variabel error yaitu -25 derajat sampai 25 derajat yang menunjukkan titik tegak prototipe bernilai 0 derajat, untuk posisi sudut maksimal kekiri bernilai -25 dan ke kanan bernilai 25. Dari 5 membership tersebut memiliki bentuk trapesium yang berbeda-beda. Hal ini bertujuan untuk memberikan performa yang lebih baik sesuai kebutuhan sistem. Pada trapesium netral (N) memiliki bentuk trapesium sama kaki yang menunjukkan titik pusat dari sistem yang telah dibuat. Pada trapesium KiSD menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kiri, bentuk trapesium tidak simetris bertujuan untuk memberikan hasil output yang tidak linier antara kondisi di kaki 1 (-10 sampai -4) dan di kaki 2 (-3 sampai -0.5). Pada kaki 1 memiliki range lebih besar dari kaki 2 karena ketika di kondisi kaki 1 memiliki range yang sama maka pergerakan roll prototipe menjadi lebih besar sehingga menyebabkan prototipe tidak dapat seimbang. Oleh karena itu range kaki 1 dibesarkan untuk memberikan output yang lebih kecil agar dapat seimbang. Hal itu juga berlaku pada trapesium KaSD yang menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kanan.

Sedangkan pada trapesium KiD juga memiliki bentuk tidak simetris dan range yang lebih besar. Pada kaki 1 (-25 sampai -10) menggambarkan tidak ada perubahan nilai pada output nya karena nilai fuzzifikasi pada kondisi tersebut bernilai 1. Namun range tersebut masih menunjukkan kondisi kemiringan prototipe agar dapat terbaca oleh mikrokontroler. Kondisi kaki 1 juga digunakan sebagai

proteksi karena ketika pembacaan dilakukan diluar range maka akan terjadi error pada mikrokontroller. Oleh karena itu desain variabel error dilakukan pembacaan kemiringan prototipe hingga kondisi maksimalnya yaitu -25 derajat. Untuk kaki 2 memiliki range -10 sampai -4 karena menyesuaikan kebutuhan sistem seperti kaki 1 pada trapesium KiSD. Hal itu juga berlaku pada trapesium KaD yang menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kanan.



Gambar 3.15 Rancangan Himpunan Delta Error Trapesium 5x3

Pemilihan *range scala* pada variabel delta error yaitu -2 derajat sampai 2 derajat yang menunjukkan perubahan error. Pembacaan perubahan error terbesar ketika tidak ada gangguan yaitu 0 sampai ± 0.12 . Sedangkan ketika ada gangguan bernilai lebih dari ± 0.3 sampai ± 1.8 . Oleh karena itu dibuat desain variabel delta error dengan 3 membership menggambarkan kondisi tanpa gangguan, gangguan kekiri, dan gangguan kekanan. Pada segitiga T memiliki bentuk trapesium sama kaki yang menunjukkan sistem ketika tidak ada gangguan. Pada trapesium Ki menunjukkan gangguan ke kiri, bentuk tidak simetris bertujuan untuk ketika terjadi perubahan error lebih besar -0.3 maka sistem menganggap terdapat gangguan kekiri. Desain range trapesium Ki mencapai -2 agar sistem dapat membaca perubahan error sebesar itu, karena jika sistem membaca perubahan error yang melebihi desain range yang dibuat maka akan terjadi error pada mikrokontroller. Hal itu juga berlaku pada trapesium Ka.

Tabel 3.14 *Range Scala* Variabel Linguistik Error Trapezium 5x3

Himpunan	point 1	point 2	point 3	point 4
kiri dekat	-25	-25	-10	-4
kiri sangat dekat	-10	-4	-3	-0.5
netral	-3	-0.5	0.5	3
kanan sangat dekat	0.5	3	4	10
kanan dekat	4	10	25	25

Tabel 3.15 *Range Scala* Variabel Linguistik Delta Error Trapezium 5x3

Himpunan	point 1	point 2	point 3	point 4
kiri	-2	-2	-0.3	-0.06
tengah	-0.3	-0.06	0.06	0.3
kanan	0.06	0.3	2	2

Tabel 3.16 *Range Scala* Variabel Linguistik Servo Trapezium 5x3

variabel lingusitik	point
kiri pelan	-1
kiri sangat pelan	-0.4
nol	0
kanan sangat dekat	0.4
kanan dekat	1

Aturan-aturan logika atau *rulebase fuzzy* yang digunakan sama dengan segitiga 5x3 yaitu di Tabel 3.5. Rulebase dari trapesium 5x3 memiliki 15 kondisi. Aturan-aturan tersebut memberikan informasi cara kerja dari sistem yang telah dibuat.

3.7.5 Rancangan Fuzzy Trapezium Membership 7x3

Pada sub bab ini menjelaskan rancangan dari fungsi trapesium dengan membership 7x3, artinya jenis fungsi yang dipilih untuk menggambarkan derajat keanggotaannya yaitu menggunakan fungsi trapesium. Sedangkan makna 7x3 artinya rancangan ini memiliki 2 variabel input yaitu variabel error dan variabel delta error, nilai 7 menunjukkan jumlah membership dari variabel error dan nilai 3 menunjukkan jumlah membership dari variabel delta error. Oleh karena itu disebut membership 7x3 yang menunjukkan jumlah membership nya. Tabel 3.17

menunjukkan bahwa pada variabel error memiliki 7 variabel lingusitik dan Tabel 3.18 menunjukkan bahwa pada variabel delta error memiliki 3 variabel lingusitik. *Range scala* variabel lingusitik juga dapat dilihat pada Tabel tersebut. Data error dan delta error yang diproses adalah data dari sensor BNO055 yang telah diolah. Sedangkan pada Tabel 3.19 menunjukkan *range scala* sudut servo yang memiliki 7 variabel lingusitik. Aturan-aturan logika atau *rulebase fuzzy* yang digunakan sama dengan segitiga 7x3 yaitu di Tabel 3.9.

Tabel 3.17 *Range Scala* Variabel Linguistik Error Trapezium 7x3

Himpunan	point 1	point 2	point 3	point 4
kiri jauh	-25	-25	-9	-6.5
kiri dekat	-9	-6.5	-5.5	-4
kiri sangat dekat	-5.5	-4	-3	-0.5
netral	-3	-0.5	0.5	3
kanan sangat dekat	0.5	3	4	5.5
kanan dekat	4	5.5	6.5	9
kanan jauh	6.5	9	25	25

Tabel 3.18 *Range Scala* Variabel Linguistik Delta Error Trapezium 7x3

Himpunan	point 1	point 2	point 3	point 4
kiri	-2	-2	-0.3	-0.06
tengah	-0.3	-0.06	0.06	0.3
kanan	0.06	0.3	2	2

Tabel 3.19 *Range Scala* Variabel Linguistik Servo Trapezium 7x3

variabel lingusitik	point
kiri cepat	-3
kiri pelan	-0.8
kiri sangat pelan	-0.3
nol	0
kanan sangat pelan	0.3
kanan pelan	0.8
kanan cepat	3

Dari 7 membership tersebut memiliki bentuk trapesium yang berbeda-beda. Hal ini bertujuan untuk memberikan performa yang lebih baik sesuai kebutuhan sistem. Pada kondisi netral memiliki bentuk segitiga sama kaki yang menunjukkan

titik pusat dari sistem yang telah dibuat. Pada kondisi KiSD menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kiri, bentuk segitiga tidak simetris bertujuan untuk memberikan hasil output yang tidak linier antara kondisi di kaki 1 (-5.5 sampai -4) dan di kaki 2 (-3 sampai -0.5). Pada kaki 1 range nya dikecilkan untuk memberikan output yang lebih besar. Kemudian pada kondisi KiD memiliki bentuk trapesium tidak simetris bertujuan untuk memberikan hasil output yang tidak linier antara kondisi di kaki 1 dan di kaki 2 nya. Sedangkan pada kondisi KiJ juga memiliki bentuk tidak simetris dan range yang lebih besar. Pada kaki 1 (-25 sampai -9) menggambarkan tidak ada perubahan nilai pada output nya karena nilai fuzzifikasi pada kondisi tersebut bernilai 1. Namun range tersebut masih menunjukkan kondisi kemiringan prototipe agar dapat terbaca oleh mikrokontroller. Kondisi kaki 1 juga digunakan sebagai proteksi karena ketika pembacaan dilakukan diluar range maka akan terjadi error pada mikrokontroller. Oleh karena itu desain variabel error dilakukan pembacaan kemiringan prototipe hingga kondisi maksimalnya yaitu -25 derajat. Untuk kaki 2 memiliki range -9 sampai -6.5 karena menyesuaikan kebutuhan sistem seperti kaki 1 pada kondisi KiD. Dari penjelasan kondisi kemiringan disisi kiri tersebut juga menggambarkan kondisi kemiringan disisi kanan.

3.7.6 Rancangan Fuzzy Trapezium Membership 9x3

Pada sub bab ini menjelaskan rancangan dari fungsi trapesium dengan membership 9x3, artinya jenis fungsi yang dipilih untuk menggambarkan derajat keanggotaannya yaitu menggunakan fungsi trapesium. Sedangkan makna 9x3 artinya rancangan ini memiliki 2 variabel input yaitu variabel error dan variabel delta error, nilai 9 menunjukkan jumlah membership dari variabel error dan nilai 3 menunjukkan jumlah membership dari variabel delta error. Oleh karena itu disebut membership 9x3 yang menunjukkan jumlah membership nya. Tabel 3.20 menunjukkan bahwa pada variabel error memiliki 9 variabel lingusitik dan Tabel 3.21 menunjukkan bahwa pada variabel delta error memiliki 3 variabel lingusitik. *Range scala* variabel lingusitik juga dapat dilihat pada Tabel tersebut. Data error dan delta error yang diproses adalah data dari sensor BNO055 yang telah diolah. Sedangkan pada Tabel 3.22 menunjukkan *range scala* sudut servo yang memiliki 9 variabel lingusitik.

Dari 9 membership tersebut memiliki bentuk trapesium yang berbeda-beda. Hal ini bertujuan untuk memberikan performa yang lebih baik sesuai kebutuhan sistem. Semakin banyak jumlah membership maka semakin bervariasi dalam membuat desain kontrol sesuai kebutuhan sistem nya. Pada kondisi netral memiliki bentuk trapesium sama kaki yang menunjukkan titik pusat dari sistem yang telah dibuat. Pada kondisi KiSD menggambarkan prototipe memiliki kemiringan ke kiri, bentuk segitiga tidak simetris bertujuan untuk memberikan hasil output yang tidak linier antara kondisi di kaki 1 (-3 sampai -2) dan di kaki 2 (-1 sampai -0.5). Pada kaki 1 range nya dibesarkan untuk memberikan output yang lebih kecil. Kemudian pada kondisi KiD memiliki bentuk simetris yang menunjukkan nilai output yang linier antara kaki 1 dengan kaki 2. Pada kondisi KiJ memiliki bentuk segitiga tidak simetris bertujuan untuk memberikan hasil output yang tidak linier antara kondisi di kaki 1 dan di kaki 2 nya. Sama halnya pada kondisi KiSD, pada kondisi tersebut memberikan output yang lebih kecil di kaki 1.

Tabel 3.20 *Range Scala* Variabel Linguistik Error Trapesium 9x3

Himpunan	point 1	point 2	point 3	point 4
kiri sangat jauh	-25	-25	-10	-6
kiri jauh	-10	-6	-5	-4
kiri dekat	-5	-4	-3	-2
kiri sangat dekat	-3	-2	-1	-0.5
netral	-1	-0.5	0.5	1
kanan sangat dekat	0.5	1	2	3
kanan dekat	2	3	4	5
kanan jauh	4	5	6	10
kanan sangat jauh	6	10	25	25

Sedangkan pada kondisi KiSJ juga memiliki bentuk tidak simetris dan range yang lebih besar. Pada kaki 1 (-25 sampai -10) menggambarkan tidak ada perubahan nilai pada output nya karena nilai fuzzifikasi pada kondisi tersebut bernilai 1. Namun range tersebut masih menunjukkan kondisi kemiringan prototipe agar dapat terbaca oleh mikrokontroller. Kondisi kaki 1 juga digunakan sebagai proteksi karena ketika pembacaan dilakukan diluar range maka akan terjadi error

pada mikrokontroller. Oleh karena itu desain variabel error dilakukan pembacaan kemiringan prototipe hingga kondisi maksimalnya yaitu -25 derajat. Untuk kaki 2 memiliki range -10 sampai -6 karena menyesuaikan kebutuhan sistem seperti kaki 1 pada kondisi KiJ. Dari penjelasan kondisi kemiringan disisi kiri tersebut juga menggambarkan kondisi kemiringan disisi kanan.

Tabel 3.21 *Range Scala* Variabel Linguistik Delta Error Trapezium 9x3

Himpunan	point 1	point 2	point 3	point 4
kiri	-2	-2	-0.3	-0.06
tengah	-0.3	-0.06	0.06	0.3
kanan	0.06	0.3	2	2

Tabel 3.22 *Range Scala* Variabel Linguistik Servo Trapezium 9x3

variabel lingusitik	point
kiri sangat cepat	-3
kiri cepat	-1
kiri pelan	-0.3
kiri sangat pelan	-0.15
nol	0
kanan sangat pelan	0.15
kanan pelan	0.3
kanan cepat	1
kanan sangat cepat	3

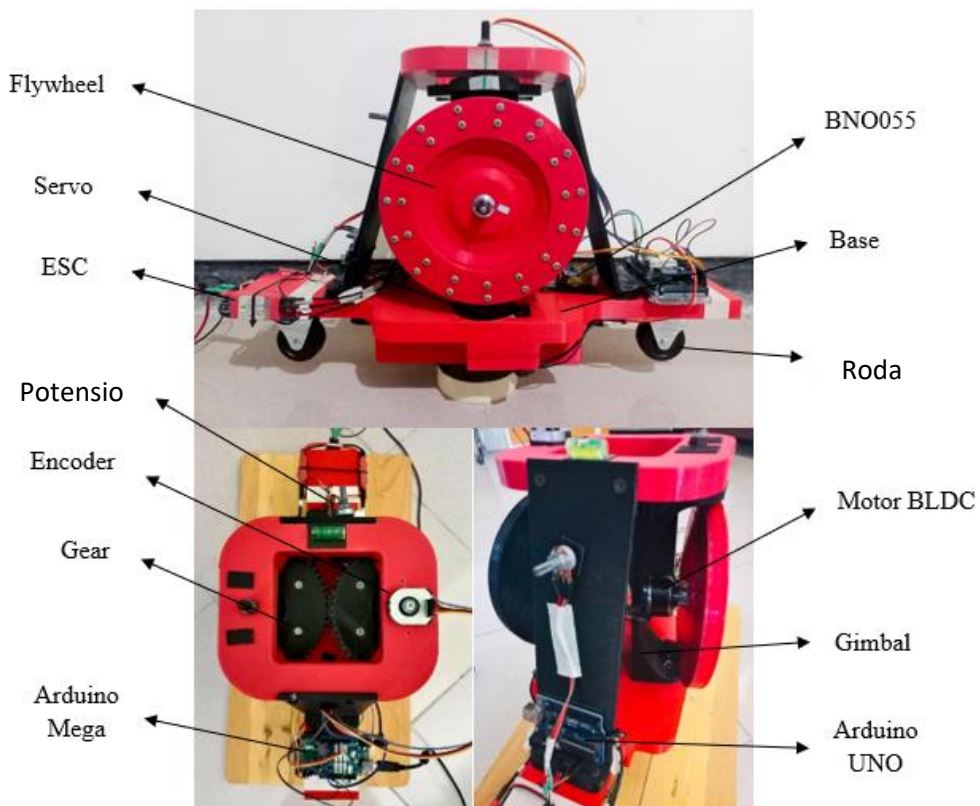
Aturan-aturan logika atau *rulebase fuzzy* yang digunakan sama dengan segitiga 9x3 di Tabel 3.11. Rulebase dari trapesium 9x3 memiliki 27 kondisi. Aturan-aturan tersebut memberikan informasi cara kerja dari sistem yang telah dibuat.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pembuatan Prototipe

Pada pembuatan prototipe, dilakukan perancangan kendaraan roda dua menggunakan kendali giroskop dalam bentuk 3D dibuat menggunakan *software solidworks* dengan memodelkan bentuk dari kendaraan roda dua jenis *scooter* yang memiliki dua roda bagian depan dan belakang. Sistem kendali giroskop yang digunakan dalam pemodelan kendaraan roda dua dipasang diatas kendaraan menggunakan dua *flywheel* yang masing-masing dipasang secara vertikal yang berputar searah sumbu-x dan gimbal yang dapat berputar searah sumbu-y. Gambar prototipe dari kendaraan roda dua dengan kendali giroskop dapat dilihat pada Gambar 4.1. Sedangkan bagian-bagian penyusun prototipe beserta hardware nya dapat dilihat pada Tabel 4.1:



Gambar 4.1 Hasil Prototipe Self Balancing Kendaraan Roda Dua

Tabel 4.1 Komponen Penyusun Prototipe

No	Komponen	Jumlah	Berat	Satuan
1	Base	1	573	Gram
2	Flywheel (r = 9 cm)	2	1080	Gram
3	Gimbal	2	484	Gram
4	Roda (r = 2.5 cm)	2	200	Gram
5	Arduino mega	1	75	Gram
6	Arduino uno	1	50	Gram
7	Sensor BNO055	1	50	Gram
8	Sensor encoder	1	100	Gram
9	Dynamixel servo	1	165	Gram
10	Dynamixel shield	1	50	Gram
11	Motor brushless DC	2	500	Gram
12	Electronic speed controller	2	58	Gram
13	Potensiometer	1	5	Gram

Prototipe dari self-balancing kendaraan roda dua terdapat tiga bagian utama yang didasari dari arah putaran komponen-komponen tersebut. Tiga bagian tersebut adalah bodi yang berputar terhadap sumbu-y, gimbal yang berputar terhadap sumbu-z, dan *flywheel* yang berputar terhadap sumbu-y. Kemampuan dari motor BLDC dapat memutar *flywheel* hingga putaran 4800 rpm namun pada penerapannya hanya menggunakan putaran 1200 RPM dikarenakan getaran yang terlalu tinggi. Sedangkan dynamixel servo dapat bergerak 360° namun pada penerapannya hanya menggunakan 70°.

