



TESIS – TM185400

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE *SELF-BALANCING* DENGAN KONTROL MOMEN GIROSKOP MENGGUNAKAN SISTEM KENDALI PID**

**NUR CANDRA DANA AGUSTI**

**6007201001**

**Dosen Pembimbing:**

**Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc**

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





**TESIS – TM185400**

**RANCANG BANGUN PROTOTIPE *SELF-BALANCING* DENGAN KONTROL MOMEN GIROSKOP MENGGUNAKAN SISTEM KENDALI PID**

**NUR CANDRA DANA AGUSTI**

**6007201001**

**Dosen Pembimbing:**

**Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc**

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





**TESIS – TM185400**

**DESIGN AND CONTRUCTION OF SELF-BALANCING PROTOTYPE WITH CONTROL MOMENT GYROSCOPE USING PID CONTROL**

**NUR CANDRA DANA AGUSTI**

**6007201001**

**Supervisor:**

**Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc**

**Mechanical Engineering Department  
Faculty of Industrial and System 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:

**NUR CANDRA DANA AGUSTI**

**NRP: 6007201001**

Tanggal Ujian: 18 Juli 2022

Periode Wisuda: September 2022

Disetujui oleh:

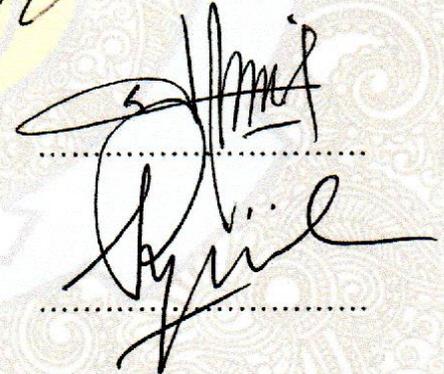
**Pembimbing:**

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

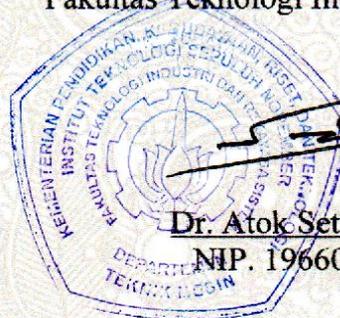


**Penguji:**

- 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



# **RANCANG BANGUN PROTOTIPE *SELF-BALANCING* DENGAN KONTROL MOMEN GIROSKOP MENGGUNAKAN SISTEM KENDALI PID**

Nama Mahasiswa : Nur Candra Dana Agusti  
NRP : 6007201001  
Pembimbing : Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc

## **ABSTRAK**

Perkembangan sepeda roda dua pada sektor robotika dan sistem kontrol mulai terlihat, dimana beberapa penelitian dan pengembangan telah dilakukan tentang kendaraan roda dua menggunakan teknologi *self-balancing*. Permasalahan yang terdapat pada kendaraan roda dua adalah kendaraan roda dua merupakan sistem yang tidak stabil, terutama pada saat berhenti kendaraan roda dua harus membutuhkan penompang agar tidak rubuh. Salah satu sistem yang digunakan pada teknologi *self-balancing* ini menggunakan *control moment gyro* (CMG) yang memiliki prinsip mengontrol perputaran momen giroskop untuk mendapatkan keseimbangan pada kendaraan.

Pada prinsipnya, *control moment gyro* merupakan alat yang digunakan untuk memberikan gaya aktuasi yang digunakan untuk menstabilkan. Selama *Flywheel* berputar konstan akan memberikan torsi presisi saat gimbal diputar. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mendesain sistem kendali dengan kontrol momen giroskop yang akan digunakan untuk menyeimbangkan kendaraan roda dua dengan sistem kendali PID.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah nilai parameter PID pada prototipe  $K_p = 3$ ,  $K_i = 0.01$ ,  $K_d = 100$ , merupakan nilai yang paling optimal selama melakukan eksperimen untuk sistem prototipe *self-balancing*. Pendekatan menggunakan sistem identifikasi dilakukan untuk merepresentasikan sistem dan mendapatkan model sistem.

**Kata Kunci** : *Control Moment Gyroscope, PID, Self-Balancing*

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

# ***DESIGN AND CONTRUCTION OF SELF-BALANCING PROTOTYPE WITH CONTROL MOMENT GYROSCOPE USING PID CONTROL***

*By* : Nur Candra Dana Agusti  
*Student Identify Number* : 6007201001  
*Advisor* : Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.Sc

## ***ABSTRACT***

*The development of two-wheeled bicycle in the robotics and control system sector is starting to be study, where several research and developments have been carried out on two-wheeled vehicle using self-balancing technology to get the perfect stabilizer. The problem that exists in two-wheeled vehicles is the lack of vehicle stability when getting a sudden force disturbance, especially when stopping the two-wheeled vehicle must require a crutch so that it doesn't collapse. With these problem, it is expected to reduce the number of accidents on two-wheeled vehicle. One of the system used in this self-balancing technology uses a control moment gyroscope (CMG) which has the principle of controlling the rotation of the gyroscope to get the desired vehicle balance.*

*In principle, the control moment gyroscope is a stability system that has one component of the flywheel that rotates at a constant speed to produce torque that rotates on the gimbal axis. The purpose of this study is to design a two-wheeled vehicle control system with control moment gyroscope that will be used to balancing two wheeled vehicle with control system PID.*

*The result obtained from this study are PID parameter value of prototype  $K_p=3$ ,  $K_i=0.01$ , and  $K_d=100$  that most optimal values for the balancing prototype system based on experiment. The approach of using an identification system is carried out to represent the system and obtain a system model.*

*Keyword* : Control Moment Gyroscope, PID, Self-Balancing

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Rancang Bangun Prototipe Self-Balancing Dengan Kontrol Momen Giroskop Menggunakan Sistem Kendali PID**”. 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, Sugiono dan Nur Syarifah Budianti serta kakak saya Ahmadu Malik Dana Logistia yang selalu memberikan semangat serta doa yang selalu dipanjatkan demi kesehatan, keselamatan dan kelancaran penulis selama menempuh studi Magister di Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS Surabaya.
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 Laboratorium Rekayasa Sistem Kontrol (RSK) khususnya Khafid, Bayu, Rizal dan Billy yang telah menemani dan membantu dalam menyelesaikan Tesis ini selama di laboratorium.

6. Seluruh rekan - rekan Magister Teknik Mesin ITS Surabaya angkatan 2020 yang selalu menjadi garda terdepan dalam memberikan inspirasi dan aspirasi kepada penulis selama pembuatan Tesis ini.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam proses 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, 26 Juli 2022

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>ix</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR SIMBOL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Bab 1.....</b>	<b>1</b>
<b>PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Permasalahan.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
<b>Bab 2.....</b>	<b>5</b>
<b>KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Girooskop .....	10
2.3 Control Moment Gyroscope (CMG) .....	10
2.4 Persamaan Lagrange.....	12
2.5 Komponen Elektronika.....	12
2.5.1 Sensor .....	12
2.5.2 Arduino .....	13
2.5.3 Electronic Speed Control (ESC) .....	13
2.5.4 Motor Brushless DC.....	14
2.5.5 Servo .....	14
2.6 Sistem Kontrol PID .....	15
2.6.1 Aksi Kontrol Proporsional .....	16
2.6.2 Aksi Kontrol Integral .....	16

2.6.3	Aksi Kontrol Derivatif.....	17
<b>Bab 3</b>	.....	<b>21</b>
<b>METODOLOGI</b>	.....	<b>21</b>
3.1.	Diagram Alir Penelitian .....	21
3.2.	Diagram Alir Pembuatan Prototipe.....	23
3.3.	Perancangan Sistem Kontrol PID .....	24
3.4.	Model Self-Balancing Kendaraan Roda Dua.....	25
3.5.	Persamaan Gerak Sistem .....	26
3.6.	<i>Wiring</i> Komponen Elektronik.....	34
<b>Bab 4</b>	.....	<b>37</b>
<b>HASIL PENELITIAN</b>	.....	<b>37</b>
4.1	Prototipe <i>Self-Balancing</i> .....	37
4.2	Desain Sistem Kendali PID .....	43
4.3	Identifikasi Sistem Prototipe.....	50
4.4	Penambahan Masa Pada Prototipe .....	55
<b>Bab 5</b>	.....	<b>59</b>
<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b>	.....	<b>59</b>
5.1	Kesimpulan .....	59
5.2	Saran .....	59
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	.....	<b>61</b>
<b>LAMPIRAN</b>	.....	<b>63</b>
<b>BIODATA PENULIS</b>	.....	<b>67</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Free Body Diagram sepeda Yetkin Harun (H. Yetkin, 2015).....	5
Gambar 2.2 Grafik hasil eksperimen Yetkin Harun (H. Yetkin, 2015).....	6
Gambar 2.3 Grafik perbandingan sistem kendali SMC dan PID dengan sudut kemiringan awal -16 derajat Yetkin Harun (H. Yetkin, 2015) .....	6
Gambar 2.4 Model dinamis sepeda roda dua Ngoc Kien Vu (Vu Ngoc Kien, 2020) .....	7
Gambar 2.5 Prototipe sepeda roda dua (a) Tanpa beban, (b) Dengan beban Ngoc Kien Vu (Vu Ngoc Kien, 2020) .....	7
Gambar 2.6 Grafik hasil pengujian (a) Tanpa beban, (b) Dengan beban, (c) Terhadap rintangan Ngoc Kien Vu (Vu Ngoc Kien, 2020) .....	8
Gambar 2.7 Free body diagram sepeda roda dua Buntheng (C. Buntheng, 2020) .	9
Gambar 2.8 Grafik Hasil pembacaan (a) sudut sepeda PID, (b) sudut sepeda LQR (C. Buntheng, 2020).....	9
Gambar 2.9 Control moment gyroscope .....	11
Gambar 2.10 Inersia measurement unit (IMU) BNO055.....	13
Gambar 2.11 Motor servo dynamixel XM540-W270-T/R .....	15
Gambar 2.12 Respon output pada kontroler Kp.....	16
Gambar 2.13 Respon output pada kontroler Ki .....	17
Gambar 2.14 Respon output pada kontroler Kd.....	18
Gambar 2.15 Kurva waktu hubungan input dan output konstanta derivative.....	18
Gambar 2.16 Blok diagram kontrol PID .....	19
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan prototipe.....	23
Gambar 3.3 Diagram alir perancangan sistem kontrol PID .....	24
Gambar 3.4 Blok diagram PID.....	24
Gambar 3.5 Konsep desain self-balancing kendaraan roda dua .....	25
Gambar 3.6 Free body diagram sepeda self-balancing tampak isometri .....	27
Gambar 3.7 Kendaraan self-balancing roda dua tampak samping.....	27
Gambar 3.8 Girokopik presisi .....	28