Dalam mekanisme sistem penyeimbang giroskop, dibutuhkan torsi presisi yang dapat melawan *disturbance* maupun gaya eksternal seperti gaya berat dan gaya gravitasi. Torsi presisi dihasilkan oleh momentum sudut yang dihasilkan oleh kecepatan putar *flywheel* dan putaran kecepatan sudut gimbal yang terjadi. Untuk memutar *flywheel* dibutuhkan *Brushless Motor* untuk masing-masing *flywheel* dengan input potensiometer, sedangkan untuk memutar gimbal dibutuhkan *dynamixel servo* yang dibantu gear untuk menggerakkan kedua gimbal. Torsi presisi yang diberikan akan mengembalikan posisi kendaraan roda dua ke posisi seimbang. *Dynamixel servo* dapat kembali ke posisi titik pusat karena pembacaan posisi sudut *rolling* dari sensor BNO055.

4.2 Hasil Perancangan Hardware

Proses pengujian hardware pada tesis ini bertujuan agar dapat mengetahui tingkat keakuratan pada setiap komponen yang digunakan. Perancangan *hardware* ini meliputi perancangan sensor posisi BNO, sensor kecepatan BNO, sensor encoder, dan dynamixel servo. Untuk memverifikasi dari pembacaannya dilakukan uji statistik menggunakan *paired sample t-test* yang bertujuan untuk mengetahui adanya perbedaan yang signifikan atau tidak. Pengujian *paired sample t-test* dilakukan menggunakan software minitab dengan tingkat keyakinan 95%. Jika nilai P-value lebih besar dari alfa (0.05) maka gagal tolak H_0 atau H_0 diterima sehingga dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan. Hipotesis dari *paired sample t-test* sebagai berikut:

- $H_0 : \mu_d = 0$ (tidak ada perbedaan yang signifikan)
- $H_1 : \mu_d \neq 0$ (ada perbedaan yang signifikan)

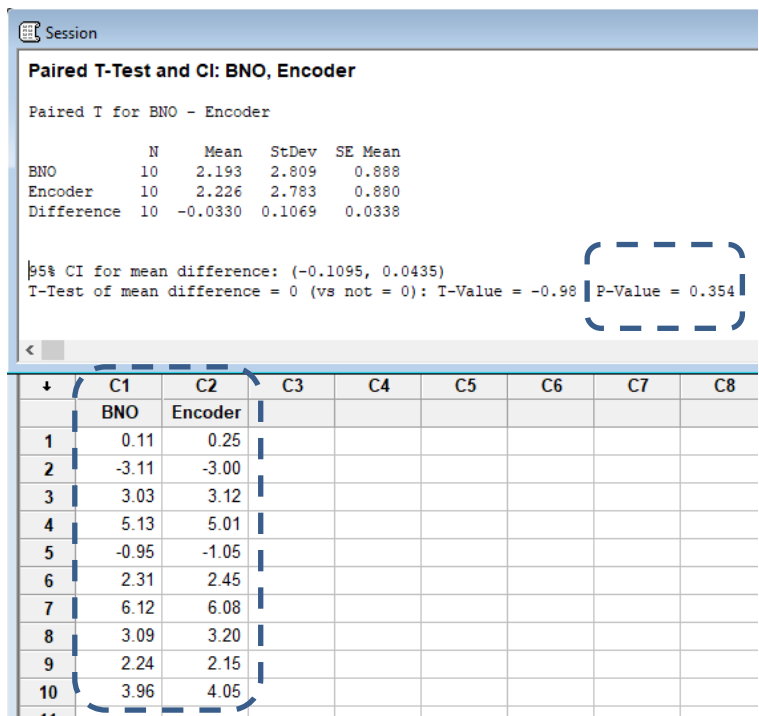
4.2.1 Pengujian Sensor Posisi

Pada rancangan sensor posisi BNO055 digunakan untuk membaca sudut roll dari prototipe yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan membandingkan antara pembacaan sensor BNO055 dengan encoder. Penempatan sensor BNO055 berada di titik tengah base. Dari Tabel 4.2 adalah perbandingan hasil pembacaan BNO055 pada serial monitor terhadap pembacaan encoder. Pengujian *paired sample t-test* pada *minitab* dapat dilihat pada Gambar 4.2.

Tabel 4.2 Pengujian Pada Sensor Posisi BNO055

No.	Pengujian	BNO055 (derajat)	Encoder (derajat)
1	1	0.11	0.25
2	2	-3.11	-3
3	3	3.03	3.12
4	4	5.13	5.01
5	5	-0.95	-1.05
6	6	2.31	2.45
7	7	6.12	6.08
8	8	3.09	3.2
9	9	2.24	2.15
10	10	3.96	4.05

Sebelum dilakukan pengujian *paired sample t-test*, data telah dicek yang menunjukkan data berdistribusi normal. Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.354, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara sensor BNO055 dengan sensor encoder.



Gambar 4.2 Hasil Minitab Pada Pengujian Posisi Roll

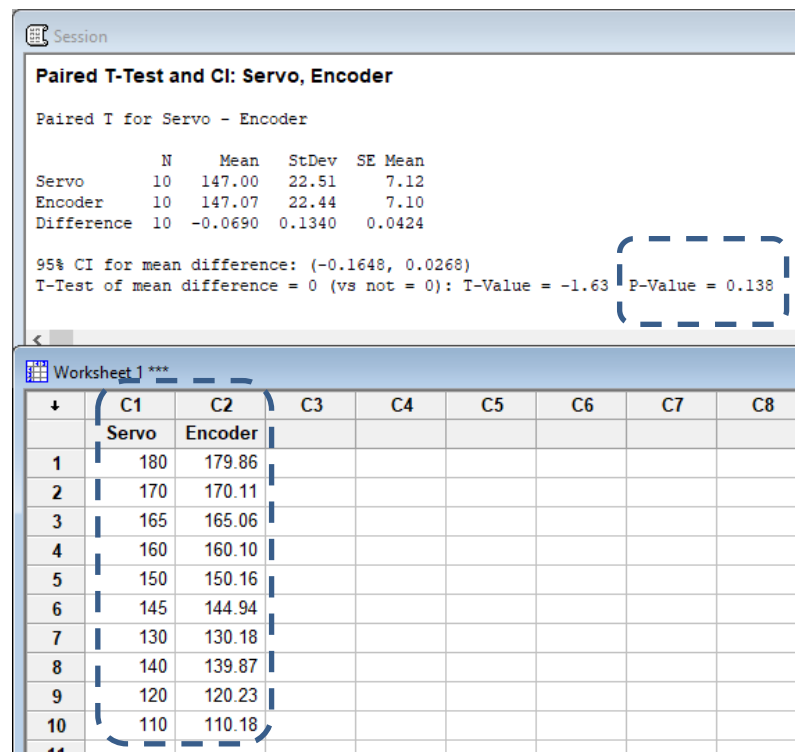
4.2.2 Pengujian Dynamixel Servo

Pada rancangan aktuator dynamixel servo digunakan untuk memberikan posisi sudut pada gimbal dari prototipe yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan membandingkan antara pembacaan dynamixel servo dengan encoder. Penempatan aktuator berada di bawah gimbal sisi kiri. Dari Tabel 4.3 adalah perbandingan hasil pembacaan servo pada serial monitor terhadap pembacaan encoder. Pengujian *paired sample t-test* pada *minitab* dapat dilihat pada Gambar 4.3. Sebelum dilakukan pengujian *paired sample t-test*, data telah dicek yang menunjukkan data berdistribusi normal. Hasil pengujian menghasilkan P-value

sebesar 0.138, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara dynamixel servo dengan sensor encoder.

Tabel 4.3 Pengujian Aktuator Dynamixel Servo

No.	Pengujian	Servo (derajat)	Encoder (derajat)
1	1	180	179.86
2	2	170	170.19
3	3	165	165.06
4	4	160	160.1
5	5	150	150.16
6	6	145	144.94
7	7	130	130.18
8	8	140	139.87
9	9	120	120.23
10	10	110	110.18



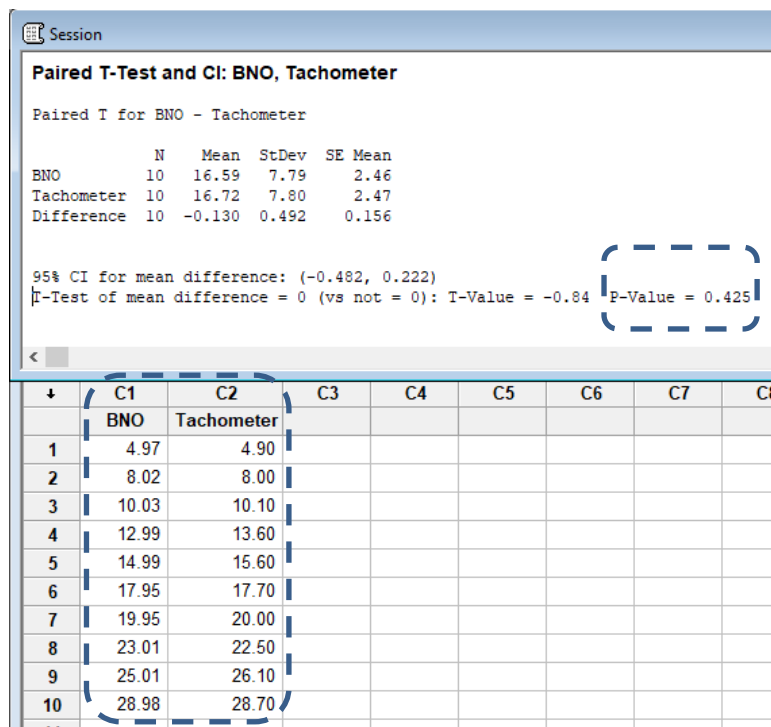
Gambar 4.3 Hasil Minitab Pada Pengujian Posisi Gimbal

4.2.3 Pengujian Sensor Kecepatan Roll

Pada rancangan sensor kecepatan BNO055 digunakan untuk membaca kecepatan sudut roll dari prototipe yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan membandingkan antara pembacaan sensor kecepatan BNO055 dengan alat ukur tachometer. Penempatan sensor berada di base bagian tengah.

Tabel 4.4 Pengujian Kecepatan Pada Sensor BNO055

No.	Pengujian	BNO055 (RPM)	Tachometer (RPM)
1	1	4.97	4.90
2	2	8.02	8.00
3	3	10.03	10.10
4	4	12.99	13.60
5	5	14.99	15.60
6	6	17.95	17.70
7	7	19.95	20.00
8	8	23.01	22.50
9	9	25.01	26.10
10	10	28.98	28.70



Gambar 4.4 Hasil Minitab Pada Pengujian Kecepatan Roll

Dari Tabel 4.4 adalah perbandingan hasil pembacaan sensor kecepatan BNO055 terhadap pembacaan tachometer. Pengujian *paired sample t-test* pada *minitab* dapat dilihat pada Gambar 4.4. Sebelum dilakukan pengujian *paired sample t-test*, data telah dicek yang menunjukkan data berdistribusi normal. Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.425, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara sensor BNO055 dengan tachometer.

4.2.4 Pengujian Sensor Kecepatan Gimbal

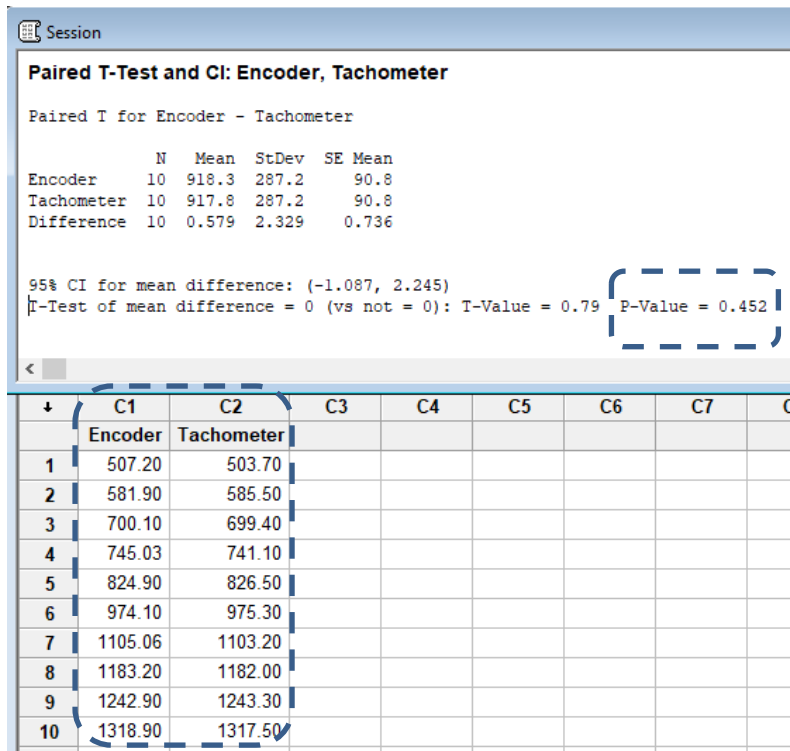
Pada rancangan sensor kecepatan encoder digunakan untuk membaca kecepatan sudut gimbal dari prototipe yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan membandingkan antara pembacaan sensor encoder dengan alat ukur tachometer. Penempatan sensor berada di atas poros gimbal. Dari Tabel 4.5 adalah perbandingan hasil pembacaan sensor encoder terhadap pembacaan tachometer. Pengujian *paired sample t-test* pada *minitab* dapat dilihat pada Gambar 4.5.

Tabel 4.5 Pengujian Kecepatan Pada Sensor Encoder

No.	Pengujian	Encoder (RPM)	Tachometer (RPM)
1	1	507.2	503.70
2	2	581.9	585.50
3	3	700.1	699.40
4	4	745.03	741.10
5	5	824.9	826.50
6	6	974.1	975.30
7	7	1105.06	1103.20
8	8	1183.2	1182.00
9	9	1242.9	1243.30
10	10	1318.9	1317.50

Sebelum dilakukan pengujian *paired sample t-test*, data telah dicek yang menunjukkan data berdistribusi normal. Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.452, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan

95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara sensor encoder dengan tachometer.



Gambar 4.5 Hasil Minitab Pada Pengujian Kecepatan Gimbal

4.3 Hasil Perancangan Fuzzy

Pada tesis ini menggunakan metode fuzzy sugeno sebagai pengendalinya. Rancangan fuzzy ini menggunakan 2 input yaitu error dan delta error, sedangkan output nya yaitu sudut servo. Hasil pengujian fuzzy pada tesis ini dilakukan berdasarkan fuzzy toolbox matlab, arduino, dan perhitungan manual.

4.3.1 Pengujian Fuzzy Arduino dengan Matlab

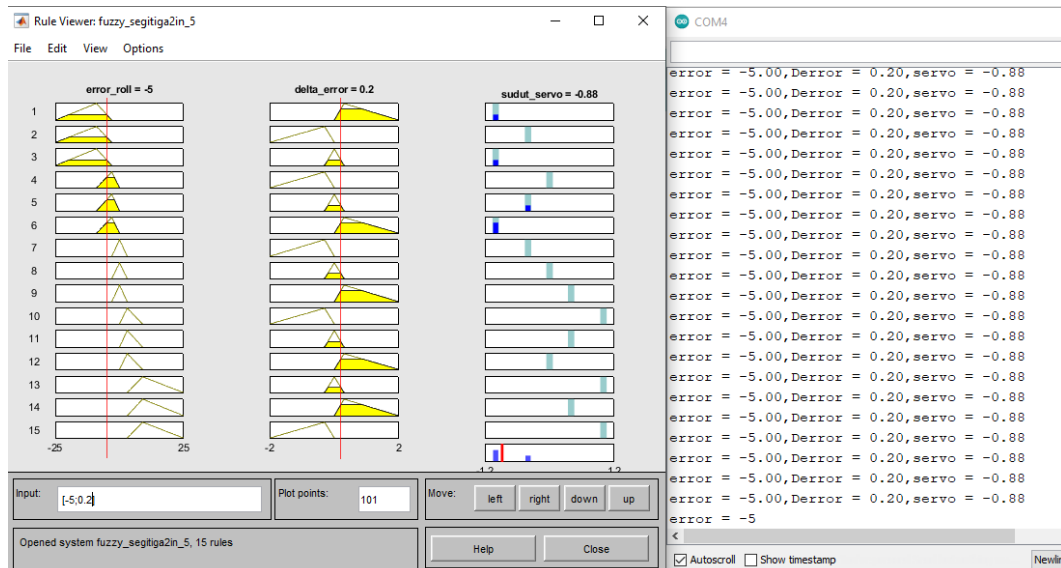
Pengujian fuzzy dilakukan untuk mengetahui keakuratan sistem yang telah dibuat. Pada sub bab ini menjelaskan perbandingan antara hasil fuzzy pada toolbox matlab dengan hasil fuzzy pada mikrokontroler Arduino. Fuzzy yang digunakan adalah tipe fuzzy sugeno dengan perbedaan jumlah membership dan fungsinya.

➤ **Pengujian Fuzzy Segitiga Membership 5x3**

Tabel 4.6 adalah perbandingan antara nilai output fuzzy pada toolbox matlab dengan nilai fuzzy pada mikrokontroller Arduino. Himpunan fuzzy yang digunakan yaitu 5 membership segitiga pada input 1 (error) dan 3 membership pada input 2 (delta error).

Tabel 4.6 Segitiga Membership 5x3

No	Input 1	Input 2	Output	
			Matlab	Arduino
1	-10	0	-1	-1
2	-8.5	0.1	-0.957	-0.96
3	-5	0.2	-0.88	-0.88
4	-3	0.3	-1	-1
5	-0.5	0.4	0.167	0.17
6	0	-0.3	-0.4	-0.4
7	0.5	0	0.067	0.07
8	1	-2	0	0
9	2.5	-0.15	0.475	0.48
10	4.5	-0.06	0.679	0.68



Gambar 4.6 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Segitiga 5x3)

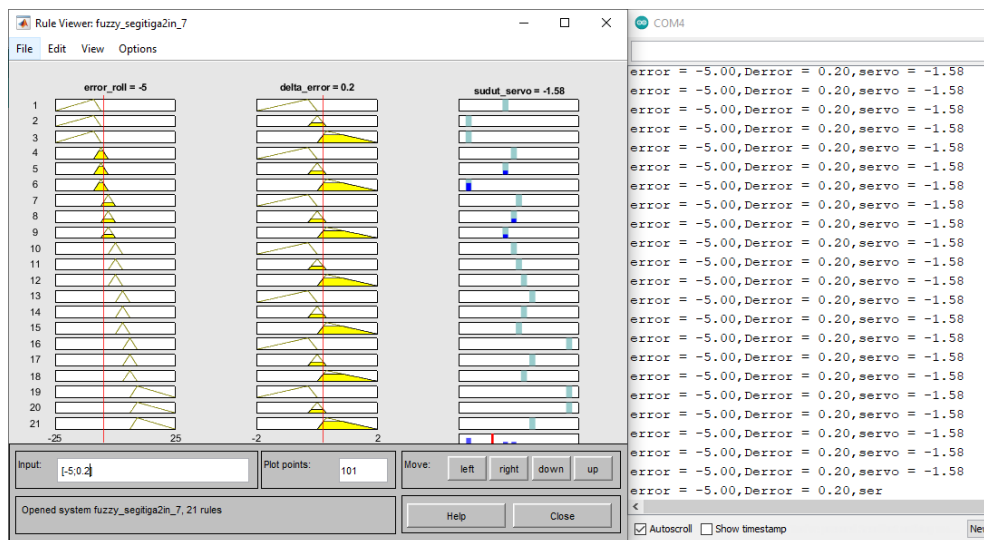
Gambar 4.6 merupakan sampel pengujian segitiga 5x3 antara nilai matlab dengan arduino, dengan kondisi error = -5 dan delta error = 0.2. Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.235, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara output matlab dengan output arduino.

➤ **Pengujian Fuzzy Segitiga Membership 7x3**

Tabel 4.7 adalah perbandingan antara nilai output fuzzy pada toolbox matlab dengan nilai fuzzy pada mikrokontroler Arduino. Himpunan fuzzy yang digunakan yaitu 7 membership segitiga pada input 1 (error) dan 3 membership pada input 2 (delta error). Gambar 4.7 merupakan sampel pengujian segitiga 7x3 antara nilai matlab dengan arduino, dengan kondisi error = -5 dan delta error = 0.2. Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.089, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara output matlab dengan output arduino.

Tabel 4.7 Segitiga Membership 7x3

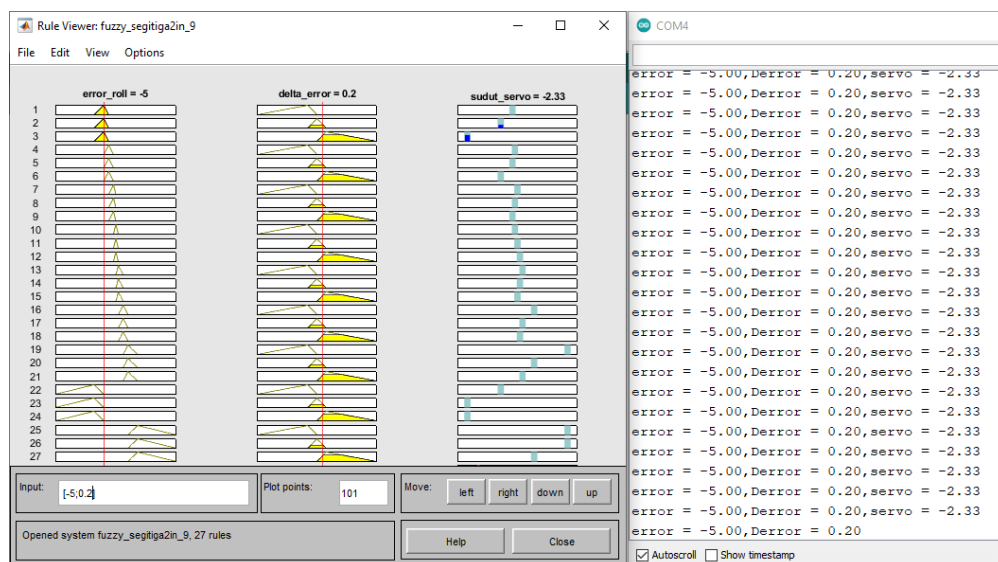
No	Input 1	Input 2	Output	
			Matlab	Arduino
1	-10	0	-3	-3
2	-8.5	0.1	-2.72	-2.72
3	-5	0.2	-1.58	-1.58
4	-3	0.3	-0.8	-0.8
5	-0.5	0.4	0.117	0.12
6	0	-0.3	-0.3	-0.3
7	0.5	0	0.05	0.05
8	1	-2	0	0
9	2.5	-0.15	0.375	0.38
10	4.5	-0.06	0.936	0.94



Gambar 4.7 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Segitiga 7x3)

➤ Pengujian Fuzzy Segitiga Membership 9x3

Tabel 4.8 adalah perbandingan antara nilai output fuzzy pada toolbox matlab dengan nilai fuzzy pada mikrokontroler Arduino. Himpunan fuzzy yang digunakan yaitu 9 membership segitiga pada input 1 (error) dan 3 membership pada input 2 (delta error). Gambar 4.8 merupakan sampel pengujian segitiga 9x3 antara nilai matlab dengan arduino, dengan kondisi error = -5 dan delta error = 0.2.



Gambar 4.8 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Segitiga 9x3)

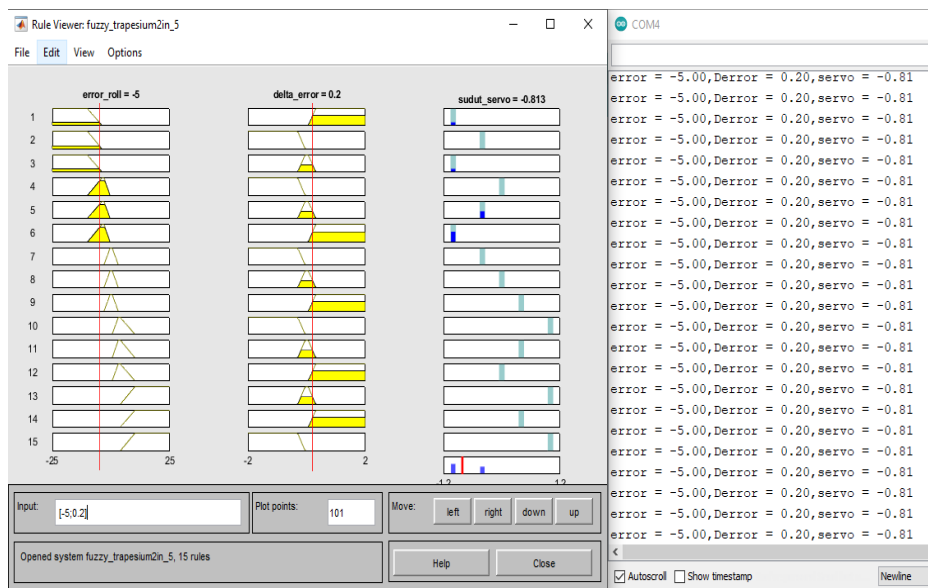
Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.297, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara output matlab dengan output arduino.

Tabel 4.8 Segitiga Membership 9x3

No	Input 1	Input 2	Output	
			Matlab	Arduino
1	-8.7	0	-2.8	-2.8
2	-8.5	0.1	-2.42	-2.4
3	-5	0.2	-2.33	-2.33
4	-3	0.3	-1	-1
5	-0.5	0.4	-0.08	-0.08
6	0	-0.3	-0.15	-0.15
7	0.5	0	0.08	0.08
8	1	-2	0	0
9	2.5	-0.15	0.508	0.51
10	4.5	-0.06	1.16	1.16

➤ **Pengujian Fuzzy Trapesium Membership 5x3**

Tabel 4.9 adalah perbandingan antara nilai output fuzzy pada toolbox matlab dengan nilai fuzzy pada mikrokontroler Arduino. Himpunan fuzzy yang digunakan yaitu 5 membership trapesium pada input 1 (error) dan 3 membership pada input 2 (delta error). Gambar 4.9 merupakan sampel pengujian trapesium 5x3 antara nilai matlab dengan arduino, dengan kondisi error = -5 dan delta error = 0.2. Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.619, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara output matlab dengan output arduino.



Gambar 4.9 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Trapeسيوم 5x3)

Tabel 4.9 Trapesium Membership 5x3

No	Input 1	Input 2	Output	
			Matlab	Arduino
1	-10	0	-1	-1
2	-8.5	0.1	-0.888	-0.89
3	-5	0.2	-0.813	-0.81
4	-3	0.3	-1	-1
5	-0.5	0.4	0.4	0.4
6	0	-0.3	-0.4	-0.4
7	0.5	0	0	0
8	1	-2	-0.12	-0.12
9	2.5	-0.15	0.389	0.39
10	4.5	-0.06	0.45	0.45

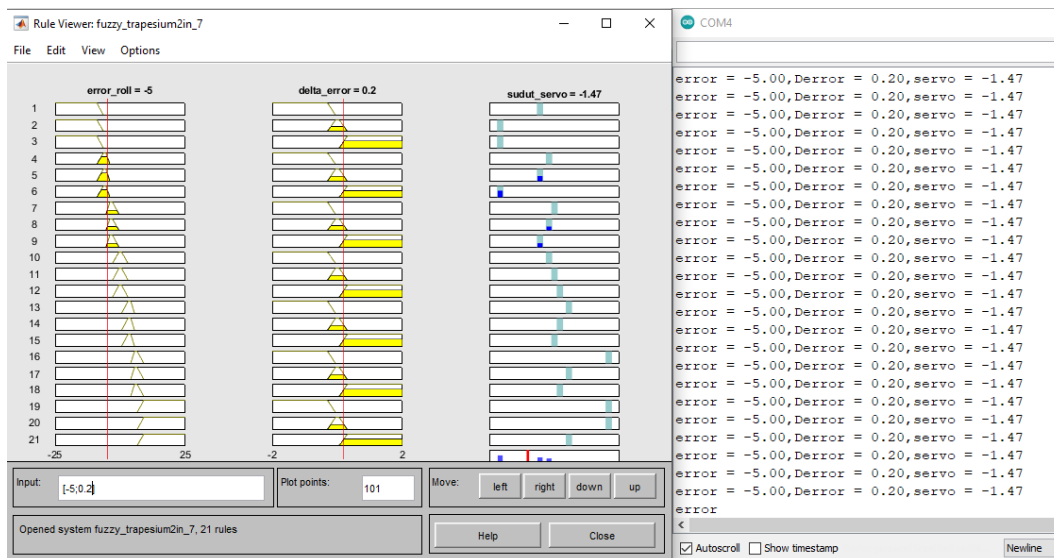
➤ Pengujian Fuzzy Trapesium Membership 7x3

Tabel 4.10 adalah perbandingan antara nilai output fuzzy pada toolbox matlab dengan nilai fuzzy pada mikrokontroler Arduino. Himpunan fuzzy yang digunakan yaitu 7 membership trapesium pada input 1 (error) dan 3 membership pada input 2 (delta error). Gambar 4.10 merupakan sampel pengujian trapesium 7x3 antara nilai matlab dengan arduino, dengan kondisi error = -5 dan delta error = 0.2. Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.182, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal

tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara output matlab dengan output arduino.

Tabel 4.10 Trapesium Membership 7x3

No	Input 1	Input 2	Output	
			Matlab	Arduino
1	-10	0	-3	-3
2	-8.5	0.1	-2.67	-2.67
3	-5	0.2	-1.47	-1.47
4	-3	0.3	-0.8	-0.8
5	-0.5	0.4	0.3	0.3
6	0	-0.3	-0.3	-0.3
7	0.5	0	0	0
8	1	-2	-0.08	-0.08
9	2.5	-0.15	0.305	0.31
10	4.5	-0.06	0.467	0.47



Gambar 4.10 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Trapesium 7x3)

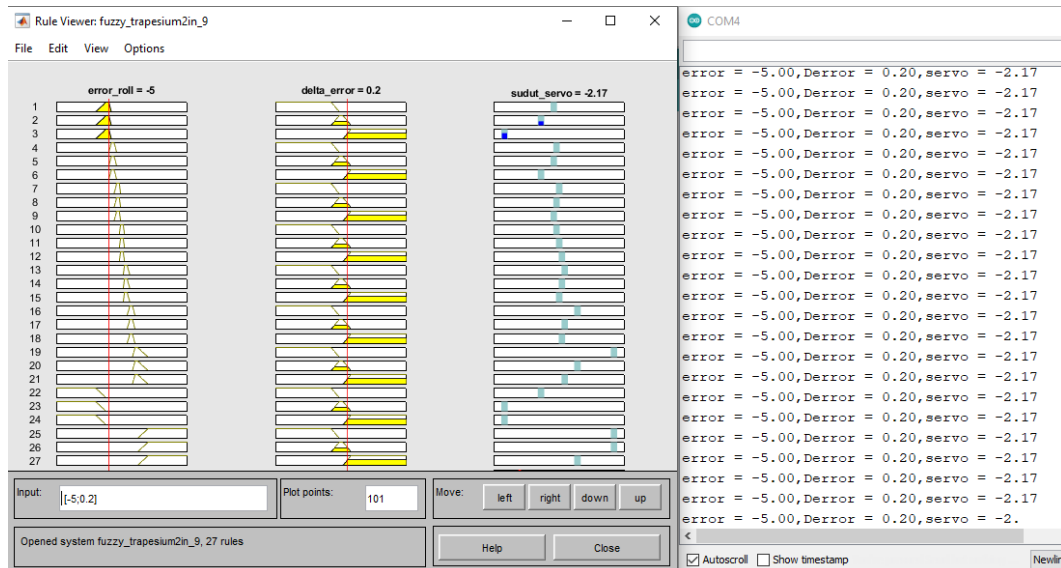
➤ Pengujian Fuzzy Trapesium Membership 9x3

Tabel 4.11 adalah perbandingan antara nilai output fuzzy pada toolbox matlab dengan nilai fuzzy pada mikrokontroler Arduino. Himpunan fuzzy yang digunakan yaitu 9 membership trapesium pada input 1 (error) dan 3 membership pada input 2 (delta error). Gambar 4.11 merupakan sampel pengujian trapesium 9x3

antara nilai matlab dengan arduino, dengan kondisi error = -5 dan delta error = 0.2. Hasil pengujian menghasilkan P-value sebesar 0.177, artinya P-value lebih besar dari alfa yaitu 0.05. Berdasarkan hasil keputusan yang didapat menunjukkan gagal tolak H_0 dengan tingkat keyakinan 95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara output matlab dengan output arduino.

Tabel 4.11 Trapezium Membership 9x3

No	Input 1	Input 2	Output	
			Matlab	Arduino
1	-8	0	-2.65	-2.65
2	-8.5	0.1	-2.242	-2.24
3	-5	0.2	-2.07	-2.07
4	-3	0.3	-1	-1
5	-0.5	0.4	0.15	0.15
6	0	-0.3	-0.15	-0.15
7	0.5	0	0	0
8	1	-2	0.3	0.3
9	2.5	-0.15	0.407	0.41
10	4.5	-0.06	0.65	0.65



Gambar 4.11 Sampel Perbandingan Matlab Dengan Arduino (Trapezium 9x3)

4.3.2 Pengujian Fuzzy dengan Perhitungan

Pengujian fuzzy secara perhitungan manual juga dilakukan untuk mengetahui keakuratan sistem yang telah dibuat. Pada sub bab ini menjelaskan hasil perhitungan manual ketika error = -5 dan delta error = 0.2. Fuzzy yang digunakan adalah tipe fuzzy sugeno dengan perbedaan jumlah membership dan fungsinya. Implikasi dengan fungsi MIN untuk mendapatkan nilai α -predikat tiap-tiap rule ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_i$) Kemudian masing-masing nilai α -predikat ini digunakan untuk menghitung keluaran hasil inferensi secara tegas (crisp) masing-masing rule (z_1, z_2, z_3, z_i). Defuzzifikasi menggunakan metode rata-rata.

$$Z = \frac{\sum(\alpha_i * z_i)}{\sum \alpha_i} \quad (4.1)$$

Keterangan : Z= Variabel output

α_i = Nilai α predikat

z_i = Nilai variabel output

➤ Perhitungan Fuzzy Segitiga Membership 5x3

Diketahui :

- Error = -5

$$x = -5$$

$$a = -9$$

$$b = -3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{-5 + 9}{-3 + 9} = \frac{4}{6} = 0.67 \text{ (KiSD)}$$

- Delta error = 0.2

$$x = 0.2$$

$$a = 0$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{0.2 - 0}{0.3 - 0} = \frac{0.2}{0.3} = 0.67 \text{ (Kn)}$$

$$x = -5$$

$$a = -9$$

$$b = -3$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{-3 + 5}{-3 + 9} = \frac{2}{6} = 0.33 \text{ (KiD)}$$

$$x = 0.2$$

$$a = 0$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{0.3 - 0.2}{0.3 - 0} = \frac{0.1}{0.3} = 0.33 \text{ (T)}$$

Tabel 4.12 Rulebase Segitiga 5x3 yang Memiliki Nilai

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri dekat (0.33)	Tengah (0.33)	Kiri pelan (-1)
2	Kiri dekat (0.33)	Kanan (0.67)	Kiri pelan (-1)
3	Kiri sangat dekat (0.67)	Tengah (0.33)	Kiri sangat pelan (-0.4)
4	Kiri sangat dekat (0.67)	Kanan (0.67)	Kiri pelan (-1)

- Nilai variabel ouput = $(-1 ; -0.4 ; 0 ; 0.4 ; 1)$
- Nilai pembilang = $\sum(\alpha_i * z_i)$
 $= (0.33 \times -1) + (0.33 \times -1) + (0.33 \times -0.4) + (0.67 \times -1)$
- Nilai penyebut = $\sum\alpha_i$
 $= 0.33 + 0.33 + 0.33 + 0.67$
- Output = $\frac{\text{Nilai pembilang}}{\text{Nilai penyebut}}$
 $= \frac{-0.33-0.33-0.132-0.67}{0.33+0.33+0.33+0.67}$
 $= \frac{-1.462}{1.66} = -0.88$

Jadi, output yang dihasilkan servo sebesar -0.88 derajat.