Gambar 3.9 Wiring komponen elektronika (1) arduino uno; (2) arduino mega....	35
Gambar 4.1 Prototipe Self-Balancing.....	37
Gambar 4.2 Uji paired sample T-test pada pembacaan servo di minitab .....	39
Gambar 4.3 Uji paired sample T-test pada pembacaan IMU di minitab.....	40
Gambar 4.4 Uji paired sample T-test pada pembacaan kecepatan IMU di minitab .....	41
Gambar 4.5 Uji paired sample T-test pada kecepatan encoder di minitab.....	42
Gambar 4.6 Blok diagram pengendalian sistem PID .....	43
Gambar 4.7 Grafik respon tuning Kp .....	45
Gambar 4.8 Grafik respon tuning Kp ,Ki .....	48
Gambar 4.9 Grafik respon tuning Kp ,Ki, Kd .....	50
Gambar 4.10 Blok diagram identifikasi berdasarkan estimasi parameter .....	51
Gambar 4.11 Tampilan system identification toolbox(SIT) matlab.....	52
Gambar 4.12 Grafik input dan output sebagai data yang diimpor .....	52
Gambar 4.13 Estimasi progres SIT dengan pole 5 dan zero 3 .....	53
Gambar 4.14 Hasil model matematis transfer function.....	53
Gambar 4.15 Transient respon sistem pada prototipe dengan pendekatan SIT.....	54
Gambar 4.16 Posisi pole dan zero .....	54
Gambar 4.17 Posisi penambahan massa pada body prototipe.....	55
Gambar 4.18 Grafik respon berdasarkan penambahan massa yang diberikan .....	55
Gambar 4.19 Grafik respon penambahan masa 300gram.....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Komponen Pada Prototipe .....	26
Tabel 4.1 Hasil pembacaan sudut servo dan encoder .....	38
Tabel 4.2 Hasil pembacaan sudut IMU dan encoder .....	40
Tabel 4.3 Hasil pembacaan kecepatan sudut IMU dan pembacaan tachometer ...	41
Tabel 4.4 Hasil pembacaan kecepatan encoder dan pembacaan tachometer .....	42
Tabel 4.5 Respon tunning nilai Kp .....	44
Tabel 4.6 Respon tunning nilai Kp dan Ki.....	46
Tabel 4.7 Respon tunning nilai Kp, Ki dan Kd.....	49

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

## 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
$\omega_B$	Kecepatan sudut bodi
$\omega_{G_i}$	Kecepatan sudut gimbal ( $i = 1, 2$ )
$\omega_{F_i}$	Kecepatan sudut <i>flywheel</i> ( $i = 1, 2$ )
$\phi$	Sudut roll bodi
$\alpha_i$	Sudut gimbal ( $i = 1, 2$ )
$\theta_i$	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> ( $i = 1, 2$ )

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

# Bab 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Teknologi sepeda roda dua telah lama ditemukan. Berbagai perkembangan sudah dilewati dari sepeda dengan tenaga manusia, sepeda dengan tambahan motor bertenaga bahan bakar, dan sekarang sepeda bertenaga listrik. Namun, salah satu permasalahan yang ada pada kendaraan roda dua adalah bagaimana mengontrol keseimbangan tersebut. Hal ini masih menjadi topik yang menarik untuk diteliti. Tujuannya agar kendaraan tidak jatuh saat berhenti dan pengemudi tidak perlu menopang kendaraannya ketika berhenti [1], [2]. Teknologi self-balancing sedang berkembang saat ini di sektor robotika dan sistem kontrol. Banyak keuntungan dari self-balancing diantaranya fleksibel, hemat energi dan ramah lingkungan.

Prinsip self-balancing sendiri untuk mempertahankan kendaraan agar tetap seimbang dan stabil [11]. Dengan prinsip tersebut self-balancing dapat meningkatkan safety pada kendaraan roda dua dan merupakan salah satu solusi untuk mengurangi angka kecelakaan. Diketahui bahwa kecelakaan kendaraan roda dua kebanyakan disebabkan oleh ketidak-seimbangan kendaraan saat mendapatkan gangguan dari luar. Ide tersebut didasarkan pada model *inverted pendulum* yang harus menyeimbangkan pusat massanya agar kendaraan tetap seimbang [9]. Salah satu metode *self-balancing* adalah *Control Moment Gyro (CMG)*, sistem kerjanya terdapat sensor sebagai pembacaan masukan dan aktuator sebagai respon yang dihasilkan dari input [4], [5].

Pada tahun 1971, Sharp [3] meneliti tentang sepeda yang dikendarai secara aktif untuk mendapatkan dinamika stabilitas pada kecepatan konstan untuk mendorong kemiringan sepeda ke arah yang berlawanan. Terdapat metode lain, bahwa keseimbangan diperoleh dengan memindahkan pusat gravitasi [6]. Bakarac [7] dalam penelitiannya membandingkan sistem kendali PID, MPC dan LQR yang menghasilkan ketiga kontroler tersebut berhasil menjaga kestabilan bandul dalam posisi tegak. Setiawan [8], menggunakan prototipe robot edukasi dengan sistem

kendali PID menghasilkan pengujian bahwa robot dapat menyeimbangkan diri dan tahan terhadap gangguan dari luar.

Tipe pengendalian yang digunakan pada penelitian *self-balancing* ini menggunakan PID. Teknik kendali PID sering digunakan dalam penelitian *auto balancing* untuk menghasilkan kinerja yang diinginkan. Dengan algoritma yang sederhana dan mudah dipahami, merupakan salah satu keuntungan yang didapat dari penggunaan kendali PID di sektor industri kontroler sejak tahun 1980-an [10]. Konsep dari pengendalian PID ini untuk mempertahankan keluaran sistem agar sama dengan set-point dengan merespon sinyal nilai eror [12]. Pengaturan parameter Kp (Kendali Proporsional), Ki (Kendali Integral), Kd (Kendali Derivatif) dilakukan dalam perancangan sistem kendali PID dengan metode *trial and error* untuk mendapatkan keluaran sistem sesuai yang diinginkan [8].

Pada penelitian ini akan membahas tentang pembuatan prototype *self-balancing* beroda dua dengan metode kendali PID menggunakan dua gimbale yang saling berintegrasi. *Self-balancing* akan bekerja berdasarkan perintah sensor kemudian menggerakkan aktuator yang terhubung dengan gimbale untuk menghasilkan sudut kemiringan tertentu, pada gimbale terdapat *flywheel* yang menghasilkan torsi yang akan berintegrasi dengan kemiringan gimbale untuk mendapatkan momen agar kendaraan tetap seimbang dalam keadaan posisi tegak.

## **1.2. Rumusan Permasalahan**

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

1. Bagaimana menyeimbangkan prototipe kendaraan roda dua menggunakan sistem giroskopik?
2. Bagaimana cara menerapkan sistem kontrol PID pada prototipe kendaraan roda dua?

## **1.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang mekanisme sistem untuk menyeimbangkan prototipe kendaraan roda dua menggunakan penyeimbang giroskopik.

2. Mengetahui penerapan sistem kontrol PID pada prototipe kendaraan roda dua.

#### **1.4. Batasan Masalah**

Batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Implementasi pada prototipe yang dibuat.
2. Sistem stabilisasi memanfaatkan *flywheel* dan gimbale dengan prinsip momen giroskopik.
3. Sistem kendali yang digunakan yaitu *Proportional Integral Derivative* (PID).
4. *Flywheel* berputar dengan kecepatan konstan.
5. Nilai parameter didapatkan dengan melihat respon yang dihasilkan oleh sistem pada prototipe.

#### **1.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Dengan adanya penelitian ini prototipe yang telah dibuat dapat dikembangkan untuk lebih baik.
2. Menciptakan prototipe yang dapat digunakan sebagai bahan ajar di kelas atau laboratorium.

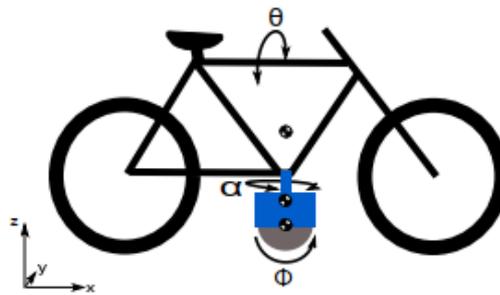
*(Halaman sengaja dikosongkan)*

## Bab 2

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

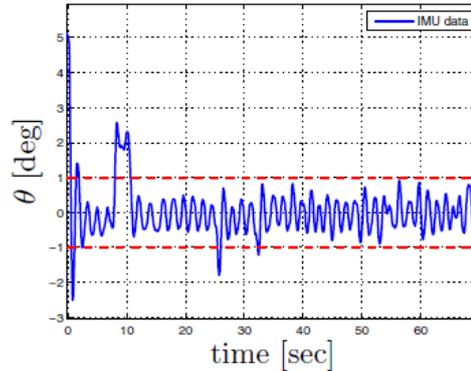
#### 2.1 Penelitian Terdahulu

Pada tahun 1852, giroskop pertama kali ditemukan oleh fisikawan yang bernama Leon Foucault. Dengan memanfaatkan kecepatan putaran tertentu pada *flywheel* untuk menghasilkan keseimbangan pada benda yang disebabkan adanya torsi presisi pada gimbal. Diawali dengan temuan giroskop ini membuat para peneliti menghasilkan temuan-temuan baru seperti penyeimbangan pada robot, penyeimbang pada robot, hingga menjamah pada sarana kesehatan salah satunya penyeimbang kursi roda.



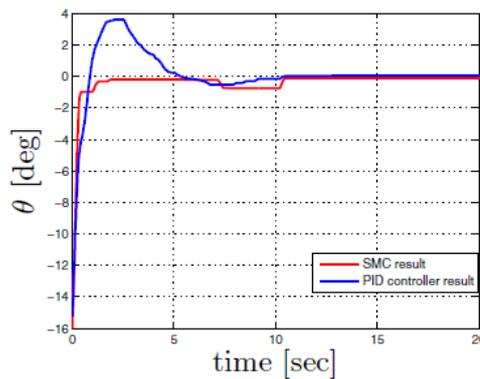
Gambar 2.1 Free Body Diagram sepeda Yetkin Harun (H. Yetkin, 2015)

Beberapa peneliti telah melakukan penelitian tentang penyeimbangan roda dua menggunakan *control moment gyroscope*. Pada penelitian yang telah dilakukan oleh Yetkin Harun (H. Yetkin, 2015) dengan memasang giroskop pada sepeda menggunakan satu *flywheel*. Kemudian diteliti bagaimana giroskop dapat menyeimbangkan sepeda dengan putaran *flywheel* yang menghasilkan putaran torsi presisi untuk melawan gaya gravitasi. Gambar 2.1 merupakan *free body diagram* yang menunjukkan sepeda sebagai bahan penelitian menggunakan sepeda yang simple dengan penempatan giroskop berada pada bawah. Dimana  $\theta$  merupakan sudut rol,  $\alpha$  menunjukkan arah putaran sudut gimbal dan  $\Phi$  arah putaran *flywheel*.



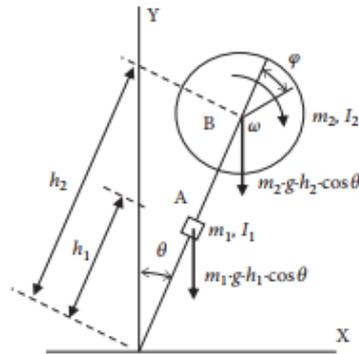
Gambar 2.2 Grafik hasil eksperimen Yetkin Harun (H. Yetkin, 2015)

Pada penelitian yang dilakukan Yetkin Harun, digunakan *sliding mode control* dan PID dengan parameter yang sudah ditentukan sebagai sistem kendali pada sepeda, kemudian akan dibandingkan *feedback* yang dihasilkan. Hasil simulasi dapat dilihat pada Gambar 2.2 dari hasil pembacaan Inertial Measurement Unit (IMU) dapat dilihat bahwa sepeda berisolasi stabil pada *range* satu derajat. Kemudian didapatkan grafik perbandingan sistem kendali *sliding mode control* dan sistem kendali PID pada Gambar 2.3 menunjukkan bahwa sistem kendali SMC dapat mereduksi *overshoot* dari sistem dengan sudut kemiringan -16 derajat.



Gambar 2.3 Grafik perbandingan sistem kendali SMC dan PID dengan sudut kemiringan awal -16 derajat Yetkin Harun (H. Yetkin, 2015)

Kemudian, penelitian yang berkaitan dengan giroskopik juga dilakukan oleh Ngoc Kien Vu (Vu Ngoc Kien, 2020) menggunakan prototipe sepeda roda dua dengan satu *flywheel* yang berputar dengan menerapkan prinsip *inverted pendulum*.