➤ **Perhitungan Fuzzy Segitiga Membership 7x3**

Diketahui :

- Error = -5

$$x = -5$$

$$a = -6$$

$$b = -3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{-5 + 6}{-3 + 6} = \frac{1}{3} = 0.33 \text{ (KiSD)}$$

- Delta error = 0.2

$$x = 0.2$$

$$a = 0$$

$$b = 0.3$$

$$x = -5$$

$$a = -6$$

$$b = -3$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{-3 + 5}{-3 + 6} = \frac{2}{3} = 0.67 \text{ (KiD)}$$

$$x = 0.2$$

$$a = 0$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{0.2 - 0}{0.3 - 0} = \frac{0.2}{0.3} = 0.67 (Kn)$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{0.3 - 0.2}{0.3 - 0} = \frac{0.1}{0.3} = 0.33 (T)$$

Tabel 4.13 Rulebase Segitiga 7x3 yang Memiliki Nilai

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri dekat (0.67)	Tengah (0.33)	Kiri pelan (-0.8)
2	Kiri dekat (0.67)	Kanan (0.67)	Kiri cepat (-3)
3	Kiri sangat dekat (0.33)	Tengah (0.33)	Kiri sangat pelan (-0.3)
4	Kiri sangat dekat (0.33)	Kanan (0.67)	Kiri pelan (-0.8)

- Nilai variabel ouput = $(-3 ; -0.8 ; -0.3 ; 0 ; 0.3 ; 0.8 ; 3)$
- Nilai pembilang = $\sum(\alpha_i * z_i)$
 $= (0.33 \times -0.8) + (0.67 \times -3) + (0.33 \times -0.3) + (0.33 \times -0.8)$
- Nilai penyebut = $\sum\alpha_i$
 $= 0.33 + 0.67 + 0.33 + 0.33$
- Output = $\frac{\text{Nilai pembilang}}{\text{Nilai penyebut}}$
 $= \frac{-0.264 - 2.01 - 0.099 - 0.264}{0.33 + 0.67 + 0.33 + 0.33}$
 $= \frac{-2.637}{1.66} = -1.58$

Jadi, output yang dihasilkan servo sebesar -1.58 derajat.

➤ Perhitungan Fuzzy Segitiga Membership 9x3

Diketahui :

- Error = -5

$$x = -5$$

$$a = -5$$

$$b = -3$$

$$x = -5$$

$$a = -5$$

$$b = -3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{-5 + 5}{-3 + 5} = \frac{0}{2} = 0 (KiD)$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{-3 + 5}{-3 + 5} = \frac{2}{2} = 1 (Kij)$$

- Delta error = 0.2

$$x = 0.2$$

$$a = 0$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{0.2 - 0}{0.3 - 0} = \frac{0.2}{0.3} = 0.67 \text{ (Kn)}$$

$$x = 0.2$$

$$a = 0$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{0.3 - 0.2}{0.3 - 0} = \frac{0.1}{0.3} = 0.33 \text{ (T)}$$

Tabel 4.14 Rulebase Segitiga 9x3 yang Memiliki Nilai

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri dekat (0)	Tengah (0.33)	Kiri pelan (-0.3)
2	Kiri dekat (0)	Kanan (0.67)	Kiri cepat (-1)
3	Kiri jauh (1)	Tengah (0.33)	Kiri cepat (-1)
4	Kiri jauh (1)	Kanan (0.67)	Kiri sangat cepat (-3)

- Nilai variabel output = $(-3; -1; -0.3; -0.15; 0; 0.15; 0.3; 1; 3)$

- Nilai pembilang = $\sum(\alpha_i * z_i)$
 $= (0 \times -0.3) + (0 \times -1) + (0.33 \times -1) + (0.67 \times -3)$

- Nilai penyebut = $\sum \alpha_i$
 $= 0 + 0 + 0.33 + 0.67$

- Output = $\frac{\text{Nilai pembilang}}{\text{Nilai penyebut}}$
 $= \frac{0+0-0.33-2}{0+0+0.33+0.67}$
 $= \frac{-2.33}{1} = -2.33$

Jadi, output yang dihasilkan servo sebesar -2.33 derajat. Hasil ini menunjukkan nilai yang sama antara nilai dari simulasi fuzzy toolbox matlab.

➤ **Perhitungan Fuzzy Trapesium Membership 5x3**

Diketahui :

- Error = -5

$$x = -5$$

$$a = -10$$

$$b = -4$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{-5 + 10}{-4 + 10} = \frac{5}{6} = 0.83 \text{ (KiSD)}$$

- Delta error = 0.2

$$x = 0.2$$

$$a = 0.06$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{0.2 - 0.06}{0.3 - 0.06} = \frac{0.14}{0.24} = 0.58 \text{ (Kn)}$$

$$x = -5$$

$$a = -10$$

$$b = -4$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{-4 + 5}{-4 + 10} = \frac{1}{6} = 0.17 \text{ (KiD)}$$

$$x = 0.2$$

$$a = 0.06$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{0.3 - 0.2}{0.3 - 0.06} = \frac{0.1}{0.24} = 0.42 \text{ (T)}$$

Tabel 4.15 Rulebase Trapesium 5x3 yang Memiliki Nilai

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri dekat (0.17)	Tengah (0.42)	Kiri pelan (-1)
2	Kiri dekat (0.17)	Kanan (0.58)	Kiri pelan (-1)
3	Kiri sangat dekat (0.83)	Tengah (0.42)	Kiri sangat pelan (-0.4)
4	Kiri sangat dekat (0.83)	Kanan (0.58)	Kiri pelan (-1)

- Nilai variabel output = (-1 ; -0.4 ; 0 ; 0.4 ; 1)
- Nilai pembilang = $\sum(\alpha_i * z_i)$
 $= (0.17 \times -1) + (0.17 \times -1) + (0.42 \times -0.4) + (0.58 \times -1)$
- Nilai penyebut = $\sum\alpha_i$
 $= 0.17 + 0.17 + 0.42 + 0.58$
- Output = $\frac{\text{Nilai pembilang}}{\text{Nilai penyebut}}$

$$= \frac{-0.17-0.17-0.168-0.58}{0.17+0.17+0.42+0.58}$$

$$= \frac{-1.088}{1.34} = -0.81$$

Jadi, output yang dihasilkan servo sebesar -0.81 derajat. Hasil ini menunjukkan nilai yang sama antara nilai dari simulasi toolbox matlab.

➤ **Perhitungan Fuzzy Trapesium Membership 7x3**

Diketahui :

- Error = -5

$$x = -5$$

$$a = -5.5$$

$$b = -4$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{-5 + 5.5}{-4 + 5.5} = \frac{0.5}{1.5} = 0.33 \text{ (KiSD)}$$

$$x = -5$$

$$a = -5.5$$

$$b = -4$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{-4 + 5}{-4 + 5.5} = \frac{1}{1.5} = 0.67 \text{ (KiD)}$$

- Delta error = 0.2

$$x = 0.2$$

$$a = 0.06$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{0.2 - 0.06}{0.3 - 0.06} = \frac{0.14}{0.24} = 0.58 \text{ (Kn)}$$

$$x = 0.2$$

$$a = 0.06$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{0.3 - 0.2}{0.3 - 0.06} = \frac{0.1}{0.24} = 0.42 \text{ (T)}$$

Tabel 4.16 Rulebase Trapesium 7x3 yang Memiliki Nilai

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri dekat (0.67)	Tengah (0.42)	Kiri pelan (-0.8)
2	Kiri dekat (0.67)	Kanan (0.58)	Kiri cepat (-3)
3	Kiri sangat dekat (0.33)	Tengah (0.42)	Kiri sangat pelan (-0.3)
4	Kiri sangat dekat (0.33)	Kanan (0.58)	Kiri pelan (-0.8)

- Nilai variabel output = $(-3; -0.8; -0.3; 0; 0.3; 0.8; 3)$

- Nilai pembilang $= \sum(\alpha_i * z_i)$
 $= (0.42 \times -0.8) + (0.58 \times -3) + (0.33 \times -0.3) + (0.33 \times -0.8)$
- Nilai penyebut $= \sum \alpha_i$
 $= 0.42 + 0.58 + 0.33 + 0.33$
- Output $= \frac{\text{Nilai pembilang}}{\text{Nilai penyebut}}$
 $= \frac{-0.336 - 1.74 - 0.099 - 0.264}{0.42 + 0.58 + 0.33 + 0.33}$
 $= \frac{-2.439}{1.66} = -1.47$

Jadi, output yang dihasilkan servo sebesar -1.47 derajat. Hasil ini menunjukkan nilai yang sama antara nilai dari simulasi toolbox matlab.

➤ **Perhitungan Fuzzy Trapesium Membership 9x3**

Diketahui :

- Error = -5

$$x = -5$$

$$a = -5$$

$$b = -4$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{-5 + 5}{-4 + 5} = \frac{0}{1} = 0 \text{ (KiD)}$$

- Delta error = 0.2

$$x = 0.2$$

$$a = 0.06$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga naik:

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{0.2 - 0.06}{0.3 - 0.06} = \frac{0.14}{0.24} = 0.58 \text{ (Kn)}$$

$$x = -5$$

$$a = -5$$

$$b = -4$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{-4 + 5}{-4 + 5} = \frac{1}{1} = 1 \text{ (Kij)}$$

$$x = 0.2$$

$$a = 0.06$$

$$b = 0.3$$

Rumus segitiga turun:

$$\frac{b - x}{b - a} = \frac{0.3 - 0.2}{0.3 - 0.06} = \frac{0.1}{0.24} = 0.42 \text{ (T)}$$

Tabel 4.17 Rulebase Trapesium 9x3 yang Memiliki Nilai

No.	Error	Delta Error	Servo
1	Kiri dekat (0)	Tengah (0.42)	Kiri pelan (-0.3)
2	Kiri dekat (0)	Kanan (0.58)	Kiri cepat (-1)
3	Kiri jauh (1)	Tengah (0.42)	Kiri cepat (-1)
4	Kiri jauh (1)	Kanan (0.58)	Kiri sangat cepat (-3)

- Nilai variabel output = $(-3; -1; -0.3; -0.15; 0; 0.15; 0.3; 1; 3)$
- Nilai pembilang = $\sum(\alpha_i * z_i)$
 $= (0 \times -0.3) + (0 \times -1) + (0.42 \times -1) + (0.58 \times -3)$
- Nilai penyebut = $\sum\alpha_i$
 $= 0 + 0 + 0.42 + 0.58$
- Output = $\frac{\text{Nilai pembilang}}{\text{Nilai penyebut}}$
 $= \frac{0+0-0.42-1.74}{0+0+0.42+0.58}$
 $= \frac{-2.16}{1} = -2.16$

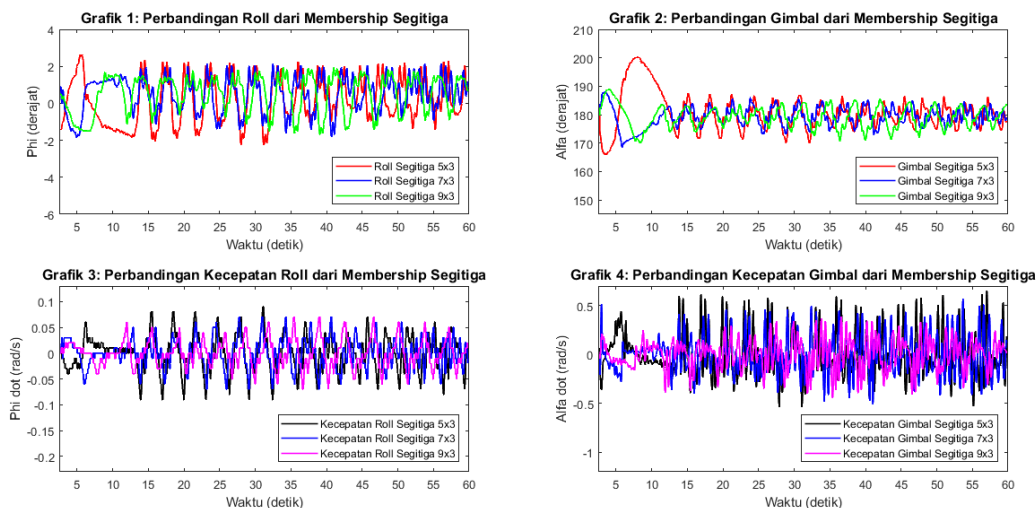
Jadi, output yang dihasilkan servo sebesar -2.16 derajat. Hasil ini menunjukkan nilai yang sama antara nilai dari simulasi toolbox matlab.

4.4 Hasil Pengujian Prototipe

Pada penelitian ini dilakukan pengujian tanpa penambahan massa selama 60 detik, pengujian dengan penambahan massa 100 gram selama 30 detik, dan pengujian dengan penambahan massa 500 gram selama 30 detik. Penambahan massa diletakkan pada bagian atas bodi sisi kiri. Pengambilan data dilakukan pada 6 model fuzzy yang diimplementasikan di mikrokontroler Arduino yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh respon terhadap perbedaan fungsi membership dan jumlah membershipnya.

4.4.1 Perbandingan Pengujian Tanpa Penambahan Massa

Gambar 4.12 merupakan perbandingan hasil pengujian tanpa penambahan massa selama 60 detik pada fungsi segitiga dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Pembacaan nilai roll digunakan sebagai acuan karena menggambarkan kestabilan dari prototipe. Grafik menunjukkan prototipe masih dapat beresilasi di titik pusatnya yaitu 0 derajat. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 5x3 yaitu pada detik 5.6 dengan kemiringan sudut 2.56 kekanan dan pada detik 28 dengan kemiringan sudut -2.25 kekiri. Nilai roll terbesar untuk segitiga 7x3 yaitu pada detik 23.3 dengan kemiringan sudut 2.06 kekanan dan pada detik 4.9 dengan kemiringan sudut -1.88 kekiri. Sedangkan Nilai roll terbesar untuk segitiga 9x3 yaitu pada detik 33.9 dengan kemiringan sudut 1.88 kekanan dan pada detik 39 dengan kemiringan sudut -1.68 kekiri. Nilai grafik posisi roll menunjukkan bahwa fungsi segitiga 9x3 lebih baik daripada lainnya. Kriteria baik di penelitian ini dibuktikan dengan hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil. Osilasi yang kecil menggambarkan gerakan prototipe dalam menyeimbangkan lebih smooth. Dari pengujian fungsi segitiga dapat disimpulkan bahwa prototipe dapat seimbang walaupun nilai grafik menunjukkan tidak dapat stabil.



Gambar 4.12 Hasil Pengujian Perbandingan Membership Segitiga

Nilai gimbap dapat dilihat pada Grafik 2 yang menunjukkan bahwa prototipe dapat seimbang dibuktikan dengan hasil grafik yang masih berosilasi di titik pusatnya yaitu 180 derajat. Dikatakan tidak seimbang ketika nilai servo kurang dari atau sama dengan posisi minimal nya yaitu 145 derajat, atau lebih dari sama dengan posisi maksimalnya yaitu 215 derajat. Nilai minimal dan maksimal didapat dari implementasi sudut servo pada gimbap yang digunakan sebagai batas agar flywheel 1 dengan flywheel 2 tidak terjadi gesekan.

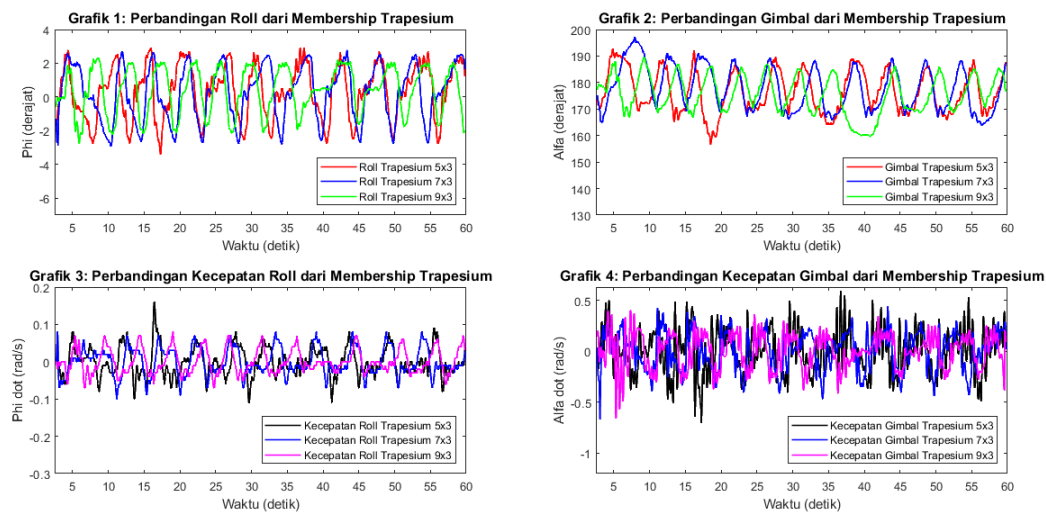
Selain pembacaan posisi roll dan posisi gimbap, dilakukan juga pembacaan kecepatan roll dan kecepatan gimbap. Hal ini digunakan untuk mengetahui kecepatan yang dihasilkan di masing-masing posisi tersebut. Nilai kecepatan roll dapat dilihat pada Grafik 3 dan kecepatan gimbap pada Grafik 4.

Gambar 4.13 merupakan perbandingan hasil pengujian tanpa penambahan massa selama 60 detik pada fungsi trapesium dengan pembacaan nilai roll, gimbap, kecepatan roll, dan kecepatan gimbap. Pembacaan nilai roll digunakan sebagai acuan karena menggambarkan kestabilan dari prototipe. Grafik menunjukkan prototipe masih dapat berosilasi di titik pusatnya yaitu 0 derajat. Didapatkan nilai roll terbesar untuk trapesium 5x3 yaitu pada detik 36.8 dengan kemiringan sudut 2.88 kekanan dan pada detik 17.3 dengan kemiringan sudut -3.31 kekiri. Nilai roll terbesar untuk trapesium 7x3 yaitu pada detik 43.4 dengan kemiringan sudut 2.69 kekanan dan pada detik 10.3 dengan kemiringan sudut -2.88 kekiri. Sedangkan Nilai roll terbesar untuk trapesium 9x3 yaitu pada detik 8.7 dengan kemiringan sudut 2.25 kekanan dan pada detik 5.9 dengan kemiringan sudut -2.75 kekiri. Nilai grafik posisi roll menunjukkan bahwa fungsi trapesium 9x3 lebih baik daripada lainnya. Kriteria baik di penelitian ini dibuktikan dengan hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil. Osilasi yang kecil menggambarkan gerakan prototipe dalam menyeimbangkan lebih smooth. Dari pengujian fungsi trapesium dapat disimpulkan bahwa prototipe dapat seimbang walaupun nilai grafik menunjukkan tidak dapat stabil.

Nilai gimbap dapat dilihat pada Grafik 2 yang menunjukkan bahwa prototipe dapat seimbang dibuktikan dengan hasil grafik yang masih berosilasi di titik pusatnya yaitu 180 derajat. Dikatakan tidak seimbang ketika nilai servo kurang dari atau sama dengan posisi minimal nya yaitu 145 derajat, atau lebih dari sama dengan

posisi maksimalnya yaitu 215 derajat. Nilai minimal dan maksimal didapat dari implementasi sudut servo pada gimbal yang digunakan sebagai batas agar flywheel 1 dengan flywheel 2 tidak terjadi gesekan.