Gambar 2.4 Model dinamis sepeda roda dua Ngoc Kien Vu (Vu Ngoc Kien, 2020)

Penelitian tersebut menggunakan sistem kontrol *Robust* untuk mengendalikan kestabilan robot, kemudian menambahkan algoritma reduksi sebagai pengurangan waktu respon sistem. Selain itu, peneliti akan menganalisa respon prototipe saat membawa beban dengan berat 2,2 kg dan respon sepeda saat melewati rintangan. Gambar 2.4 model dinamis prototipe sepeda roda dua dibuat untuk menentukan persamaan linear, dimana  $h_1$  merupakan tinggi titik tengah gravitasi sepeda,  $h_2$  tinggi titik tengah *flywheel*,  $I_1$  momen inersia sepeda,  $I_2$  momen inersia *flywheel*,  $\theta$  adalah sudut kemiringan sepeda,  $\varphi$  adalah sudut putaran *flywheel*.

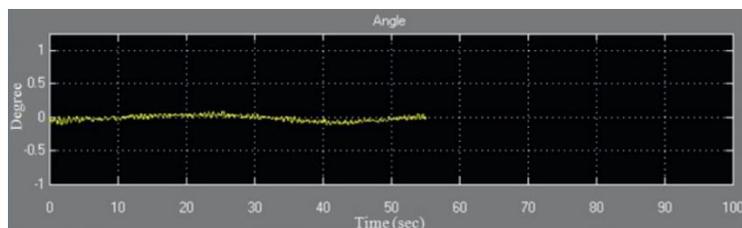


Gambar 2.5 Prototipe sepeda roda dua (a) Tanpa beban, (b) Dengan beban Ngoc Kien Vu (Vu Ngoc Kien, 2020)

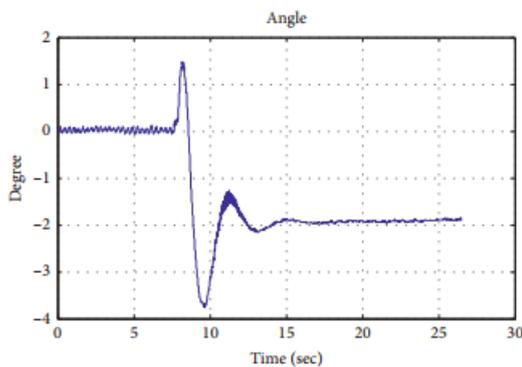
Prototipe dibuat sebagai pengujian dan analisa respon-respon yang terjadi sebelum diterapkan pada kendaraan yang sebenarnya, Gambar 2.5 merupakan

prototipe yang telah dibuat oleh peneliti menggunakan dua roda dengan roda belakang diberi penggerak sehingga prototipe dapat berjalan.

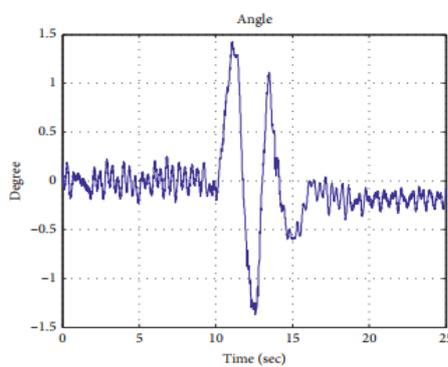
Didapatkan hasil pengujian prototipe pada Gambar 2.6 tanpa menggunakan beban menghasilkan osilasi yang stabil antara 0,5 hingga -0,5 derajat. Selanjutnya prototipe beresilasi stabil sekitar 9,5 detik lalu diberikan beban eksentrik menghasilkan grafik ampiltudo sudut kemiringan antara 1,47 hingga -3,75 derajat, kemudian sistem menjaga keseimbangan prototipe dan didapatkan sudut seimbang baru pada sudut 1,88 derajat.



(a)



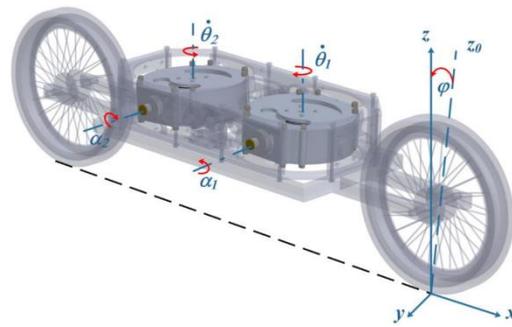
(b)



(c)

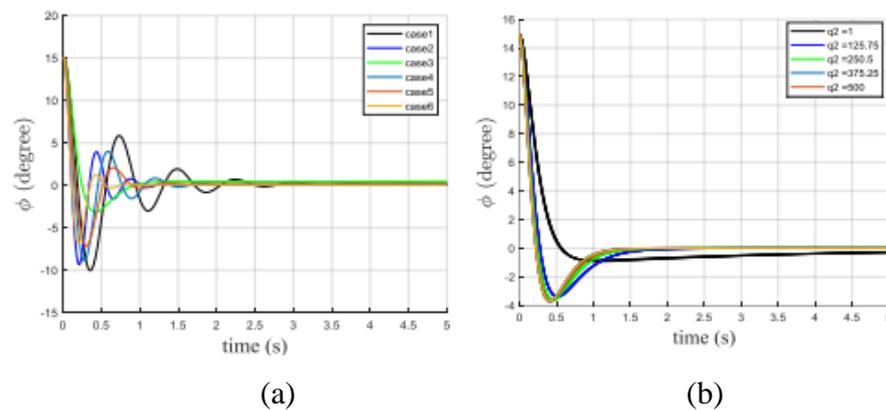
Gambar 2.6 Grafik hasil pengujian (a) Tanpa beban, (b) Dengan beban, (c) Terhadap rintangan Ngoc Kien Vu (Vu Ngoc Kien, 2020)

Ketika prototipe diberikan rintangan didapatkan hasil rentang sudut kemiringan antara 1,43 hingga -1,37 derajat, kemudian sistem kendali menjaga keseimbangan pada sudut 0,2 derajat dan menjadi sudut kemiringan baru.



Gambar 2.7 Free body diagram sepeda roda dua Buntheng (C. Buntheng, 2020)

Selain itu, Buntheng Chhorn (C. Buntheng, 2020) juga melakukan penelitian tentang giroskop menggunakan dua *flywheel* berputar stabil yang dipasang secara horizontal. Dengan memberikan torsi gimbal pada *flywheel* yang berputar akan menghasilkan suatu torsi reaktif yang disebut torsi presisi yang dapat dikendalikan. Pada penelitian ini model matematika dengan menggunakan persamaan lagrange diturunkan untuk mendeskripsikan model dinamik sistem. Sistem kendali PID dan LQR digunakan untuk menyeimbangkan kendaraan roda dua, untuk memvalidasi konsep tersebut dikembangkan pemodelan nonlinear menggunakan Simscape Multibody.



Gambar 2.8 Grafik Hasil pembacaan (a) sudut sepeda PID, (b) sudut sepeda LQR (C. Buntheng, 2020)

Pada Gambar 2.7 merupakan model sepeda roda dua yang akan diuji, dimana  $\dot{\theta}_1$  merupakan sudut putar *flywheel* 1,  $\dot{\theta}_2$  sudut putar *flywheel* 2,  $\alpha_1$  adalah sudut

putar gimbal 1,  $\alpha_2$  adalah sudut putar gimbal 2,  $\varphi$  adalah sudut kemiringan sepeda. Setelah dilakukan pengujian pada 6 percobaan dengan kondisi berbeda didapatkan hasil seperti pada Gambar 2.8 (a) bahwa respon pada kasus 6 membutuhkan waktu tercepat untuk membawa sepeda ke posisi stabil dalam 0,75 detik, namun kontroler PID tidak dapat mengembalikan posisi gimbal ke titik nol, sehingga giroskop tidak akan efisien untuk menyeimbangkan pada gangguan selanjutnya. Pada Gambar 2.8 (b) merupakan hasil percobaan menggunakan LQR didapatkan stabilitas sepeda dalam 2 detik, kemudian posisi gimbal dapat kembali mendekati 0 dengan jarak kurang lebih 5 derajat.

## 2.2 Giroskop

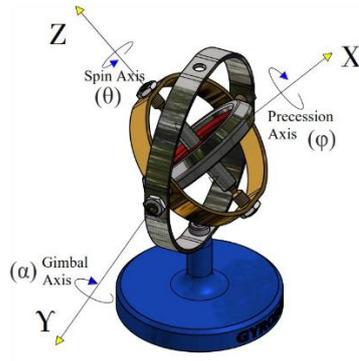
Giroskop merupakan berupa *flywheel* yang berputar terhadap poros penopangnya dan akan tetap pada posisinya jika tidak diberikan gaya dari luar. Giroskop dapat mempertahankan orientasinya berdasarkan pada prinsip-prinsip momentum sudut yang diakibatkan oleh putaran *flywheel*. Putaran *flywheel* memiliki momen inersia dan kecepatan putaran, semakin tinggi momen inersia yang dihasilkan dari kecepatan *flywheel* semakin tinggi stabilitas dari giroskop dalam mempertahankan kedudukannya agar tetap stabil berdiri tegak. Dalam menyeimbangkan, giroskop menghasilkan gaya presisi dimana gaya tersebut dibangun dari gerakan gimbal yang memutar poros *flywheel* untuk mendapatkan gaya presisi.

## 2.3 Control Moment Gyroscope (CMG)

Control Moment Gyroscope (CMG) merupakan *flywheel* yang diputar oleh motor kemudian menghasilkan torsi eksternal yang diterapkan untuk memutar salah satu sumbu tegak lurus lainnya. Diketahui bahwa pada Gambar 2.9 *flywheel* berputar terhadap sumbu-z dengan kecepatan putaran  $\omega_z = \dot{\theta}$ , sehingga menghasilkan momentum sudut yang berasal dari putaran giroskop menurut hukum Newton kedua dapat dituliskan:

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

dimana,  $I_f$  merupakan momen inersia *flywheel* pada sumbu-z



Gambar 2.9 Control moment gyroscope

Setiap ada aksi pasti ada reaksi, sesuai dengan hukum newton ketiga, bahwa giroskop memberikan reaksi untuk mempertahankan stabilitas posisi saat mendapatkan *disturbance* dengan menghasilkan torsi yang disebut torsi presisi. Torsi presisi bergerak berlawanan arah untuk mencoba mengubah laju kecepatan sudut  $\omega_y = \dot{\alpha}$ . Sehingga besar torsi output giroskop dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\tau_{gyro} = M_f \cdot \dot{\alpha} \quad (2.2)$$

*Flywheel* harus tetap berputar untuk mengetahui efek presisi yang disebabkan oleh torsi presisi, kemudian pada gimbal diberikan torsi eksternal agar terjadi perputaran lain secara simultan pada sumbu yang tegak lurus dengan sumbu putar *flywheel* dan sumbu putar gimbal. Perubahan laju momentum sudut dikarenakan efek torsi posisi, sehingga torsi presisi akan terjadi pada *flywheel* yang berputar terhadap gimbal dengan nilai  $|\omega_y = \dot{\alpha}| > 0$ . Jika  $\alpha$  merupakan torsi presisi giroskop, maka persamaan dapat dituliskan  $\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt}$ . Sehingga keseimbangan torsi dapat dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\tau_{presisi} = I_f \cdot \dot{\theta} \cdot \frac{d\alpha}{dt} \cos(\alpha) \quad (2.3)$$

$\alpha$  merupakan *balancing torque* 0 roll-axis pada sudut 90 derajat. Kecepatan sudut gimbal dan kecepatan sudut *flywheel* mempengaruhi besar torsi presisi. Dalam penelitian ini penulis akan menggunakan dua jenis aktuator, yang pertama menggunakan servo untuk memutar gimbal, yang kedua motor DC *brushless* untuk memutar *flywheel*. Kekuatan yang dihasilkan tergantung pada kedua aktuator

tersebut, semakin besar radius *flywheel* akan menghasilkan *balancing torque* yang lebih besar.