Selain pembacaan posisi roll dan posisi gimbal, dilakukan juga pembacaan kecepatan roll dan kecepatan gimbal. Hal ini digunakan untuk mengetahui kecepatan yang dihasilkan di masing-masing posisi tersebut. Nilai kecepatan roll dapat dilihat pada Grafik 3 dan kecepatan gimbal pada Grafik 4.



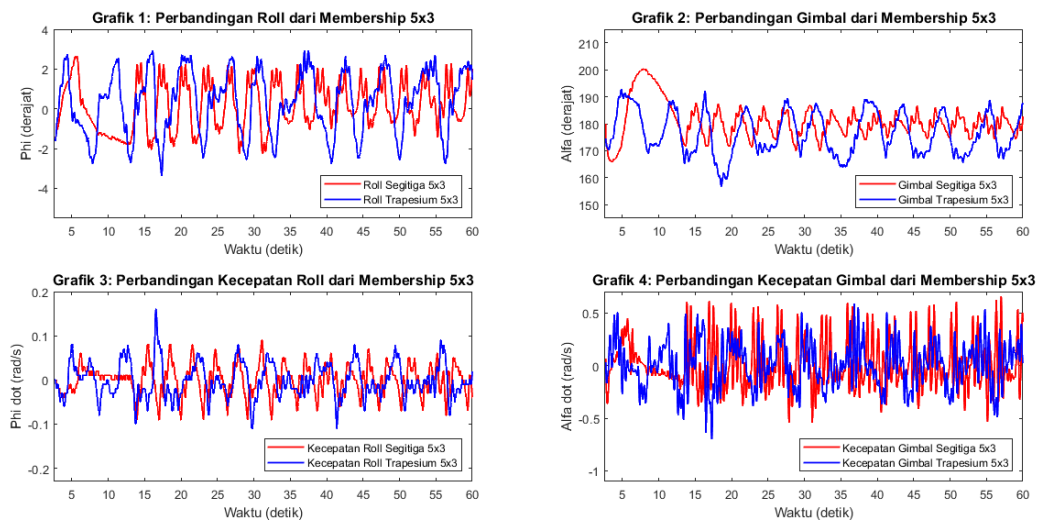
Gambar 4.13 Hasil Pengujian Perbandingan Membership Trapesium

Gambar 4.14 merupakan hasil pengujian tanpa penambahan massa selama 60 detik pada fungsi segitiga 5x3 dan fungsi trapesium 5x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Pembacaan nilai roll digunakan sebagai acuan karena menggambarkan kestabilan dari prototipe. Grafik menunjukkan prototipe masih dapat berosilasi di titik pusatnya yaitu 0 derajat. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 5x3 yaitu pada detik 5.6 dengan kemiringan sudut 2.56 kekanan dan pada detik 28 dengan kemiringan sudut -2.25 ke kiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 5x3 yaitu pada detik 36.8 dengan kemiringan sudut 2.88 kekanan dan pada detik 17.3 dengan kemiringan sudut -3.31 ke kiri. Nilai grafik posisi roll menunjukkan bahwa fungsi segitiga 5x3 lebih baik daripada trapesium 5x3. Kriteria baik di penelitian ini dibuktikan dengan hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil. Osilasi yang kecil

menggambarkan gerakan prototipe dalam menyeimbangkan lebih smooth. Dari pengujian ini menunjukkan prototipe dapat seimbang pada model keduanya walaupun nilai grafik menunjukkan tidak dapat stabil.

Nilai gimbale dapat dilihat pada Grafik 2 yang menunjukkan bahwa prototipe masih dapat seimbang dibuktikan dengan hasil grafik yang masih berosilasi di titik pusatnya yaitu 180 derajat. Dikatakan tidak seimbang ketika nilai servo kurang dari atau sama dengan posisi minimal nya yaitu 145 derajat, atau lebih dari sama dengan posisi maksimalnya yaitu 215 derajat. Nilai minimal dan maksimal didapat dari implementasi sudut servo pada gimbale yang digunakan sebagai batas agar flywheel 1 dengan flywheel 2 tidak terjadi gesekan.

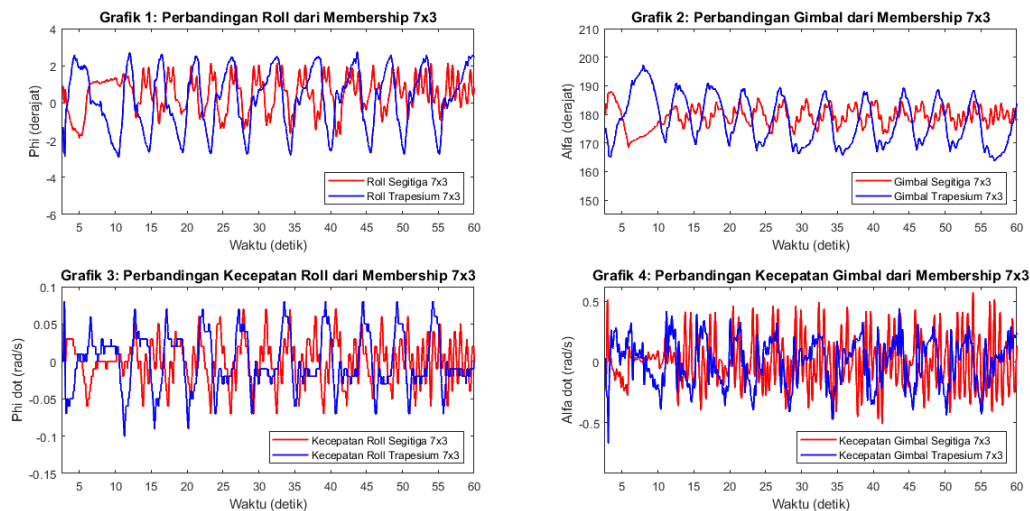
Selain pembacaan posisi roll dan posisi gimbale, dilakukan juga pembacaan kecepatan roll dan kecepatan gimbale. Hal ini digunakan untuk mengetahui kecepatan yang dihasilkan di masing-masing posisi tersebut. Nilai kecepatan roll dapat dilihat pada Grafik 3 dan kecepatan gimbale pada Grafik 4.



Gambar 4.14 Hasil Pengujian Perbandingan Segitiga dan Trapesium 5x3

Gambar 4.15 merupakan hasil pengujian tanpa penambahan massa selama 60 detik pada fungsi segitiga 7x3 dan fungsi trapesium 7x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbale, kecepatan roll, dan kecepatan gimbale. Pembacaan nilai roll digunakan sebagai acuan karena menggambarkan kestabilan dari prototipe. Grafik menunjukkan prototipe masih dapat berosilasi di titik pusatnya yaitu 0 derajat.

Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 7x3 yaitu pada detik 23.3 dengan kemiringan sudut 2.06 kekanan dan pada detik 4.9 dengan kemiringan sudut -1.88 kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 7x3 yaitu pada detik 43.4 dengan kemiringan sudut 2.69 kekanan dan pada detik 10.3 dengan kemiringan sudut -2.88 kekiri. Nilai grafik posisi roll menunjukkan bahwa fungsi segitiga 7x3 lebih baik daripada trapesium 7x3. Kriteria baik di penelitian ini dibuktikan dengan hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil. Osilasi yang kecil menggambarkan gerakan prototipe dalam menyeimbangkan lebih smooth. Dari pengujian ini menunjukkan prototipe dapat seimbang pada model keduanya walaupun nilai grafik menunjukkan tidak dapat stabil.

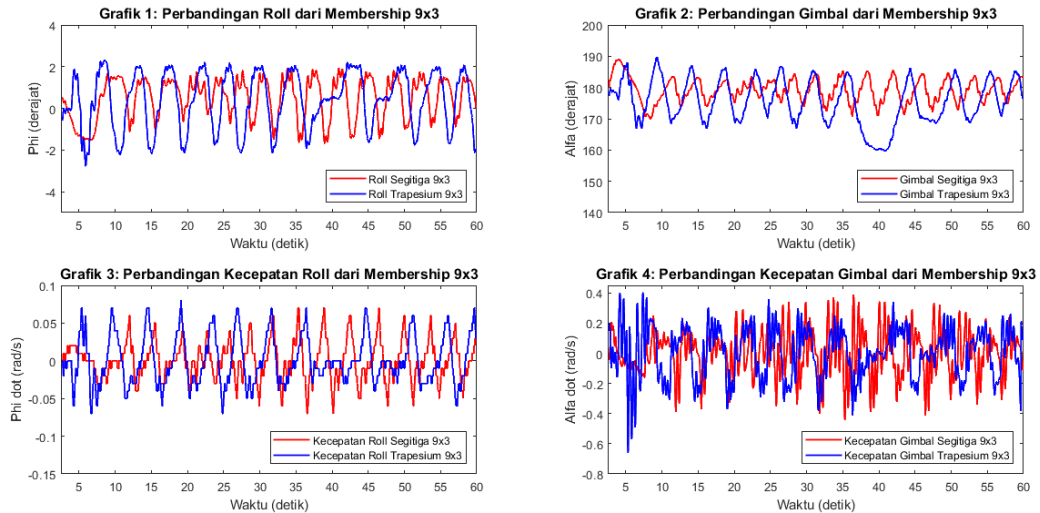


Gambar 4.15 Hasil Pengujian Perbandingan Segitiga dan Trapesium 7x3

Nilai gimbal dapat dilihat pada Grafik 2 yang menunjukkan bahwa prototipe masih dapat seimbang dibuktikan dengan hasil grafik yang masih berosilasi di titik pusatnya yaitu 180 derajat. Dikatakan tidak seimbang ketika nilai servo kurang dari atau sama dengan posisi minimal nya yaitu 145 derajat, atau lebih dari sama dengan posisi maksimalnya yaitu 215 derajat. Nilai minimal dan maksimal didapat dari implementasi sudut servo pada gimbal yang digunakan sebagai batas agar flywheel 1 dengan flywheel 2 tidak terjadi gesekan.

Selain pembacaan posisi roll dan posisi gimbal, dilakukan juga pembacaan kecepatan roll dan kecepatan gimbal. Hal ini digunakan untuk mengetahui

kecepatan yang dihasilkan di masing-masing posisi tersebut. Nilai kecepatan roll dapat dilihat pada Grafik 3 dan kecepatan gimbal pada Grafik 4.



Gambar 4.16 Hasil Pengujian Perbandingan Segitiga dan Trapesium 9x3

Gambar 4.16 merupakan hasil pengujian tanpa penambahan massa selama 60 detik pada fungsi segitiga 9x3 dan fungsi trapesium 9x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Pembacaan nilai roll digunakan sebagai acuan karena menggambarkan kestabilan dari prototipe. Grafik menunjukkan prototipe masih dapat beresilasi di titik pusatnya yaitu 0 derajat. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 9x3 yaitu pada detik 33.9 dengan kemiringan sudut 1.88 kekanan dan pada detik 39 dengan kemiringan sudut -1.68 ke kiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 9x3 yaitu pada detik 8.7 dengan kemiringan sudut 2.25 kekanan dan pada detik 5.9 dengan kemiringan sudut -2.75 ke kiri. Nilai grafik posisi roll menunjukkan bahwa fungsi segitiga 9x3 lebih baik daripada trapesium 9x3. Kriteria baik di penelitian ini dibuktikan dengan hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil. Osilasi yang kecil menggambarkan gerakan prototipe dalam menyeimbangkan lebih smooth. Dari pengujian ini menunjukkan prototipe dapat seimbang pada model keduanya walaupun nilai grafik menunjukkan tidak dapat stabil.

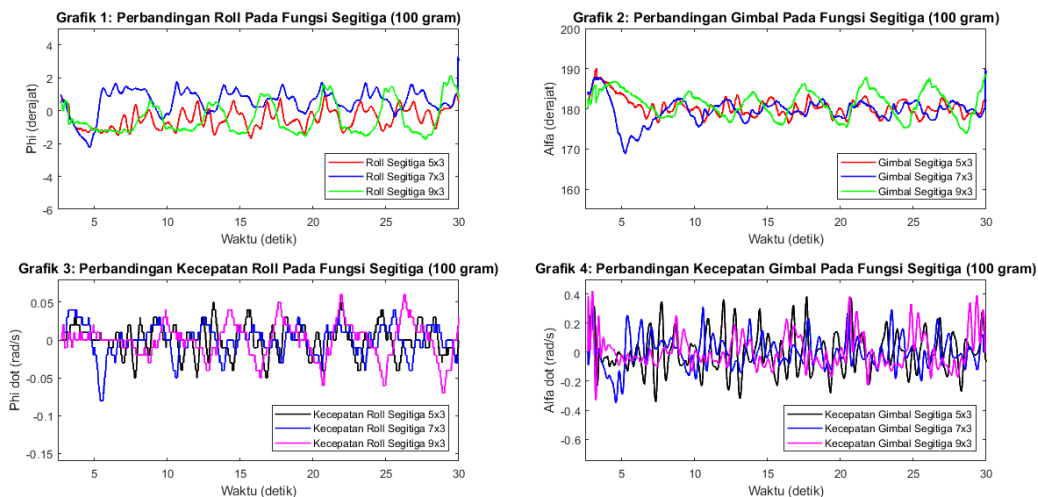
Nilai gimbal dapat dilihat pada Grafik 2 yang menunjukkan bahwa prototipe masih dapat seimbang dibuktikan dengan hasil grafik yang masih beresilasi di titik

pusatnya yaitu 180 derajat. Dikatakan tidak seimbang ketika nilai servo kurang dari atau sama dengan posisi minimal nya yaitu 145 derajat, atau lebih dari sama dengan posisi maksimalnya yaitu 215 derajat. Nilai minimal dan maksimal didapat dari implementasi sudut servo pada gimbal yang digunakan sebagai batas agar flywheel 1 dengan flywheel 2 tidak terjadi gesekan.

Selain pembacaan posisi roll dan posisi gimbal, dilakukan juga pembacaan kecepatan roll dan kecepatan gimbal. Hal ini digunakan untuk mengetahui kecepatan yang dihasilkan di masing-masing posisi tersebut. Nilai kecepatan roll dapat dilihat pada Grafik 3 dan kecepatan gimbal pada Grafik 4.

4.4.2 Perbandingan Pengujian dengan Penambahan Massa 100 gram

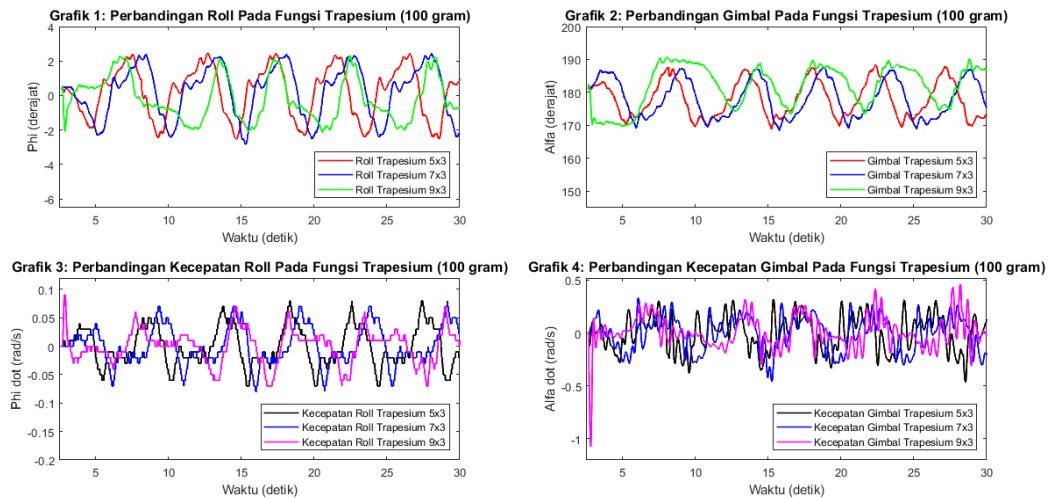
Penambahan masa pada prototipe dilakukan untuk mengetahui ketahanan prototipe dalam mempertahankan posisi agar tetap seimbang. Penambahan massa diletakkan pada bagian atas bodi sisi kiri. Dengan penambahan massa ini akan merubah energi kinetik pada prototipe terutama pada bodi, dengan demikian massa momen inersia bodi akan berubah dan *center of gravity* dari bodi tersebut akan bergeser.



Gambar 4.17 Hasil Perbandingan Membership Pada Fungsi Segitiga (100 gram)

Gambar 4.17 merupakan perbandingan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Respon yang ditunjukkan oleh

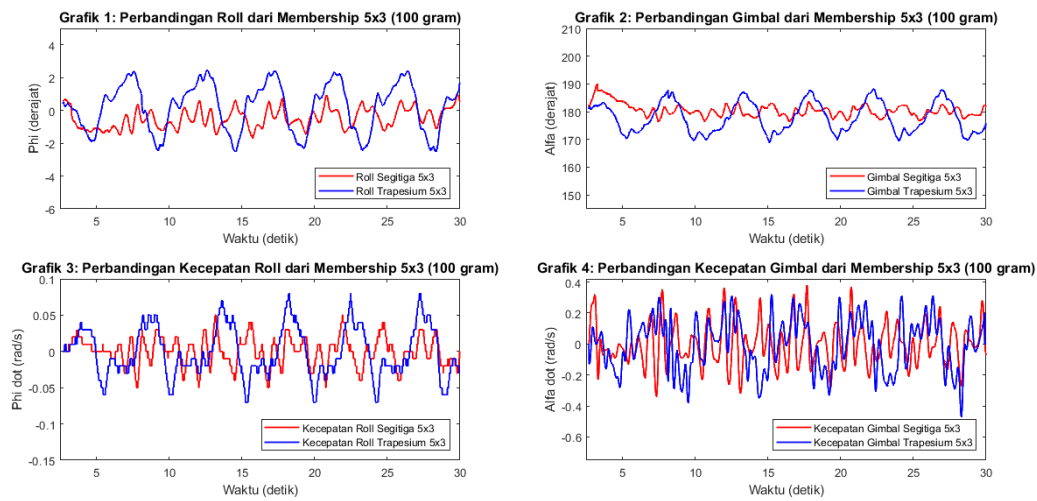
prototipe memiliki suatu kecenderungan dalam mempertahankan di posisi tegak. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 5x3 yaitu pada detik 20.8 dengan kemiringan sudut 0.88 kekanan dan pada detik 15.7 dengan kemiringan sudut -1.69 ke kiri. Nilai roll terbesar untuk segitiga 7x3 yaitu pada detik 10.6 dengan kemiringan sudut 1.75 kekanan dan pada detik 4.6 dengan kemiringan sudut -2.25 ke kiri. Sedangkan Nilai roll terbesar untuk segitiga 9x3 yaitu pada detik 29.4 dengan kemiringan sudut 2.06 kekanan dan pada detik 27.7 dengan kemiringan sudut -1.75 ke kiri. Nilai grafik roll menunjukkan bahwa fungsi segitiga 5x3 memiliki osilasi range yang lebih kecil daripada lainnya. Hal itu dipengaruhi oleh pergeseran *center of gravity* yang mana dengan adanya penambahan massa 100 gram membuat prototipe lebih stabil. Selain itu nilai variabel linguistik di segitiga 5x3 memberikan output fuzzy yang proporsional pada kondisi penambahan beban 100 gram.