## 2.4 Persamaan Lagrange

Persamaan gerak partikel atau sebuah sistem yang dapat dibentuk berdasarkan gaya-gaya yang bekerja pada sistem sebagai fungsi dari koordinat umum, kecepatan umum ataupun berbasis energi biasa disebut persamaan lagrange. Persamaan gerak lagrange (L) tersusun dari energi kinetik (T) dan energi potensial (V), sehingga hubungan antara keduanya dapat dituliskan melalui persamaan berikut:

$$L = T - V \quad (2.4)$$

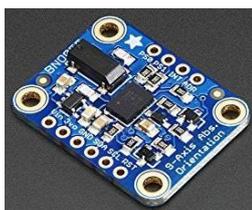
Pada persamaan lagrange, koordinat posisi dan kecepatan merupakan variabel independen, dan turunan persamaan lagrange dapat diturunkan secara parsial. Menggunakan metode *virtual displacement* persamaan gerak dapat diperoleh dengan jarak perpindahan partikel sangat kecil dan batasan yang ada pada sistem. Diasumsikan bahwa  $q_i$  merupakan koordinat sistem dan  $Q_i$  adalah gaya eksternal yang terjadi pada sistem, persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) - \frac{\delta L}{\delta q_i} = Q_i \quad (2.5)$$

## 2.5 Komponen Elektronika

### 2.5.1 Sensor

Sensor merupakan alat yang digunakan untuk menangkap, mengukur atau mendeteksi perubahan sinyal dari sistem yang sedang diukur. Pada sistem kendali sensor memberikan input tegangan dan arus listrik dari pembacaan variasi mekanis, magnetik, panas, sinar ataupun kimia, sehingga sensor merupakan indra seperti mata, hidung, pendengaran, lidah pada manusia. Pada penelitian ini sensor yang digunakan adalah *Inertia Measurement Unit* (IMU). IMU tergolong dalam transduser yang merupakan alat untuk mengubah sinyal ke bentuk yang lain.



Gambar 2.10 Inersia measurement unit (IMU) BNO055

Kegunaannya mengukur kecepatan, orientasi, serta gaya gravitasi dengan menggunakan *accelerometer* dan *gyroscope* yang terdapat pada komponen IMU, selain itu terdapat jenis IMU yang dapat mengukur medan magnet, tekanan dan lainnya. Sehingga wajar jika teknologi sekarang menggunakan IMU untuk mengendalikan pesawat tanpa awak, satelit, pesawat luar angkasa.

### 2.5.2 Arduino

Pada suatu rangkaian robotika atau sistem kendali memerlukan mikrokontroler untuk menanamkan program agar dapat membaca input, memproses input dan menghasilkan output yang diinginkan. Pada penelitian ini menggunakan papan rangkaian elektronik pengendali mikro *single-board* yang bersifat *open source* dan didalamnya terdapat mikrokontroler yang biasa disebut arduino. *Hardware* yang terdapat pada arduino memiliki beberapa jenis dan mempunyai kelebihan dan kekurangan. Penggunaannya harus sesuai dengan kebutuhan, karena prosesor yang ada pada arduino dapat mempengaruhi pembacaannya. Yang membedakan jenis arduino satu dengan lainnya terdapat pada penanaman fungsi pada setiap *board* dan mikrokontroler yang digunakan, jika semakin kompleks program atau perancangan yang dibuat maka harus sesuai pula jenis kontroler yang digunakan.

### 2.5.3 Electronic Speed Control (ESC)

ESC tergolong pada kontroler yang berfungsi mengendalikan kecepatan motor *brushless* sebagai komutasi pengiriman daya ke rotor dengan mematikan atau menghidupkan pulsa ke motor, sehingga respon kendali motor berlangsung cepat. Cara kerja ESC dengan mengendalikan kecepatan motor hasil pembacaan sinyal yang diterima oleh arduino, sinyal tersebut digunakan untuk mengatur arus yang

mengalir dari *power supply* ke motor, sehingga putaran motor dapat dikendalikan sesuai dengan kebutuhan.

#### 2.5.4 Motor Brushless DC

Motor *brushless* merupakan aktuator yang memiliki jenis motor sinkron magnet permanen dengan suplai sumber listrik DC pada kontrolnya dan memiliki 3 fasa untuk menggerakkan rotor motornya. Motor ini tidak menggunakan *brush* untuk proses komutasinya, sehingga memerlukan komponen elektronik ESC sebagai komutasi suplai daya ke motor. Motor brushless dapat menghasilkan torsi yang besar dan RPM yang tinggi, cocok diaplikasikan pada produk yang menuntut realibilitas dan efisiensi tinggi.

Pada motor ini terdapat dua komponen utama, yang pertama adalah rotor, rotor terdiri dari beberapa magnet permanen saling direkatkan dengan epoxy. Magnet tersebut akan tertarik dan terdorong oleh gaya elektromagnetik yang diatur oleh ESC, sehingga motor *brushless* dapat memberikan rasio daya dan beban yang lebih tinggi secara signifikan dan memberikan efisiensi yang lebih baik. Yang kedua yaitu stator yang merupakan bagian motor *brushless* yang statis dimana fungsinya sebagai medan putar dan memberikan gaya elektromagnetik rotor agar dapat berputar. Pada penelitian ini menggunakan motor *brushless* tipe MN4014-400kv.

#### 2.5.5 Servo

Motor servo adalah aktuator dengan sistem umpan balik *close-loop* dimana posisi rotornya akan diinformasikan kembali ke rangkaian kontroler yang ada pada servo. Motor servo terdiri dari motor DC, rangkaian gear, potensiometer dan rangkaian kontrol. Potensiometer berfungsi sebagai pembatas sudut dari putaran servo, sedangkan rangkaian gear menyatu dengan poros motor DC yang akan memperlambat putaran poros sehingga meningkatkan torsi motor servo.



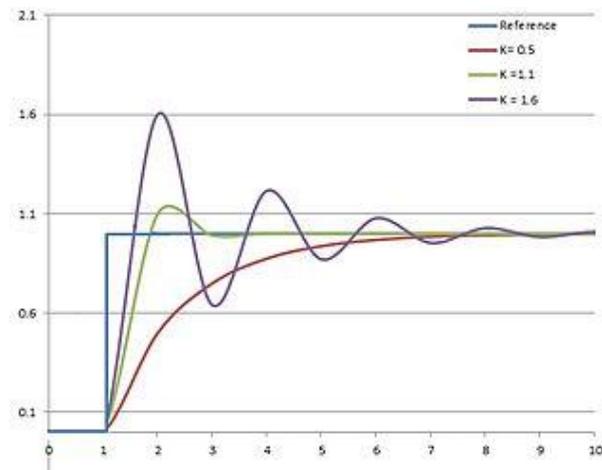
Gambar 2.11 Motor servo dynamixel XM540-W270-T/R

Pada penelitian ini menggunakan motor servo Dynamixel seri XM540-W270-T/R dengan putaran poros tanpa batasan pada arah kanan maupun kiri. Motor servo dikendalikan dengan memberikan sinyal *Pulse Wide Modulation* (PWM) melalui kabel kontrol, kemudian sinyal kontrol akan menentukan posisi sudut putar motor servo. Ketika lebar pulsa ditentukan maka poros motor servo akan berputar sesuai dengan posisi yang diberikan dan berhenti mempertahankan posisi tersebut. Motor servo tidak selamanya akan diam atau berhenti, karena memiliki presisi yang tinggi maka sinyal pulsa akan mengulang setiap mili detik sesuai yang diperintahkan pada mikrokontroler.

## 2.6 Sistem Kontrol PID

Didalam sistem kontrol terdapat beberapa macam aksi kontrol diantaranya yaitu kontrol proporsional, kontrol integral dan kontrol derivatif. Setiap aksi kontrol tersebut memiliki keunggulan masing-masing, dimana kontrol proporsional mempunyai keunggulan *rise time* yang cepat, kemudian kontrol integral memiliki keunggulan untuk memperkecil *error*, dan kontrol derivatif memiliki keunggulan meredam *overshot/undershot* yang merupakan sebagai *error*. Dari definisi tersebut, agar dapat menghasilkan output dengan *risetime* yang cepat dan *error* yang kecil maka dapat menggabungkan ketiga aksi kontrol tersebut menjadi kontrol PID.

### 2.6.1 Aksi Kontrol Proporsional



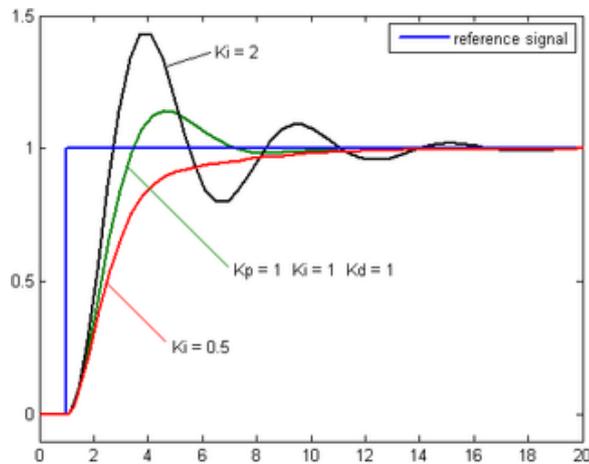
Gambar 2.12 Respon output pada kontroler Kp

Kp merupakan konstanta proporsional. Kp berlaku sebagai gain (pengali) memiliki *output* yang sebanding dengan besar sinyal masukan, semakin besar nilai Kp akan semakin cepat respon yang diberikan (Endra,2006). Pada pengaplikasian sederhana kontrol proporsional mampu memperbaiki *risetime*. Sehingga kontrol proporsional dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = k_p e(t) \quad (2.6)$$

### 2.6.2 Aksi Kontrol Integral

Ki merupakan konstanta integral yang memiliki fungsi memperbaiki respon *steady-state*, namun pemilihan Ki yang tidak tepat dapat menyebabkan respon transien (*transient response*) yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan dari sistem (Endra, 2006). Suatu kontrol jika tidak mempunyai unsur integrator ( $1/s$ ), maka pengontrol proporsional tidak akan mampu menjamin respon *output* sistem akan sesuai yang diinginkan.



Gambar 2.13 Respon output pada kontroler Ki

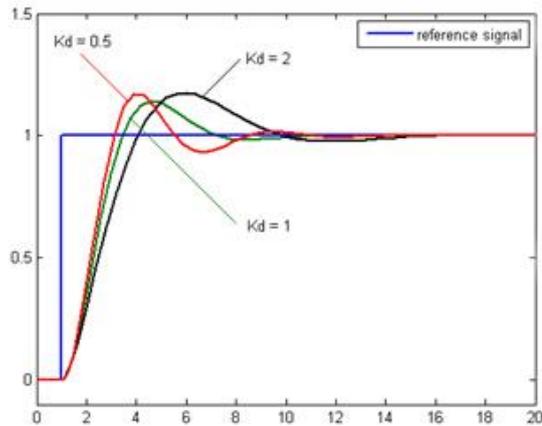
Persamaan kontrol integral dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.7)$$

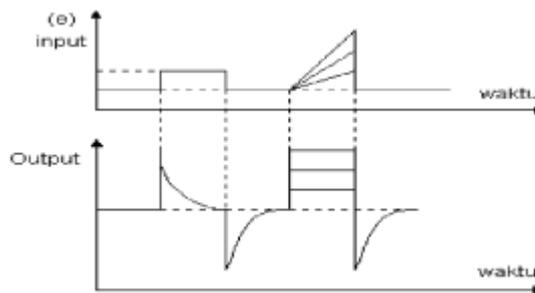
Ki merupakan konstanta integral,  $e$  adalah *error*, dan  $u$  merupakan nilai keluaran relatif terhadap waktu ( $t$ ). Pengontrol integral memiliki karakteristik nilai  $u(t)$  akan semakin besar jika nilai eror antara keadaan sekarang dengan keadaan ideal (*set point*) sangat besar, sebaliknya nilai  $u(t)$  akan semakin kecil jika nilai eror antara keadaan sekarang dengan keadaan ideal sangat kecil.