Gambar 4.18 Hasil Perbandingan Membership Pada Fungsi Trapezium (100 gram)

Gambar 4.18 merupakan perbandingan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram selama 30 detik pada fungsi trapesium dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Respon yang ditunjukkan oleh prototipe memiliki suatu kecenderungan dalam mempertahankan di posisi tegak. Didapatkan nilai roll terbesar untuk trapesium 5x3 yaitu pada detik 17.3 dengan kemiringan sudut 2.38 kekanan dan pada detik 28.6 dengan kemiringan sudut -2.5 ke kiri. Nilai roll terbesar untuk trapesium 7x3 yaitu pada detik 8.4 dengan

kemiringan sudut 2.38 kekanan dan pada detik 15.3 dengan kemiringan sudut -2.81 kekiri. Sedangkan Nilai roll terbesar untuk trapesium 9x3 yaitu pada detik 22.5 dengan kemiringan sudut 2.31 kekanan dan pada detik 20.5 dengan kemiringan sudut -2.13 kekiri. Nilai grafik roll menunjukkan bahwa fungsi trapesium 9x3 lebih baik daripada lainnya karena memiliki osilasi range yang lebih kecil. Dari pengujian fungsi trapesium dapat disimpulkan bahwa prototipe dapat seimbang dengan penambahan massa 100 gram walaupun nilai grafik menunjukkan tidak dapat stabil.

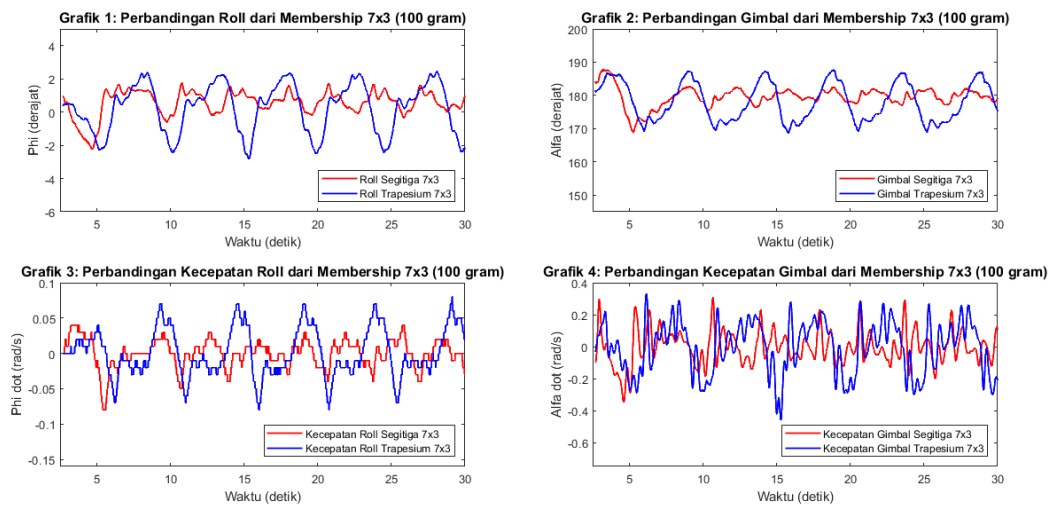


Gambar 4.19 Hasil Perbandingan Membership 5x3 dengan Beban 100 gram

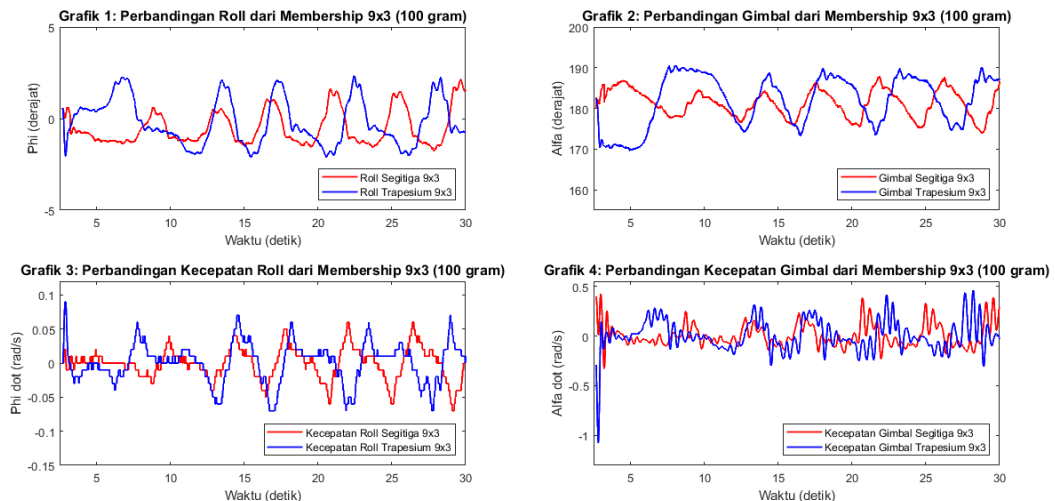
Gambar 4.19 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 5x3 dan fungsi trapesium 5x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 5x3 yaitu pada detik 20.8 dengan kemiringan sudut 0.88 kekanan dan pada detik 15.7 dengan kemiringan sudut -1.69 kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 5x3 yaitu pada detik 17.3 dengan kemiringan sudut 2.38 kekanan dan pada detik 28.6 dengan kemiringan sudut -2.5 kekiri. Dikatakan lebih baik pada penelitian ini karena hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil, artinya fungsi segitiga 5x3 lebih smooth dalam menyeimbangkan prototipe dengan beban 100 gram daripada fungsi trapesium 5x3.

Gambar 4.20 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 7x3 dan fungsi trapesium 7x3 dengan

pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 7x3 yaitu pada detik 10.6 dengan kemiringan sudut 1.75 kekanan dan pada detik 4.6 dengan kemiringan sudut -2.25 kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 7x3 yaitu pada detik 8.4 dengan kemiringan sudut 2.38 kekanan dan pada detik 15.3 dengan kemiringan sudut -2.81 kekiri. Dikatakan lebih baik pada penelitian ini karena hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil, artinya fungsi segitiga 7x3 lebih smooth dalam menyeimbangkan prototipe dengan beban 100 gram daripada fungsi trapesium 7x3.



Gambar 4.20 Hasil Perbandingan Membership 7x3 dengan Beban 100 gram



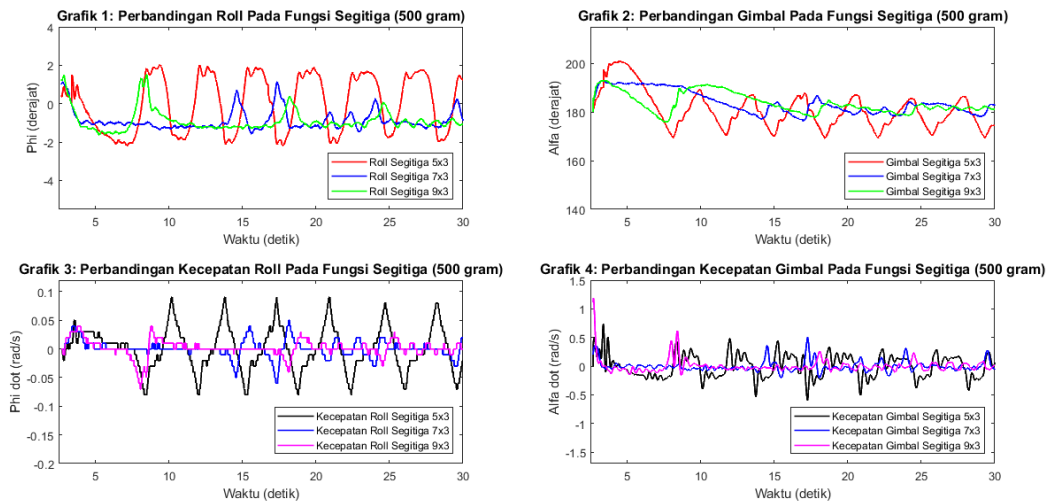
Gambar 4.21 Hasil Perbandingan Membership 9x3 dengan Beban 100 gram

Gambar 4.21 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 9x3 dan fungsi trapesium 9x3 dengan

pembacaan nilai roll, gimbai, kecepatan roll, dan kecepatan gimbai. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 9x3 yaitu pada detik 29.4 dengan kemiringan sudut 2.06 kekanan dan pada detik 27.7 dengan kemiringan sudut -1.75 ke kiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 9x3 yaitu pada detik 22.5 dengan kemiringan sudut 2.31 kekanan dan pada detik 20.5 dengan kemiringan sudut -2.13 ke kiri. Dikatakan lebih baik pada penelitian ini karena hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil, artinya fungsi segitiga 9x3 lebih smooth dalam menyeimbangkan prototipe dengan beban 100 gram daripada fungsi trapesium 9x3.

4.4.3 Perbandingan Pengujian dengan Penambahan Massa 500 gram

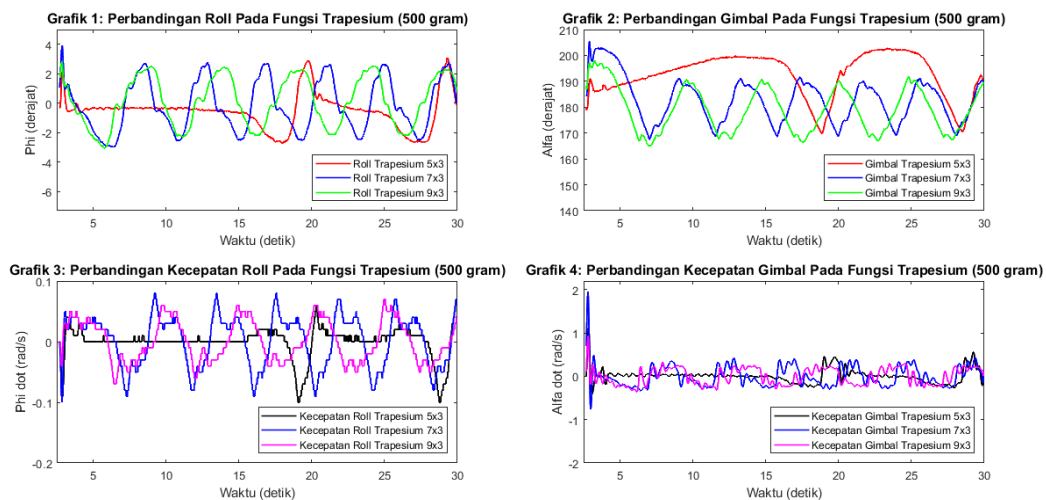
Penambahan masa pada prototipe dilakukan untuk mengetahui ketahanan prototipe dalam mempertahankan posisi agar tetap seimbang. Penambahan massa diletakkan pada bagian atas bodi sisi kiri. Dengan penambahan massa ini akan merubah energi kinetik pada prototipe terutama pada bodi, dengan demikian massa momen inersia bodi akan berubah dan *center of gravity* dari bodi tersebut akan bergeser.



Gambar 4.22 Hasil Perbandingan Membership Pada Fungsi Segitiga (500 gram)

Gambar 4.22 merupakan perbandingan hasil pengujian dengan penambahan massa 500 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga dengan pembacaan nilai roll, gimbai, kecepatan roll, dan kecepatan gimbai. Respon yang ditunjukkan oleh prototipe memiliki suatu kecenderungan dalam mempertahankan di posisi tegak.

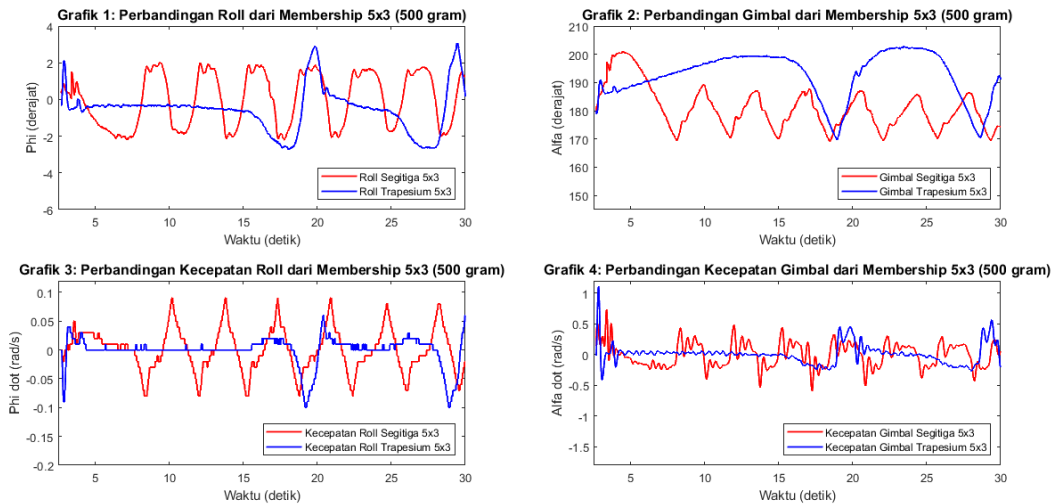
Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 5x3 yaitu pada detik 9.3 dengan kemiringan sudut 2 derajat kekanan dan pada detik 17.8 dengan kemiringan sudut -2.13 derajat kekiri. Nilai roll terbesar untuk segitiga 7x3 yaitu pada detik 17.4 dengan kemiringan sudut 1.06 derajat kekanan dan pada detik 15.6 dengan kemiringan sudut -1.56 derajat kekiri, lebih cenderung stabil dan memiliki 6 kali osilasi. Sedangkan Nilai roll terbesar untuk segitiga 9x3 yaitu pada detik 8.4 dengan kemiringan sudut 1.37 derajat kekanan dan pada detik 5.2 dengan kemiringan sudut -1.63 derajat kekiri, namun cenderung stabil serta menghasilkan 3 kali osilasi. Nilai grafik roll menunjukkan bahwa fungsi segitiga 9x3 lebih baik daripada lainnya karena memiliki osilasi yang lebih sedikit. Dari pengujian fungsi segitiga dapat disimpulkan bahwa prototipe dapat seimbang dengan penambahan massa 500 gram walaupun nilai grafik menunjukkan tidak dapat stabil.



Gambar 4.23 Hasil Perbandingan Membership Pada Fungsi Trapesium (500 gram)

Gambar 4.23 merupakan perbandingan hasil pengujian dengan penambahan massa 500 gram selama 30 detik pada fungsi trapesium dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Respon yang ditunjukkan oleh prototipe memiliki suatu kecenderungan dalam mempertahankan di posisi tegak. Didapatkan nilai roll terbesar untuk trapesium 5x3 yaitu pada detik 29.3 dengan kemiringan sudut 3.06 derajat kekanan dan pada detik 18.1 dengan kemiringan sudut -2.69 derajat kekiri, namun nilai gimbal menunjukkan prototipe

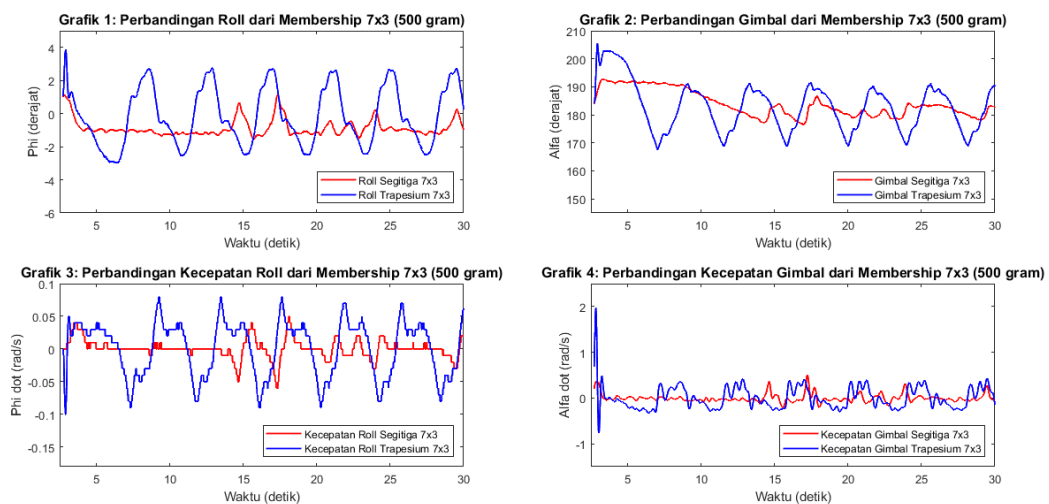
akan jatuh karena berputar lebih jauh hampir menuju posisi sudut maksimal nya. Nilai roll terbesar untuk trapesium 7x3 yaitu pada detik 2.9 dengan kemiringan sudut 3.75 derajat kekanan dan pada detik 6.5 dengan kemiringan sudut -2.94 derajat ke kiri. Sedangkan Nilai roll terbesar untuk trapesium 9x3 yaitu pada detik 24.5 dengan kemiringan sudut 2.5 derajat kekanan dan pada detik 5.5 dengan kemiringan sudut -2.88 derajat ke kiri. Nilai grafik roll menunjukkan bahwa fungsi trapesium 9x3 lebih baik daripada lainnya karena memiliki osilasi yang lebih kecil dan dapat menjaga gimbal di sekitar titik pusatnya. Dari pengujian fungsi trapesium dapat disimpulkan bahwa prototipe dapat seimbang dengan penambahan massa 500 gram walaupun nilai grafik menunjukkan tidak dapat stabil.