### 2.6.3 Aksi Kontrol Derivatif

Kd merupakan konstanta derivatif. Kd berperan sebagai konstanta yang dapat mengurangi efek respon yang berlebihan pada sistem dalam menuju *steady state*. Gambar 2.15 menyatakan hubungan antara sinyal masukan dengan sinyal keluaran pengontrol Derivative. Ketika masukannya tidak mengalami perubahan, keluaran pengontrol juga tidak mengalami perubahan, sedangkan apabila sinyal masukan berubah mendadak dan menaik (berbentuk fungsi step), keluaran menghasilkan sinyal berbentuk impuls.



Gambar 2.14 Respon output pada kontroler Kd



Gambar 2.15 Kurva waktu hubungan input dan output konstanta derivative

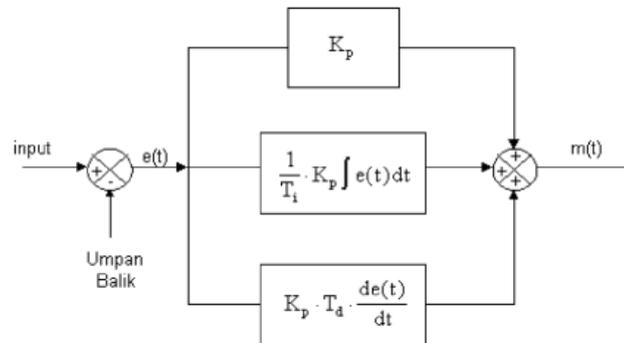
Jika sinyal masukan berubah naik secara perlahan (fungsi ramp), keluarannya justru merupakan fungsi step yang besar magnitudnya sangat dipengaruhi oleh kecepatan naik dari fungsi ramp dan faktor konstanta diferensialnya.. Persamaan kontrol derivatif dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (2.8)$$

Kd merupakan konstanta integral, e adalah *error*, dan u merupakan nilai keluaran relatif terhadap waktu (t).

Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing pengontrol kp, ki dan kd dapat saling ditutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi sistem kontrol PID. Dalam penelitian ini parameter PID didapatkan dengan melihat respon pada prototipe selama proses menyeimbangkan. Parameter yang dapat

menyeimbangkan prototipe dengan waktu lebih dari 30detik dan keseimbangannya mendekati  $0^\circ$  yang akan diambil sebagai konstanta PID yang baik.



Gambar 2.16 Blok diagram kontrol PID

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

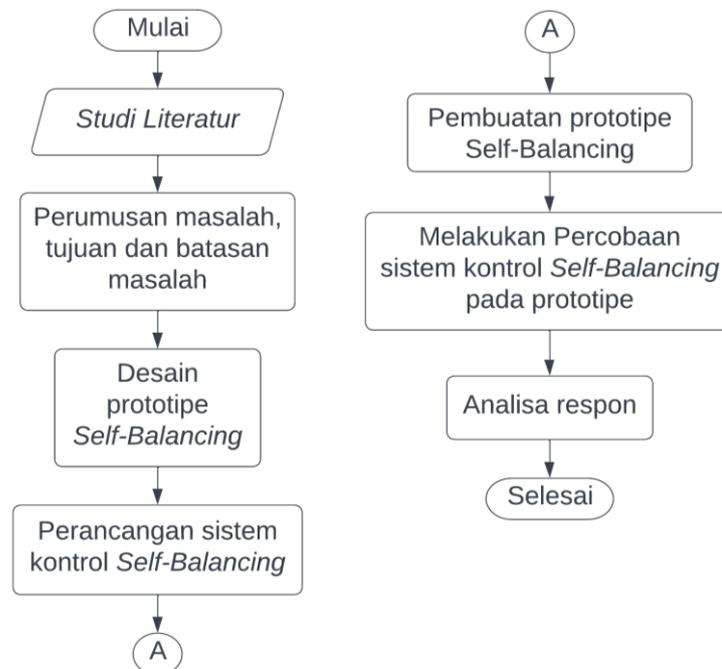
## Bab 3

### METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan untuk mengontrol keseimbangan kendaraan roda dua menggunakan kontrol momen giroskop. Metodologi penelitian yang digunakan dengan pengujian secara *real time* pada prototipe. Diawali dengan pemodelan matematis, menentukan parameter yang akan digunakan, kemudian pembuatan desain prototipe kendaraan roda dua, perancangan sistem kendali dan diterapkan pada prototipe, selanjutnya proses analisa respon.

#### 3.1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa respon kontrol momen giroskop pada gangguan eksternal yang diberikan terhadap prototipe yang dibuat. Sehingga pada penulisan ini ingin mengetahui seberapa kuat prototipe mempertahankan kestabilan untuk menjaga agar tetap berdiri tegak. Dalam proses menganalisa dilakukan beberapa tahapan yang ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Proses perancangan ini memerlukan metode yang terstruktur agar tujuan dapat tercapai sesuai dengan harapan. Berikut langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini:

1. Studi literatur

Melakukan pembelajaran dan pemahaman dasar terkait penelitian yang akan dilakukan dengan mengkaji penelitian-penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Diantaranya memahami konsep dasar kontrol momen giroskop, memahami sistem kerja giroskop, mempelajari rangkaian elektronika sebagai sistem kendali stabilitas, dan *software* yang mendukung. Studi pustaka yang dilakukan diperoleh melalui jurnal, buku, internet dan penelitian sebelumnya. Kemudian dilakukan studi lapangan untuk mengetahui karakteristik komponen yang dipakai.

2. Perumusan masalah, tujuan dan batasan masalah

Perumusan masalah dilakukan sebagai acuan dan target yang akan dicapai dalam penelitian ini serta penjabaran terhadap latar belakang yang dibuat kemudian akan dijawab pada kesimpulan di akhir penelitian. Menentukan tujuan penelitian yaitu merancang prototipe *self-balancing* kemudian mengontrol dengan sistem kendali PID. Batasan masalah digunakan untuk membatasi pembahasan permasalahan pada penelitian ini, yaitu kontrol yang digunakan menggunakan PID yang dapat menyeimbangkan prototipe.

3. Desain prototipe *Self-Balancing*

Melakukan pembuatan desain prototipe untuk dilakukan pencetakan part prototipe menggunakan printer 3D dan melengkapi komponen yang dibutuhkan, lalu merakitnya menjadi satu kesatuan.

4. Perancangan sistem kontrol *Self-Balancing*

Pada tahap ini dilakukan perancangan sistem pengontrol seperti aktuator pada gimbale dan *flywheel* yang digunakan, dan merancang *wiring* pada prototipe. Skema sistem kendali diilustrasikan pada Gambar 3.6. Kemudian membuat *coding* dengan sistem kendali PID yang akan di *input* pada mikrokontroler atau arduino sebagai *interface* pada sistem agar dapat menyeimbangkan.

5. Pembuatan prototipe

Pencetakan prototipe dengan cetak 3D pada setiap komponen dengan menggunakan bahan PLA, kemudian dilakukan perakitan hingga menjadi prototipe yang siap digunakan.

6. Percobaan sistem kontrol pada prototipe

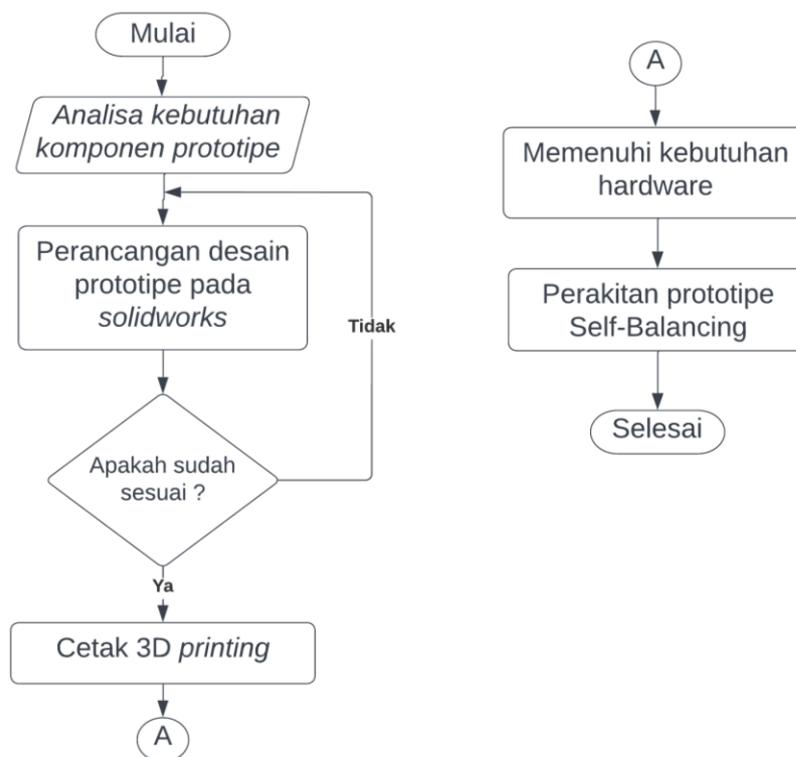
Menerapkan sistem kontrol yang sudah dirancang pada prototipe yang telah dicetak dan dirakit, serta melakukan *tuning* kontrol PID yang sesuai agar prototipe dapat menyeimbangkan pada posisi ekuilibrium.

## 7. Analisa respon

Selama percobaan yang dilakukan, juga mengamati respon yang dihasilkan pada proses tuning PID. Respon yang terbaik dalam menyeimbangkan akan digunakan sebagai data respon yang terbaik yang diberikan oleh prototipe.

### 3.2. Diagram Alir Pembuatan Prototipe

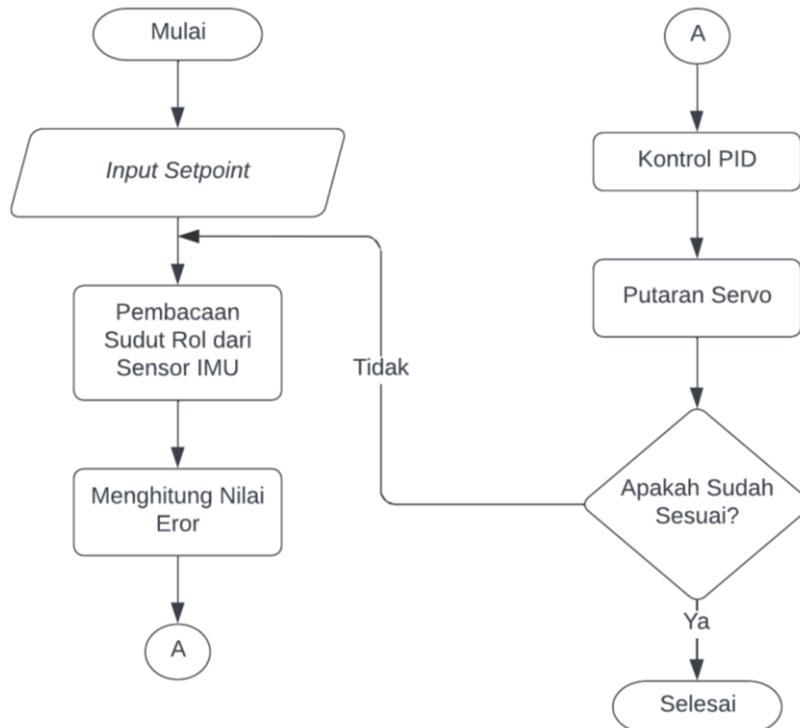
Pada penelitian ini menggunakan prototipe sebagai alat untuk menganalisa hasil respon terhadap pengendalian yang dilakukan. Pada proses perakitannya diawali dengan merencana kebutuhan komponen yang akan digunakan, kemudian membuat desain pada *software Solidworks* untuk memberikan rancangan secara grafis model yang akan dibuat. Pada tahap desain ini juga dilakukan penentuan arah gaya dan momen sebagai rencana bagaimana alat ini akan bekerja, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.6. Setelah semua sudah sesuai, kemudian dilakukan pencetakan alat menggunakan printer 3D menggunakan bahan PLA. Setelah tercetak, seluruh komponen dirakit beserta memasang komponen elektronika yang sesuai dengan prototipe.



Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan prototipe

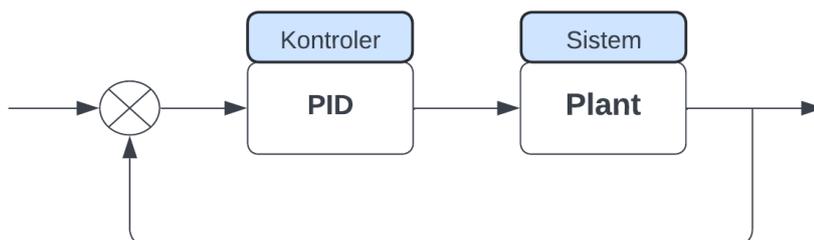
### 3.3. Perancangan Sistem Kontrol PID

Pada perancangan sistem kontrol menggunakan metode PID, diperlukan beberapa tahapan yang digambarkan pada diagram alir Gambar 3.3 dalam menentukan parameter gain  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ .



Gambar 3.3 Diagram alir perancangan sistem kontrol PID

Sistem kendali akan berperan penting dalam menyeimbangkan prototipe agar stabil pada posisi tegaknya. Dari parameter gain  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang telah didapat akan digunakan pada kontrol *full state feedback*. Blok diagram PID ditunjukkan pada Gambar 3.4.

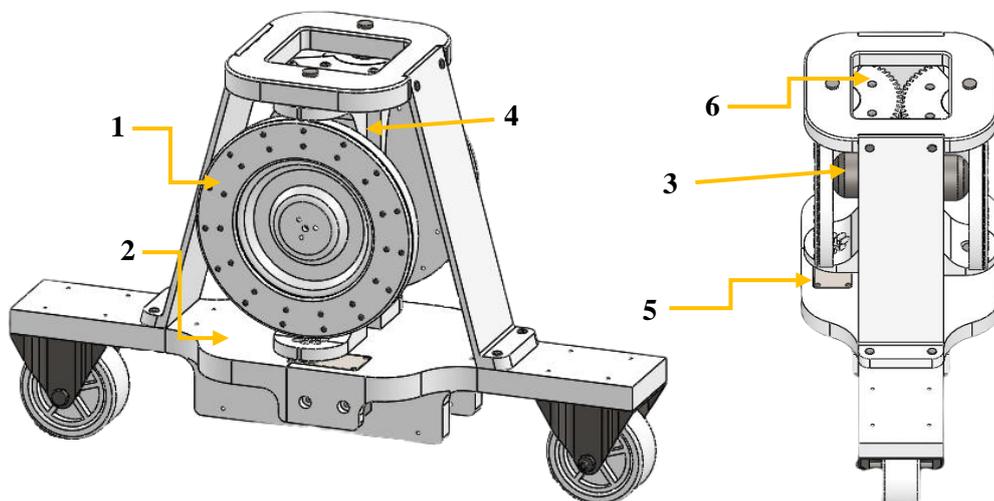


Gambar 3.4 Blok diagram PID

### 3.4. Model Self-Balancing Kendaraan Roda Dua

Model sepeda roda dua ditunjukkan pada Gambar 3.1 dengan dasar mekanik kontrol momen giroskopik yang terdiri dari beberapa *part* utama, seperti berikut:

1. *Flywheel*
2. *Base plate* sebagai dasaran penompang komponen giroskop
3. Motor *brushless* untuk memutar *flywheel*
4. Gimbal sebagai bingkai untuk berputarnya *flywheel*
5. Servo untuk memutar gimbal
6. Gear untuk menghubungkan putaran antar gimbal



Gambar 3.5 Konsep desain self-balancing kendaraan roda dua

Sistem pada model prototipe dibangun dengan dua *flywheel* dengan putaran konstan pada RPM yang sama. Pertimbangan yang dipakai mengapa menggunakan dua *flywheel* agar mendapatkan *mass properties* untuk menambah nilai *precision torque*, semakin besar efek giroskop yang dihasilkan akan meningkatkan torsi untuk membantu *roll motion* kendaraan roda dua dalam menjaga kestabilan ketika menyimpang dari posisi tegaknya.

Tabel 3.1 Komponen Pada Prototipe

No.	Komponen	Jumlah
1	<i>Base</i>	1
2	<i>Motor Brushless DC</i>	2
3	Gimbal	2
4	<i>Electronic Speed Controller (ESC)</i>	2
5	Arduino Mega	1
6	Arduino Uno	1
7	Sensor IMU	1
8	<i>Dynamixel Servo</i>	1
9	<i>Dynamixel Shield</i>	1
10	<i>Flywheel</i>	2
11	Roda	2
12	Potensiometer	1
13	<i>Power Supply 12V</i>	1
14	Adaptor 5V	1

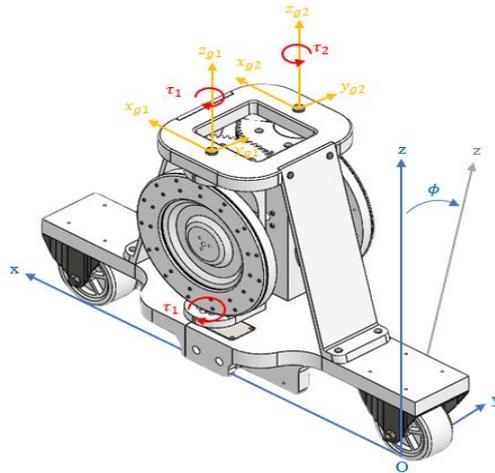
### 3.5. Persamaan Gerak Sistem

Terdapat dua pendekatan untuk menurunkan persamaan gerak suatu sistem, yaitu pendekatan newtonian dan pendekatan lagrangian. Pendekatan newton mempertimbangkan setiap komponen individu dari suatu sistem secara terpisah. Perhitungan gaya interaksi yang dihasilkan dari koneksi setiap bagian atau *part* diperlukan, koneksi tersebut menyebabkan kendala kinematik.

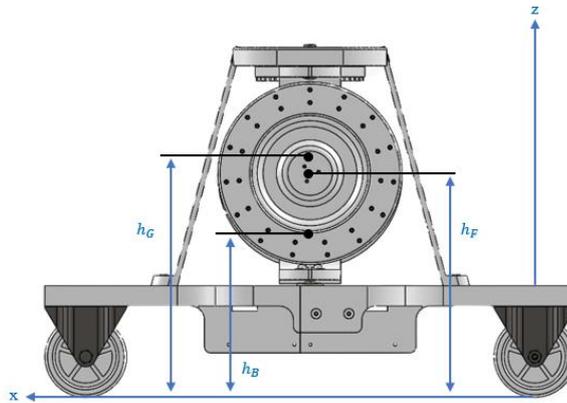
Dalam hal tersebut persamaan gerak sistem pada penelitian ini menggunakan pendekatan Euler-Lagrange, persamaan gerak sistem akan ditentukan dengan memodelkan persamaan gerak keseluruhan sistem. Terdapat dua komponen energi yang perlu ditinjau melalui persamaan gerak ini, yaitu energi potensial dari massa serta kedudukan kendaraan dan energi kinetik dari gerak putar giroskop. Gambar 3.2 merupakan pemodelan kendaraan roda dua yang akan diturunkan dengan persamaan lagrange.

### 3.2.1 Persamaan Gerak Model Kendaraan Roda dua *Self-Balancing*

Parameter ditentukan sebelum melakukan penurunan persamaan lagrange.  $\phi$  merupakan sudut rol bodi.  $O - xyz$  sebagai koordinat sistem referensi,  $O - x_B y_B z_B$  adalah koordinat bodi terhadap titik O, dan  $O - x_{g1} y_{g1} z_{g1}$  ( $i = 1, 2$ ) merupakan koordinat gimbal.



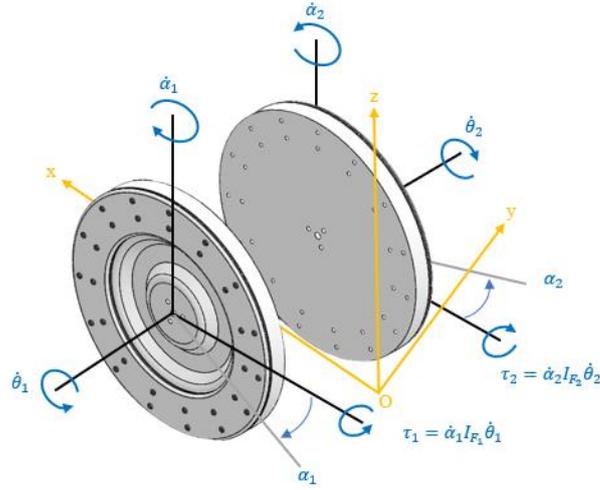
Gambar 3.6 Free body diagram sepeda self-balancing tampak isometri



Gambar 3.7 Kendaraan self-balancing roda dua tampak samping

Rotasi matrix bodi roll yang sesuai dapat dituliskan sebagai berikut:

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



Gambar 3.8 Giroskopik presisi

matrix rotasi gimbal 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  $\omega_B$ , gimbal  $\omega_{Gi}$ , dan *flywheel*  $\omega_{Fi}$  dapat dituliskan sebagai berikut:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sehingga, dapat diperoleh total energi kinetik sebagai berikut:

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

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

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

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

Model matematika dapat diperoleh melalui pendekatan Lagranian 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,  $q_j$  merupakan *generalized coordinate* ke- $j$ ,  $Q_j$  adalah *generalized force* yang terdapat pada setiap *generalized coordinate*. Yang dikatakan *generalized coordinate* yaitu  $q_1 = \phi, q_2 = \alpha_1, q_3 = \alpha_2$ , kemudian pada penelitian ini *generalized force* merupakan  $Q_1 = d, Q_2 = \tau_1, Q_3 = \tau_2$  mewakili gangguan yang diterapkan pada prototipe, torsi yang dihasilkan untuk gimbal 1 dan gimbal 2. Persamaan lagrange terhadap  $\phi$  dan  $\alpha_i$  dapat dituliskan sebagai berikut:

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

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

Pada *flywheel*  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  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:

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

$$\begin{aligned} & (I_{G1z} + I_{F1z}) \ddot{\alpha}_1 + (I_{G1x} + I_{F1x}) \cos \alpha_1 \sin \alpha_2 \dot{\phi}^2 \\ & - (I_{G1y} + I_{F1y}) \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 \dot{\phi}^2 - I_{F1y} \dot{\theta}_1 \dot{\phi} \cos \alpha_1 = T_1 - T_2 \end{aligned} \quad (3.18)$$

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

didefinisikan sebagai,

$$\begin{aligned} M_1 &= m_B h_B^2 + I_{Bx} + \sum_{i=1}^2 m_{Gi} h_{Gi}^2 + \sum_{i=1}^2 m_{Fi} h_{Fi}^2 \\ M_2 &= \left( m_B d_B + \sum_{i=1}^2 m_{Gi} d_{Gi} + \sum_{i=1}^2 m_{Fi} d_{Fi} \right) \end{aligned}$$