Gambar 4.24 Hasil Perbandingan Membership 5x3 dengan Beban 500 gram

Gambar 4.24 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 500 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 5x3 dan fungsi trapesium 5x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 5x3 yaitu pada detik 9.3 dengan kemiringan sudut 2 derajat kekanan dan pada detik 17.8 dengan kemiringan sudut -2.13 derajat ke kiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 5x3 yaitu pada detik 29.3 dengan kemiringan sudut 3.06 derajat kekanan dan pada detik 18.1 dengan kemiringan sudut -2.69 derajat ke kiri, namun nilai gimbal menunjukkan prototipe akan jatuh karena berputar lebih jauh hampir menuju posisi sudut maksimal nya. Pada

penelitian ini dikatakan lebih baik karena hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil dan pada sudut gimbale masih dalam range sekitar 180 derajat yang menunjukkan lebih kuat dalam mempertahankan keseimbangan. Artinya fungsi segitiga 9x3 lebih baik dalam menyeimbangkan prototipe dengan beban 500 gram daripada fungsi trapesium 9x3.

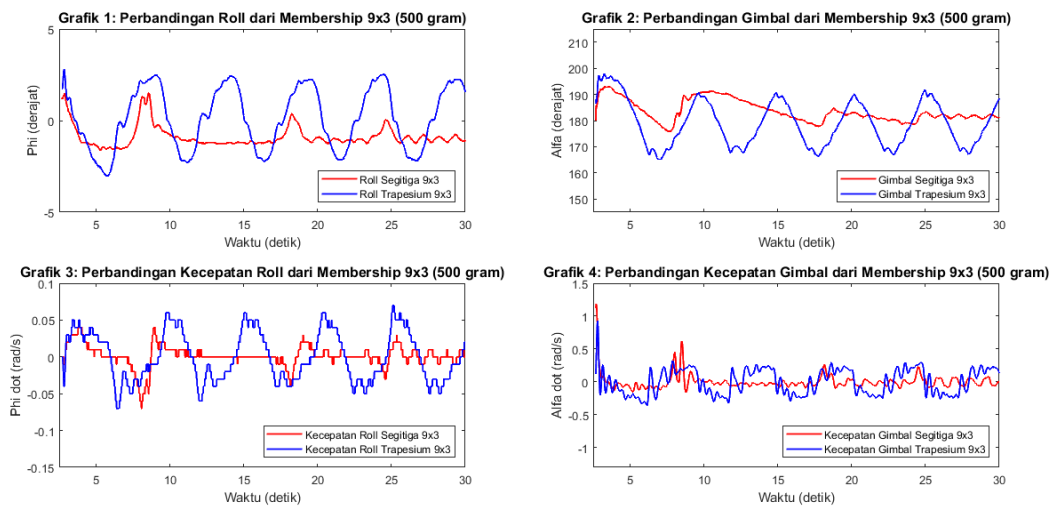


Gambar 4.25 Hasil Perbandingan Membership 7x3 dengan Beban 500 gram

Gambar 4.25 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 500 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 7x3 dan fungsi trapesium 7x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 7x3 yaitu pada detik 17.4 dengan kemiringan sudut 1.06 derajat kekanan dan pada detik 15.6 dengan kemiringan sudut -1.56 derajat ke kiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 7x3 yaitu pada detik 2.9 dengan kemiringan sudut 3.75 derajat kekanan dan pada detik 6.5 dengan kemiringan sudut -2.94 derajat ke kiri. Pada penelitian ini dikatakan lebih baik karena hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil, artinya fungsi segitiga 7x3 lebih smooth dalam menyeimbangkan prototipe dengan beban 500 gram daripada fungsi trapesium 7x3.

Gambar 4.26 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 500 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 9x3 dan fungsi trapesium 9x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan

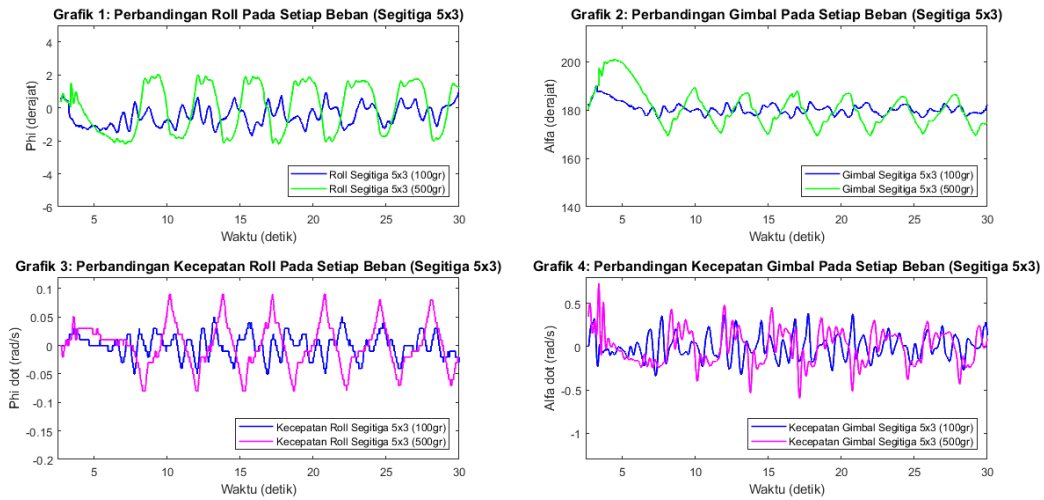
nilai roll terbesar untuk segitiga 9x3 yaitu pada detik 8.4 dengan kemiringan sudut 1.37 derajat kekanan dan pada detik 5.2 dengan kemiringan sudut -1.63 derajat kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 9x3 yaitu pada detik 24.5 dengan kemiringan sudut 2.5 derajat kekanan dan pada detik 5.5 dengan kemiringan sudut -2.88 derajat kekiri. Pada penelitian ini dikatakan lebih baik karena hasil grafik yang memiliki range osilasi lebih kecil, artinya fungsi segitiga 9x3 lebih smooth dalam menyeimbangkan prototipe dengan beban 500 gram daripada fungsi trapesium 9x3.



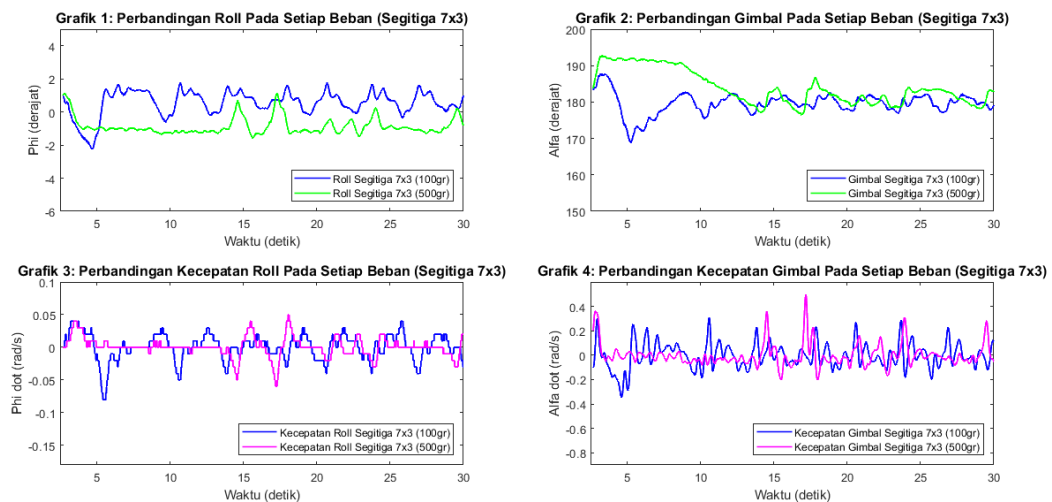
Gambar 4.26 Hasil Perbandingan Membership 9x3 dengan Beban 500 gram

4.4.4 Perbandingan Pengujian Penambahan Massa

Gambar 4.27 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram dan 500 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 5x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 5x3 100 gram yaitu pada detik 20.8 dengan kemiringan sudut 0.88 kekanan dan pada detik 15.7 dengan kemiringan sudut -1.69 kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk segitiga 5x3 500 gram yaitu pada detik 9.3 dengan kemiringan sudut 2 derajat kekanan dan pada detik 17.8 dengan kemiringan sudut -2.13 derajat kekiri. Pada pengujian ini menunjukkan fungsi segitiga 5x3 100 gram lebih smooth dalam menyeimbangkan prototipe daripada fungsi segitiga 5x3 500 gram.



Gambar 4.27 Hasil Perbandingan Membership Segitiga 5x3 dengan Massa

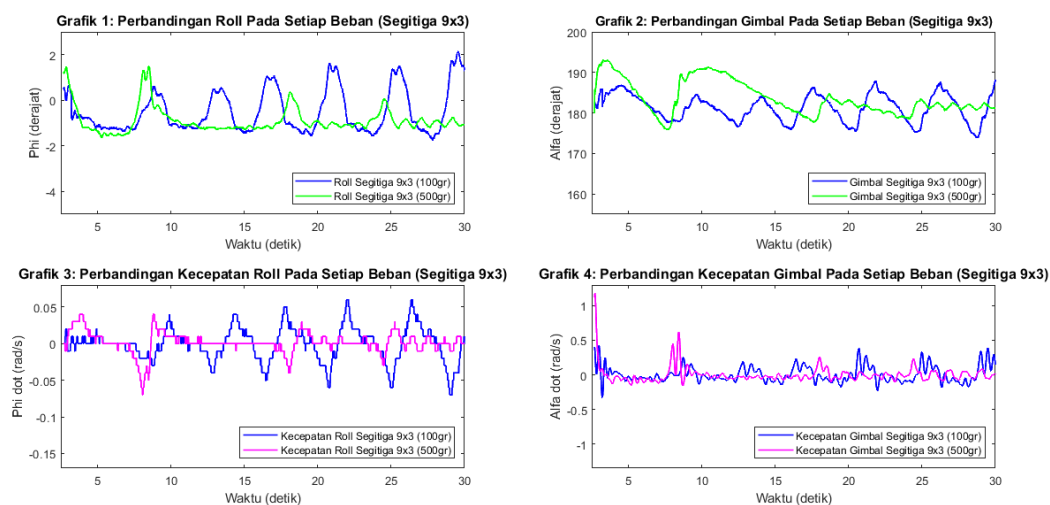


Gambar 4.28 Hasil Perbandingan Membership Segitiga 7x3 dengan Massa

Gambar 4.28 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram dan 500 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 7x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 7x3 100 gram yaitu pada detik 10.6 dengan kemiringan sudut 1.75 kekanan dan pada detik 4.6 dengan kemiringan sudut -2.25 kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk segitiga 7x3 500 gram yaitu pada detik 17.4 dengan kemiringan sudut 1.06 derajat kekanan dan pada detik 15.6 dengan kemiringan sudut -1.56 derajat kekiri. Pada pengujian ini menunjukkan fungsi segitiga 7x3 100 gram lebih mampu mempertahankan keseimbangan daripada

fungsi segitiga 7x3 500 gram. Dibuktikan pada grafik gimbai yang berputar lebih jauh dan lambat untuk kembali ke posisi pusat gimbalnya.

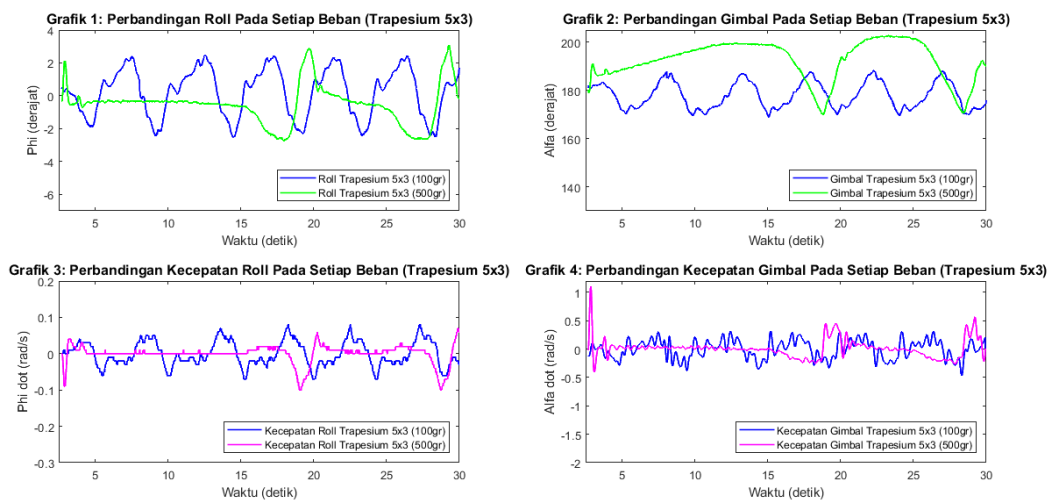
Gambar 4.29 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram dan 500 gram selama 30 detik pada fungsi segitiga 9x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbai, kecepatan roll, dan kecepatan gimbai. Didapatkan nilai roll terbesar untuk segitiga 9x3 100 gram yaitu pada detik 29.4 dengan kemiringan sudut 2.06 kekanan dan pada detik 27.7 dengan kemiringan sudut -1.75 kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk segitiga 9x3 500 gram yaitu pada detik 8.4 dengan kemiringan sudut 1.37 derajat kekanan dan pada detik 5.2 dengan kemiringan sudut -1.63 derajat kekiri. Pada pengujian ini menunjukkan fungsi segitiga 9x3 100 gram menghasilkan osilasi roll lebih besar tetapi lebih kuat dalam mempertahankan keseimbangan daripada fungsi segitiga 9x3 500 gram. Dibuktikan pada grafik gimbai yang berputar lebih jauh dan lambat untuk kembali ke posisi pusat gimbalnya.



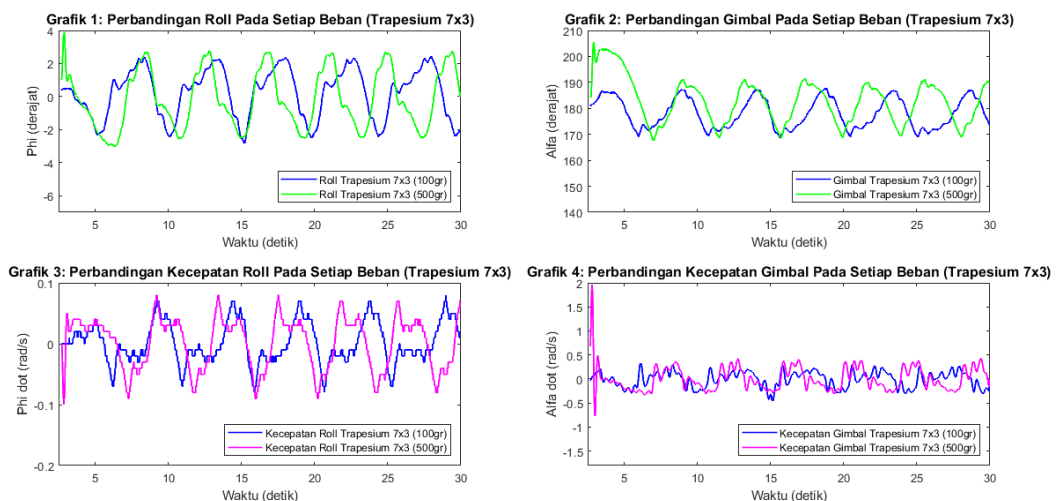
Gambar 4.29 Hasil Perbandingan Membership Segitiga 9x3 dengan Massa

Gambar 4.30 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram dan 500 gram selama 30 detik pada fungsi trapesium 5x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbai, kecepatan roll, dan kecepatan gimbai. Didapatkan nilai roll terbesar untuk trapesium 5x3 100 gram yaitu pada detik 17.3 dengan kemiringan sudut 2.38 kekanan dan pada detik 28.6 dengan kemiringan sudut -2.5 kekiri.

Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 5x3 500 gram yaitu pada detik 29.3 dengan kemiringan sudut 3.06 derajat kekanan dan pada detik 18.1 dengan kemiringan sudut -2.69 derajat kekiri. Pada pengujian ini menunjukkan fungsi segitiga 9x3 100 gram memiliki osilasi roll yang kecil dan lebih mampu mempertahankan keseimbangan daripada fungsi segitiga 9x3 500 gram. Dibuktikan pada grafik gimbal yang berputar lebih jauh dan lambat untuk kembali ke posisi pusat gimbalnya. Pada penambahan massa 500 gram memiliki osilasi yang sedikit namun range nya lebih besar.

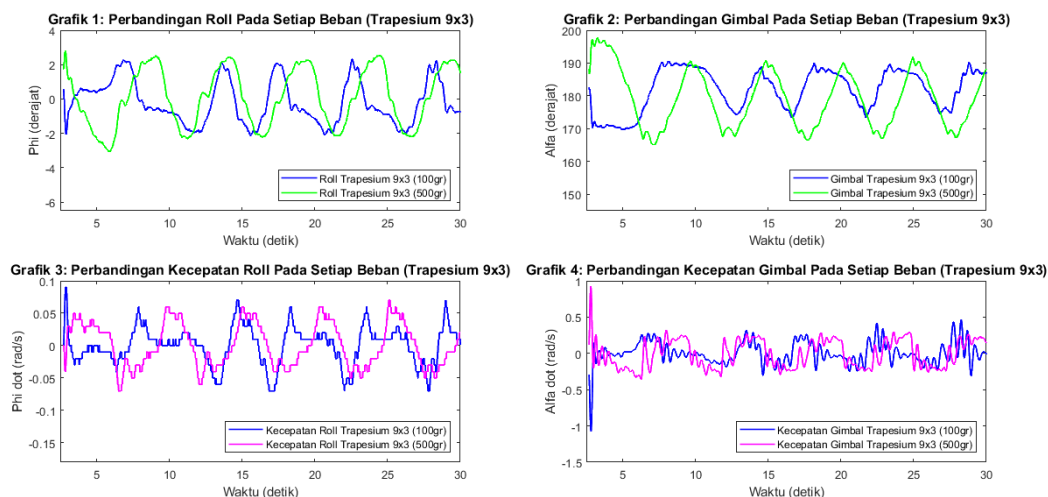


Gambar 4.30 Hasil Perbandingan Membership Trapezium 5x3 dengan Massa



Gambar 4.31 Hasil Perbandingan Membership Trapezium 7x3 dengan Massa

Gambar 4.31 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram dan 500 gram selama 30 detik pada fungsi trapesium 7x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan nilai roll terbesar untuk trapesium 7x3 100 gram yaitu pada detik 8.4 dengan kemiringan sudut 2.38 kekanan dan pada detik 15.3 dengan kemiringan sudut -2.81 kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 7x3 500 gram yaitu pada detik 2.9 dengan kemiringan sudut 3.75 derajat kekanan dan pada detik 6.5 dengan kemiringan sudut -2.94 derajat kekiri. Pada pengujian ini menunjukkan fungsi segitiga 7x3 100 gram memiliki osilasi roll yang lebih kecil dan lebih mampu mempertahankan keseimbangan daripada fungsi segitiga 7x3 500 gram. Dibuktikan pada grafik gimbal yang berputar lebih jauh dan lambat untuk kembali ke posisi pusat gimbalnya.



Gambar 4.32 Hasil Perbandingan Membership Trapesium 9x3 dengan Massa

Gambar 4.32 merupakan hasil pengujian dengan penambahan massa 100 gram dan 500 gram selama 30 detik pada fungsi trapesium 9x3 dengan pembacaan nilai roll, gimbal, kecepatan roll, dan kecepatan gimbal. Didapatkan nilai roll terbesar untuk trapesium 9x3 100 gram yaitu pada detik 22.5 dengan kemiringan sudut 2.31 kekanan dan pada detik 20.5 dengan kemiringan sudut -2.13 kekiri. Sedangkan nilai roll terbesar untuk trapesium 9x3 500 gram yaitu pada detik 24.5 dengan kemiringan sudut 2.5 derajat kekanan dan pada detik 5.5 dengan kemiringan sudut -2.88 derajat kekiri. Pada pengujian ini menunjukkan fungsi segitiga 9x3 100

gram memiliki osilasi roll lebih kecil dan lebih mampu mempertahankan keseimbangan daripada fungsi segitiga 9x3 500 gram. Dibuktikan pada grafik gimbal yang berputar lebih jauh dan lambat untuk kembali ke posisi pusat gimbalnya.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian sistem giroskopik pada keseimbangan kendaraan roda dua menggunakan *fuzzy logic control* adalah sebagai berikut:

1. Sistem giroskopik kendaraan roda dua ini menggunakan sensor BNO055 untuk membaca kemiringan prototipe. Terdapat 2 *flywheel* di masing-masing gimbal yang dipasang secara vertikal dengan aktuator motor *brushless* DC (BLDC). Sistem giroskopik pada kendaraan ini menggunakan sistem transmisi gear untuk memutar kedua gimbal secara bersamaan ke arah yang berlawanan. Gimbal digerakkan oleh motor servo yang ditempatkan dibawah posisi gimbal.
2. Dengan adanya *fuzzy logic control* pada sistem giroskopik kendaraan roda dua membuat prototipe dapat seimbang walaupun tidak stabil. Dari pengujian 6 model *fuzzy* menunjukkan bahwa hasil terbaik didapatkan pada fuzzy fungsi segitiga 9x3. Kriteria terbaik dalam penelitian ini dibuktikan oleh respon yang memiliki osilasi paling kecil dan kemampuan dalam mempertahankan diposisi tegak. Pada sistem ini, fungsi segitiga memberikan hasil respon lebih baik daripada fungsi trapesium. Semakin banyak jumlah membership maka semakin besar peluang dalam memvariasikan nilai input ke prototipe sesuai kebutuhan sistem.

5.2 Saran

Saran dari penelitian sistem giroskopik pada keseimbangan kendaraan roda dua adalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian selanjutnya sebaiknya tidak hanya mengontrol pergerakan gimbal nya saja, tetapi juga mengontrol kecepatan putar dari kedua motor *flywheel* yang digunakan sehingga prototipe lebih hemat energi dan lebih stabil di posisi tegak.
2. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mencoba menggunakan metode lain bertujuan untuk meningkatkan performa prototipe.

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ksamawati, Wayan E.P. (2017), *Rancang Bangun Mekanisme Stabilisasi Double-Gyroscope Pada Kendaraan Roda Dua*, Tugas Akhir Program Sarjana Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [2] Mahendra, Civic Duta. (2017), *Penerapan Sistem Penyeimbang Otomatis Pada Mini Segway Roda Dua*, Tugas Akhir Program Sarjana Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [3] Galicki, M. (2016), “Robust task space trajectory tracking control of robotic manipulators”, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 21, No. 3, hal. 547-568.
- [4] Kharola A., Patil P., Raiwani S. and Rajput D. (2016), “A comparison study for control and stabilisation of inverted pendulum on inclined surface using PID and fuzzy controllers”, *Perspectives in Science*, Vol.8, hal. 187-190.
- [5] Chynoradský L. and Božek P. (2016), “Research and development of a new system of the autonomous control of robot trajectory”, *Acta Mechatronica*, Vol., hal. 25-28.
- [6] Tian, J., Jie Ding, Yongpeng Tai, and Zheshu Ma. (2020), “Control of Different-Axis Two-Wheeled Self-Balancing Vehicles”, *IEEE Access*, Vol. 8, hal. 158839 - 158851.
- [7] Liu, Y. X. Huang, T. Wang, Y. Zhang, and X. Li. (2016), “Nonlinear dynamics modeling and simulation of two-wheeled self-balancing vehicle”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 13, No. 6, hal. 1-9.
- [8] Hidayati, Alfiana N. (2021), *Pemodelan dan Pengendalian pada Sistem Inertia Wheel Pendulum*, Tesis Program Pascasarjana Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [9] Chhron, Buntheng. (2020), *Modeling and control of anti-rolling gyro system to stabilize single-track vehicle*, Tesis Program Pascasarjana Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

- [10] Chi, C. and Chou, J. (2015), "Riderless Bicycle with Gyroscopic Balancer Controlled by FSMC and AFSMC", *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, hal. 150-157.
- [11] Gogoi, P., Manish Nath, Bumi Trueman Doley, Abhijit Boruah, and Hirok Jan Barman. (2017), "Design and Fabrication of Self Balancing Two Wheeler Vehicle Using Gyroscope", *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol. 9, No. 3, hal. 2051- 2058.
- [12] Hanachi M., Mohammad J. Mahjoob, and Mohamad Ali Tofigh. (2019), "A novel gyroscopic stabilizer for a controlled unmanned bicycle", *International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM 2019)*, hal. 357-361.
- [13] Wang, Huabin, Pengfei LI, Yingying Shu, and Dongshuai Kang. (2017), "Double Closed Loop Control for BLDC Based on Whole Fuzzy Controllers", *International Conference on Computational Intelligence and Applications*, hal. 487-491.
- [14] Shyamsundar, P.L., P.L. Rishi, and P.L. Jamuna. (2019), "LQR based Fuzzy Logic Rudder Control System using DC Servo Motor", *International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*, hal. 124-127.
- [15] Veni, K.S.Krishna, Dr.N.Senthil Kumar, and J.Gnanavadivel. (2017), "Low Cost Fuzzy Logic Based Speed Control of BLDC Motor Drives", *International Conference On Advances In Electrical Technology For Green Energy 2017*, hal. 7-12.
- [16] Rohan, Ali., Dkk. (2019), "Design of Fuzzy Logic Based Controller for Gyroscopic Inverted Pendulum System", *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*, Vol. 18, No. 1, hal. 58-64.
- [17] Yetkin, H., (2014), "Gyroscopic stabilization of an unmanned bicycle", *American Control conference*", IEEE.
- [18] Naufan, I. (2019), *Analisis Pengaruh Nilai Pembobotan Pada Sistem Kendali Lqr Dan Pengaruh Kecepatan Angular Flywheel Pada Kendaraan Gyro-Stabilized*, Tugas Akhir Program Sarjana Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

- [19] Sampurna, Edwin, R. (2018), *Desain Sistem Kendali Gyroscopic Inverted Pendulum dengan Dua Flywheel*, M.Phil. Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- [20] Jatmiko, Sigit., Dkk. (2017), “Inverted Pendulum Pada *Prototipe* Mobil Dengan Metode Kendali Proporsional Intregatif Derivatif”, *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer (J-PTIIK)*, Vol. 1, No. 1, hal. 41-47.
- [21] Warmansyah, J. dan Dida H. (2019), “Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Untuk Prediksi Persediaan Bahan Baku”, *Jurnal Ilmiah Teknologi Informasi dan Sains Sekolah Tinggi Ilmu Komputer Binaniaga (TEKNOIS)*, Vol. 9, No. 2, hal. 12-20.
- [22] Parlina, Soraya. (2016), *Kontrol Kecepatan Pada Robot Pendulum Terbalik Beroda Dua Menggunakan Kontroler Fuzzy*, Tugas Akhir Program Sarjana Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

(Halaman sengaja dikosongkan)

LAMPIRAN

Program arduino menggunakan fuzzy logic control fungsi segitiga 9x3:

```
#include <SPI.h>

#include <Wire.h>

#include <Adafruit_Sensor.h>

#include <Adafruit_BNO055.h>

#include <utility/imumaths.h>

#include <DynamixelShield.h>

#include <SoftwareSerial.h>

#include <SimpleFOC.h>

Encoder encoder = Encoder(18, 19, 2000, 5);

// interrupt routine initialization

void doA(){encoder.handleA();}

void doB(){encoder.handleB();}

SoftwareSerial soft_Serial(7, 8); // Dynamixel Shield UART RX/TX

#define DEBUG_Serial soft_Serial

const uint8_t DXL_ID = 1;

const float DXL_PROTOCOL_VERSION = 2.0;

DynamixelShield dxl;

using namespace ControlTableItem;

float PosisiTuju = 180;

float PosisiAwal = 180;

uint16_t BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS = 1;

Adafruit_BNO055 Gyro = Adafruit_BNO055(55, 0x28);

double PitchManipulation, newPitch, finalPitch, pitchTreshold = 0.20;
```

```
boolean calibration = true;

double Fuzzy, setPoint, SetpointAccum;

double outputSum, lastInput;

double outMax = 35, outMin = -35;

unsigned long sampleTime, lastTime;

float Pitch, vel, encod_velF, encod_vel, encod_rawF, encod_raw, imu_velF,
imu_vel, imu_rawF, imu_raw;

float xerror;

float xDerror;

float awal;

float puncak;

float akhir;

float awal1;

float puncak1;

float akhir1;

float yerror;

float yDerror;

const int barisDerror = 3;

const int kolomDerror = 3;

const int bariserror = 9;

const int kolomerror = 3;

const int baris_rulebaseppns = 27;

const int kolom_rulebaseppns = 3;
```

```

float datasegitigaDerror [barisDerror] [kolomDerror]={-2,-0.3,0,
                                                    -0.3,0,0.3,
                                                    0,0.3,2};
float datasegitigaerror [bariserror] [kolomerror]={-25,-9,-5,
                                                    -9,-5,-3,
                                                    -5,-3,-1,
                                                    -3,-1,0,
                                                    -1,0,1,
                                                    0,1,3,
                                                    1,3,5,
                                                    3,5,9,
                                                    5,9,25};

float sensor_Derror[barisDerror][2];
float sensor_error[bariserror][2];
//float PWMservo[1][9]={-3,-0.7,-0.4,-0.15,0,0.15,0.4,0.7,3};
float PWMservo[1][9]={-3,-1,-0.3,-0.15,0,0.15,0.3,1,3};
int rulebaseppns [baris_rulebaseppns][kolom_rulebaseppns]={ 1,1,2,
                                                                1,2,1,
                                                                1,3,1,
                                                                2,1,3,
                                                                2,2,2,
                                                                2,3,1,
                                                                3,1,4,
                                                                3,2,3,
                                                                3,3,2,
                                                                4,1,5,

```

4,2,4,
4,3,3,
5,1,4,
5,2,5,
5,3,6,
6,1,7,
6,2,6,
6,3,5,
7,1,8,
7,2,7,
7,3,6,
8,1,9,
8,2,8,
8,3,7,
9,1,9,
9,2,9,
9,3,8,};

```
float selamat[baris_rulebaseppns][1];  
float pembilangkiri[baris_rulebaseppns][1];  
//float pembilangkiri2[baris_rulebaseppns][1];  
float servo;  
//float motor;  
void setup() {  
  Serial.begin(57600);  
  if (!Gyro.begin()) {
```

```

setup(); }

// enable/disable quadrature mode
encoder.quadrature = Quadrature::OFF;

// check if you need internal pullups
encoder.pullup = Pullup::USE_EXTERN;

// initialize encoder hardware
encoder.init();

// hardware interrupt enable
encoder.enableInterrupts(doA, doB);

dxl.begin(1000000); // sesuaikan dengan baudrate Dynamixel
dxl.setPortProtocolVersion(DXL_PROTOCOL_VERSION);
dxl.ping(DXL_ID);
dxl.torqueOff(DXL_ID);
dxl.setOperatingMode(DXL_ID, OP_POSITION);
dxl.torqueOn(DXL_ID);
delay(2000);
dxl.setGoalPosition(DXL_ID, PosisiTuju, UNIT_DEGREE);}

void loop()
{ encoder.update();
sensors_event_t orientationData , angVelocityData;

  Gyro.getEvent(&orientationData, Adafruit_BNO055::VECTOR_EULER);

  Gyro.getEvent(&angVelocityData,
Adafruit_BNO055::VECTOR_GYROSCOPE);

printEvent(&orientationData);
printEvent(&angVelocityData);}

void printEvent(sensors_event_t* event) {

```

```

if (event->type == SENSOR_TYPE_ORIENTATION) {
    Pitch = event->orientation.y; }
else if (event->type == SENSOR_TYPE_GYROSCOPE) {
    vel = event->gyro.y; }

//uint8_t system, gyro, accel, mg = 0;
//Gyro.getCalibration(&system, &gyro, &accel, &mg);
finalPitch = Pitch; //-0.37
if (SetpointAccum < -1) SetpointAccum = -1; //-2
else if (SetpointAccum > 1) SetpointAccum = 1; //1
setPoint = SetpointAccum;
double output, input;
unsigned long now = millis();
unsigned long timeChange = (now - lastTime);
input = finalPitch;
double error = setPoint - input;
double dInput = (input - lastInput);
float jumlahpembilangkiri=0;
//float jumlahpembilangkiri2=0;
float jumlahselamat=0;
xerror = error;
xDError = dInput;
//error.....
for (int jj=0; jj<=bariserror-1; jj=jj+1)
{ awal=datasegitigaerror[jj][0];
puncak=datasegitigaerror[jj][1];

```

```

akhir=datasegitigaerror[jj][2];
if(xerror >= -25 && xerror<= awal){
yerror=0;
if(jj==0){yerror=1;} }
else if(xerror > awal && xerror <= puncak){
yerror= (xerror-awal)/(puncak-awal);
if(jj==0){yerror=1;} }
else if(xerror > puncak && xerror <= akhir){
yerror= (akhir-xerror)/(akhir-puncak);
if(jj==bariserror-1){yerror=1;} }
else if(xerror > akhir && xerror <= 25){
yerror=0;
if(jj==bariserror-1){yerror=1;} }
sensor_error[jj][0]=jj+1;
sensor_error[jj][1]=yerror; }
//sensor Derror.....
for (int jx=0; jx<=barisDerror-1; jx=jx+1)
{ awal1=datasegitigaDerror[jx][0];
puncak1=datasegitigaDerror[jx][1];
akhir1=datasegitigaDerror[jx][2];
if(xDerror >= -2 && xDerror <= awal1){
yDerror=0;
if(jx==0){yDerror=1;} }
else if(xDerror > awal1 && xDerror <= puncak1){
yDerror= (xerror-awal1)/(puncak1-awal1);

```

```

if(jx==0){yDerror=1;}  }
else if(xDerror > puncak1 && xDerror <= akhir1){
yDerror= (akhir1-xerror)/(akhir1-puncak1);
if(jx==barisDerror-1){yDerror=1;}  }
else if(xDerror > akhir1 && xDerror <= 2){
yDerror=0;
if(jx==barisDerror-1){yDerror=1;}  }
sensor_Derror[jx][0]=jx+1;
sensor_Derror[jx][1]=yDerror;
// delay(100);  }
for(int jk=0 ; jk<=baris_rulebaseppns-1 ; jk=jk+1){
selamat[jk][0] = min(sensor_error[rulebaseppns[jk][0]-
1][1],sensor_Derror[rulebaseppns[jk][1]-1][1]);//penyebut
pembilangkiri[jk][0]=PWMservo[0][rulebaseppns[jk][2]-1]*selamat[jk][0];
jumlahpembilangkiri=jumlahpembilangkiri+pembilangkiri[jk][0]; //total
pembilang
jumlahpembilangkiri2=jumlahpembilangkiri2+pembilangkiri2[jk][0]; //total
pembilang
jumlahselamat=jumlahselamat+selamat[jk][0];//total penyebut  }
outputSum +=(jumlahpembilangkiri/jumlahselamat);
if (outputSum > 35) outputSum = 35;
else if (outputSum < -35) outputSum = -35;
Fuzzy = outputSum;
lastInput = input;
lastTime = now;
double random = (0,2);
imu_raw = vel;

```



```

imu_vel = 0.969*imu_velF + 0.0155*imu_raw + 0.0155*imu_rawF;
encod_raw = encoder.getVelocity();
encod_vel = 0.969*encod_velF + 0.0155*encod_raw + 0.0155*encod_rawF;
Serial.print(random);
Serial.print(",");
Serial.print(now);
Serial.print(",");
Serial.print(finalPitch);
Serial.print(",");
Serial.print(PosisiTuju);
Serial.print(",");
Serial.print(imu_vel);
Serial.print(",");
Serial.print(encod_vel);
Serial.print(",");
Serial.println(dInput);
PosisiTuju = PosisiAwal - Fuzzy;
dxl.setGoalPosition(DXL_ID, PosisiTuju, UNIT_DEGREE);
imu_velF = imu_vel;
imu_rawF = imu_raw;
encod_velF = encod_vel;
encod_rawF = encod_raw;}

```

(Halaman sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Sidoarjo, pada tanggal 13 April 1997, anak ketiga dari Bapak Ikhsan dan Ibu Solikhatin. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di MI Babussalam Barengkrajan pada tahun 2009, kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 2 Krian dan lulus pada tahun 2012, kemudian pada tahun 2015 penulis menyelesaikan pendidikan sekolah menengah atas di SMAN 1 Krian. Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Diploma 4 di Jurusan Teknik Otomasi di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) dan lulus pada tahun 2019. Kemudian penulis memutuskan untuk melanjutkan pendidikan pada jenjang Strata dua (S2) di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Pada jenjang magister ini penulis bergabung di Laboratorium Rekayasa Sistem dan Kontrol.

Dengan diterbitkannya buku Tesis ini, penulis berharap dapat memberikan sumbangsih ilmu pengetahuan melalui media penelitian yang telah dilakukan. Info lebih lanjut terkait penelitian ini dapat menghubungi penulis melalui email: azzarkhiyakhafid@gmail.com.