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

Kemudian persamaan 3.19 disubstitusikan ke persamaan 3.18, didapatkan:

$$\begin{aligned} & M_1 \ddot{\phi} + \sum_{i=1}^2 (I_{Gix} + I_{Fix}) \cos^2 \alpha_i \ddot{\phi} + \sum_{i=1}^2 (I_{Giy} + I_{Fiy}) \sin^2 \alpha_i \ddot{\phi} \\ & - 2 \sum_{i=1}^2 (I_{Gix} + I_{Fix}) \cos \alpha_i \sin \alpha_i \dot{\alpha}_i \dot{\phi} + 2 \sum_{i=1}^2 (I_{Gix} + I_{Fix}) \cos \alpha_i \sin \alpha_i \dot{\alpha}_i \dot{\phi} \\ & + \sum_{i=1}^2 I_{Fiy} \cos \alpha_i \dot{\alpha}_i \dot{\theta}_i + M_2 g \sin \phi = d \\ & \sum_{i=1}^2 (I_{Giz} + I_{Fiz}) \ddot{\alpha} + \sum_{i=1}^2 (I_{Gix} + I_{Fix}) \cos \alpha \sin \alpha \dot{\phi}^2 \\ & - \sum_{i=1}^2 (I_{Giy} + I_{Fiy}) \cos \alpha \sin \alpha \dot{\phi}^2 - \sum_{i=1}^2 (I_{Fiy} \dot{\theta}_i) \dot{\phi} \cos \alpha = T_1 \end{aligned}$$

Melinearkan persamaan 3.17, 3.18 dan 3.19 disekitar titik kesetimbangan, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\ddot{\phi} = \frac{M_v}{M_p} \phi - \frac{(I_{F1y} + I_{F2y}) \dot{\theta}}{M_p} \dot{\alpha} + \frac{1}{M_p} d \quad (3.20)$$

$$\ddot{\alpha} = \frac{(I_{F1y} + I_{F2y}) \dot{\theta}}{2I_{GF}} \dot{\phi} + \frac{1}{4I_{GF}} T_1 \quad (3.21)$$

dimana,

$$\begin{aligned} M_p &= m_B h^2_B + I_{Bx} + \sum_{i=1}^2 m_{Gi} h^2_{Gi} + \sum_{i=1}^2 m_{Fi} h^2_{Fi} \\ &+ \sum_{i=1}^2 (I_{Gix} + I_{Fix}) \\ M_v &= \left( m_B h_B + \sum_{i=1}^2 m_{Gi} h_{Gi} + \sum_{i=1}^2 m_{Fi} h_{Fi} \right) g, \\ I_{GF} &= I_{F1z} + I_{G1z} + I_{G2z} + I_{G2z} \end{aligned}$$

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,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{M_v}{M_P} & 0 & 0 & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & 0 \end{bmatrix}$$

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

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

$$a_{43} = \frac{(I_{F_{1y}} + I_{F_{2y}})\dot{\theta}}{2(I_{F_{1z}} + I_{G_{1z}} + I_{G_{2z}} + I_{G_{2z}})}$$

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

### 3.2.2 Persamaan Gerak Model Motor

Torsi  $\tau$  yang dihasilkan oleh motor DC sebanding dengan arus  $I$  dan kuat medan magnet. Asumsikan bahwa medan magnet 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 Kirchoff, dapat dituliskan sebagai berikut:

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

Diketahui bahwa nilai induktansi  $L$  motor DC sangat rendah dibandingkan dengan resistansi  $R$ . maka dapat kita abaikan.

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

Hukum Newton ke 2 untuk motor dinamis.

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

Dimana  $b_m$  merupakan faktor viskositas gesekan bantalan motor, persamaan 3.20 disubstitusikan ke persamaan 3.24, didapatkan:

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

Substitusikan persamaan 3.23 ke persamaan 3.25, 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 3.30 menjadi:

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

jika,  $\alpha_m = \alpha$  dan  $\tau_a = \tau_1$

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

Substitusikan persamaan 3.31 ke persamaan 3.18, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} &= \frac{(I_{F_1 y} + I_{F_2 y}) \dot{\theta}}{2I_{GF}} \dot{\phi} + \left( \frac{k_m}{4I_{GF} R} v_a - \frac{k_m k_e}{4I_{GF} R} \dot{\alpha} - \frac{I_m}{4I_{GF}} \ddot{\alpha} \right) \\ \left( 1 + \frac{I_m}{4I_{GF}} \right) \ddot{\alpha} &= \frac{(I_{F_1 y} + I_{F_2 y}) \dot{\theta}}{2I_{GF}} \dot{\phi} + \frac{k_m}{4I_{GF} R} v_a - \frac{k_m k_e}{4I_{GF} R} \dot{\alpha} \\ (4I_{GF} + I_m) \ddot{\alpha} &= (2I_{GF} (I_{F_1 y} + I_{F_2 y}) \dot{\theta}) \dot{\phi} + \frac{k_m}{R} v_a - \frac{k_m k_e}{R} \dot{\alpha} \\ \ddot{\alpha} &= \frac{2I_{GF} (I_{F_1 y} + I_{F_2 y}) \dot{\theta}}{(4I_{GF} + I_m)} \dot{\phi} + \frac{k_m}{(4I_{GF} + I_m) R} v_a - \frac{k_m k_e}{(4I_{GF} + I_m) R} \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Sehingga persamaan state space 3.19 dapat dituliskan sebagai berikut:

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

dimana,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{M_v}{M_P} & 0 & 0 & a_{34} \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

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

$$a_{43} = \frac{2I_{GF}(I_{F1y} + I_{F2y})\dot{\theta}}{(4I_{GF} + I_m)}$$

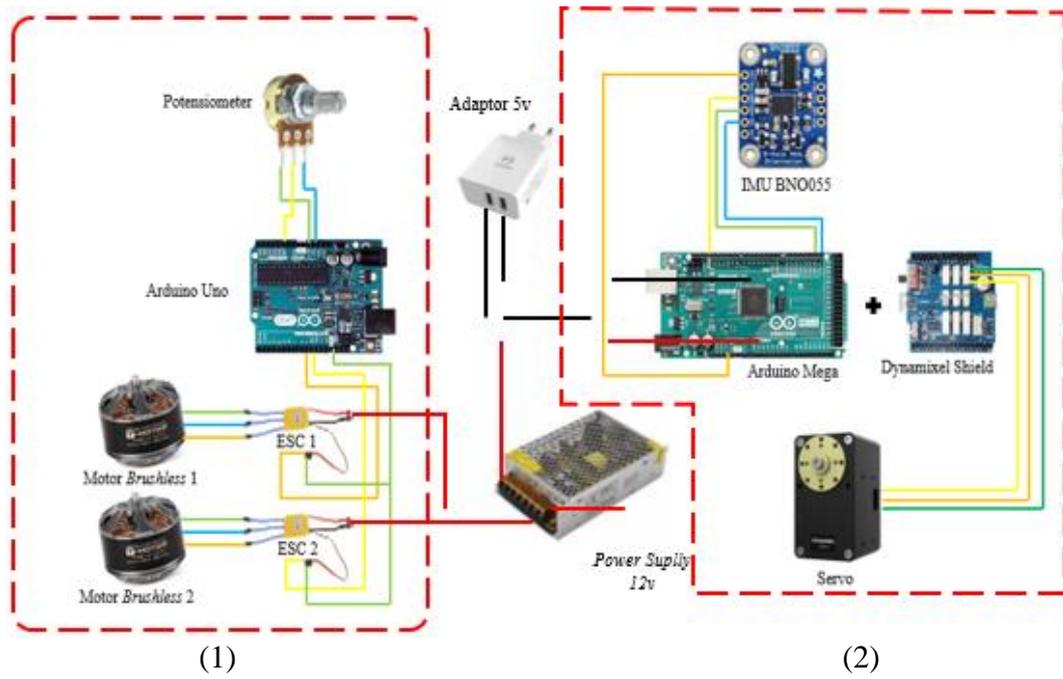
$$a_{44} = \frac{k_m k_e}{(4I_{GF} + I_m)R}$$

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

### 3.6. Wiring Komponen Elektronik

Pada motor BLDC terdapat 3 kabel, 2 kabel sebagai sumber energi masing-masing motor BLDC menggunakan *power supply* 12V yang terhubung pada ESC. Sebagai kontrol kendali motor BLDC melalui ESC terhubung ke arduino uno dengan pin 9, pin 10 dan 2 pin ground. Kemudian untuk potensiometer yang mengontrol kecepatan motor terhubung pada arduino uno dengan pin vcc, ground dan A0, arduino sendiri terhubung pada adaptor 5V sebagai sumber energi.

Pada kontroler arduino mega terhubung ke *power supply 12V* sebagai tegangan untuk servo dan terhubung ke adaptor 5V sebagai sumber arduino mega itu sendiri. Terdapat *hardware dynamixel shield* yang terhubung ke arduino mega sebagai kontrol servo, pin pada servo terhubung ke *dynamixel shield*. Servo tersebut yang akan mentransmisikan langsung ke gimbal. Untuk sensor IMU terhubung ke arduino mega dengan pin vcc, ground, SDA, SDL. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Wiring komponen elektronika (1) arduino uno; (2) arduino mega

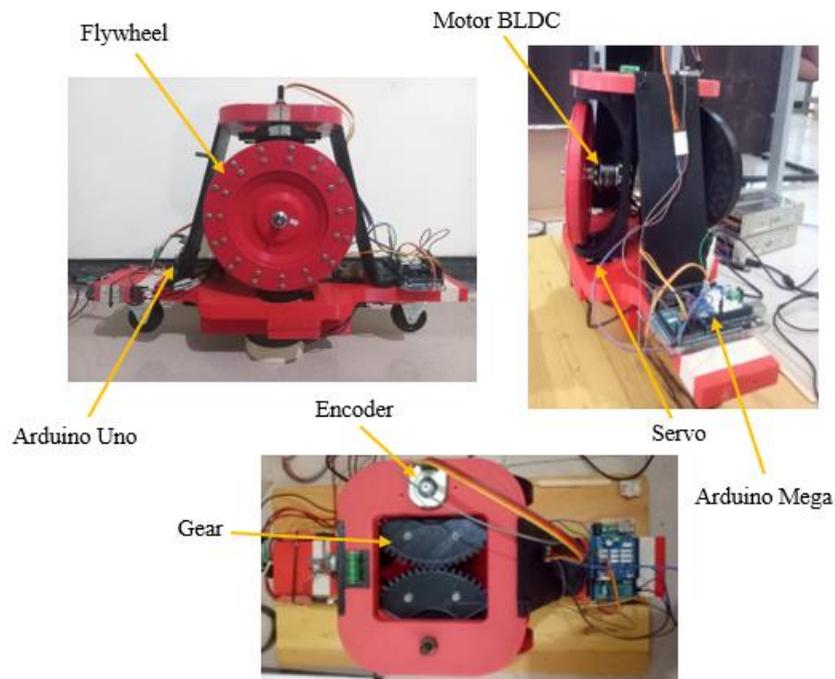
*(Halaman sengaja dikosongkan)*

## Bab 4

### HASIL PENELITIAN

#### 4.1 Prototipe *Self-Balancing*

Hasil dari pencetakan prototipe yang akan digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 4.1. Prototipe dicetak menggunakan printer 3D dengan bahan plastik jenis PLA. Wiring juga sudah dilakukan pada prototipe yang saling terhubung pada aktuator dan sensor. Dengan pembuatan prototipe tersebut pengujian secara eksperimen dapat dilakukan.



Gambar 4.1 Prototipe Self-Balancing

##### 4.1.1 Verifikasi Sensor dan Aktuator

Dalam melakukan penelitian sebelum menggunakan sensor dan aktuator diperlukan proses verifikasi yang bertujuan untuk mengetahui tingkat keakuratan pada sensor dan aktuator yang dipakai. 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)

a. Verifikasi Pembacaan Sudut Servo

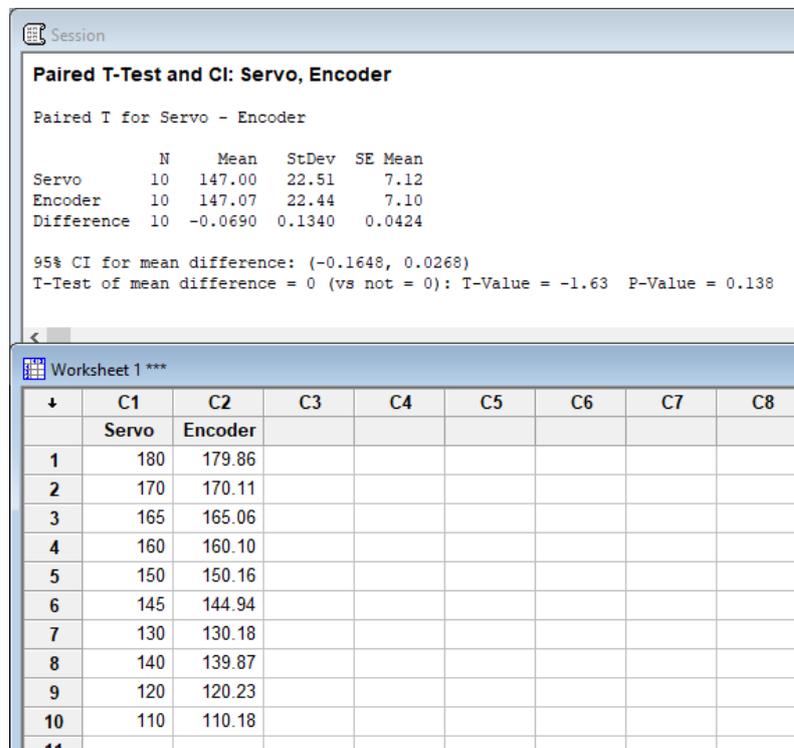
Pada verifikasi pembacaan sudut servo ini dilakukan pengamatan terhadap hasil sudut yang dibentuk oleh servo terhadap pembacaan encoder, dimana pembacaan sudut servo pada serial monitor akan dibandingkan dengan pembacaan sudut pada encoder, dengan posisi gimbal lurus membentuk sudut  $180^\circ$  merupakan posisi 0 gimbal.

Tabel 4.1 Hasil pembacaan sudut servo dan encoder

Pengujian Ke-	Sudut (derajat)	
	Pembacaan Serial Monitor	Pembacaan Encoder
1	180	179.86
2	170	170.19
3	165	165.06
4	160	160.1
5	150	150.16
6	145	144.94
7	130	130.18
8	140	139.87
9	120	120.23
10	110	110.18

Pengujian *paired sample t-test* pada *minitab* dapat dilihat pada Gambar 4.2. 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..



Gambar 4.2 Uji paired sample T-test pada pembacaan servo di minitab

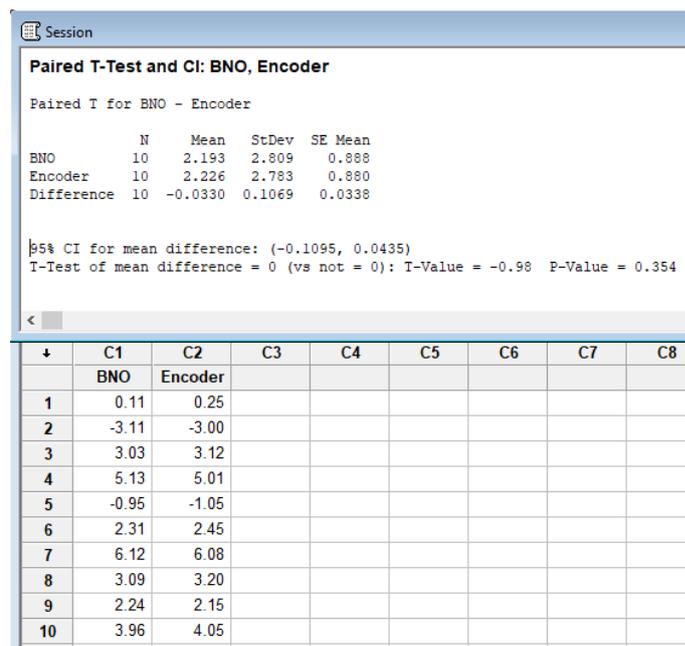
b. Verifikasi Pembacaan Sudut IMU

Verifikasi pembacaan sudut pada IMU BNO055 ini dilakukan untuk mengetahui seberapa akurat data yang ditampilkan oleh IMU terhadap kemiringan prototipe. Verifikasi dilakukan dengan membandingkan pembacaan IMU dengan pembacaan encoder, dimana pada posisi berdiri tegak lurus merupakan posisi 0° prototipe.

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 0.354, 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.

Tabel 4.2 Hasil pembacaan sudut IMU dan encoder

Pengujian Ke-	Sudut (derajat)	
	Pembacaan IMU pada Serial Monitor	Pembacaan Encoder
1	0,11	0,25
2	-3,11	-3,00
3	3,03	3,12
4	5,13	5,01
5	-0,95	-1,05
6	2,31	2,45
7	6,12	6,08
8	3,09	3,20
9	2,24	2,15
10	3,96	4,05



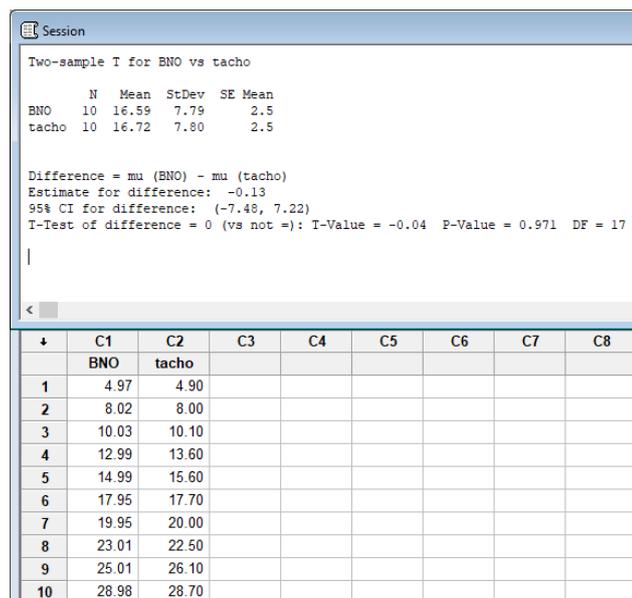
Gambar 4.3 Uji paired sample T-test pada pembacaan IMU di minitab

c. Verifikasi Pembacaan Kecepatan Sudut IMU

Verifikasi pembacaan kecepatan sudut IMU BNO055 dilakukan dengan membandingkan pembacaan sensor yang ditampilkan pada serial monitor dengan alat ukur tachometer. Penempatan sensor berada pada *base* bagian tengah. Hasil pembacaan IMU terhadap pembacaan *tachometer* dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil pembacaan kecepatan sudut IMU dan pembacaan tachometer

Pengujian Ke-	Kecepatan Sudut (RPM)	
	Pembacaan IMU	Pembacaan Tachometer
1	4,97	4,90
2	8,02	8,00
3	10,03	10,10
4	12,99	13,60
5	14,99	15,60
6	17,95	17,70
7	19,95	20,00
8	23,01	22,50
9	25,01	26,10
10	28,98	28,70



Gambar 4.4 Uji paired sample T-test pada pembacaan kecepatan IMU di minitab

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

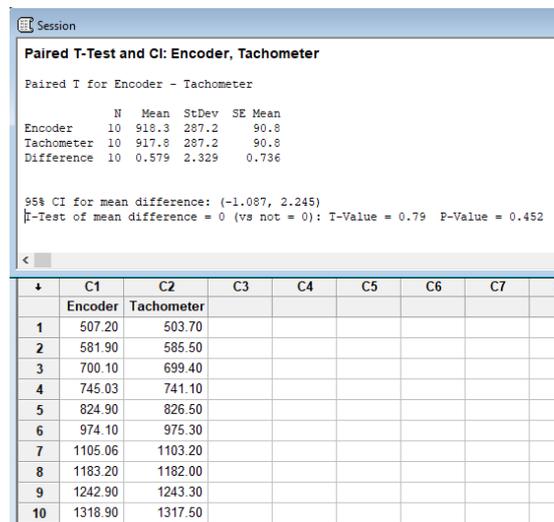
95%, maka dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan nilai yang signifikan antara sensor BNO055 dengan tachometer

d. Verifikasi Pembacaan Kecepatan Encoder

Verifikasi pembacaan kecepatan sudut encoder dilakukan dengan membandingkan pembacaan kecepatan sudut encoder dengan pembacaan alat ukur *tachometer*. Sensor encoder dipasang untuk mengetahui kecepatan putaran yang dihasilkan gimbal. Hasil pembacaan kecepatan encoder terhadap pembacaan alat ukur *tachometer* dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil pembacaan kecepatan encoder dan pembacaan tachometer

Pengujian Ke-	Kecepatan Sudut (RPM)	
	Pembacaan Encoder	Pembacaan Tachometer
1	507,20	503,70
2	581,90	585,50
3	700,10	699,40
4	745,03	741,10
5	824,90	826,50
6	974,10	975,30
7	1105,06	1103,20
8	1183,20	11820
9	1242,90	1243,30
10	1318,90	1317,50



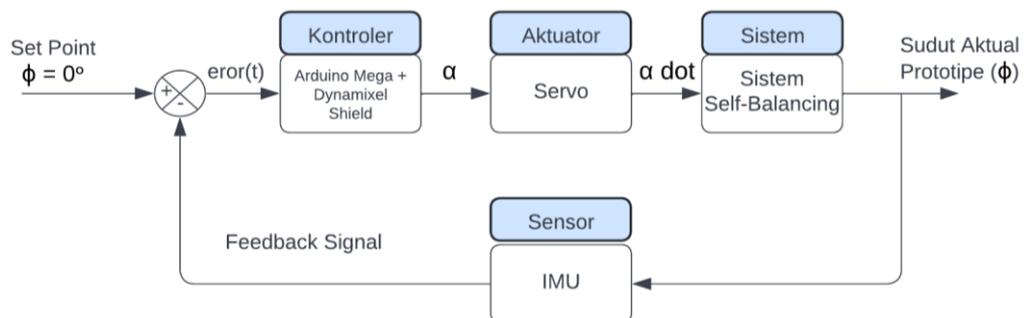
Gambar 4.5 Uji paired sample T-test pada kecepatan encoder di minitab

Pengujian *paired sample t-test* pada *minitab* dapat dilihat pada Gambar 4.5. 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.

## 4.2 Desain Sistem Kendali PID

Sistem kendali yang akan diterapkan pada penelitian ini yaitu *Proportional Integral derivative* (PID). Sistem kontrol PID didesain untuk digunakan pada sistem prototipe *self-balancing* kontrol momen giroskop agar prototipe dapat mempertahankan pada posisi tegak (seimbang). Gambar 4.6 merupakan blok diagram pengendalian PID dari sistem *self-balancing* kendaraan roda dua, dimana kondisi awal dari prototipe berada pada sudut 0 derajat, atau pada posisi tegak vertikal.

Dalam mendesain sistem kontrol PID diperlukan nilai gain  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang dapat membuat sistem agar tetap seimbang pada posisi tegak. Penentuan nilai gain dilakukan menggunakan metode *trial error* pada prototipe dengan melihat respon yang dihasilkan oleh sistem. Flywheel berputar konstan dengan kecepatan 1800rpm. Respon yang dihasilkan oleh prototipe dirangkum pada Tabel 4.5 – Tabel 4.7.



Gambar 4.6 Blok diagram pengendalian sistem PID

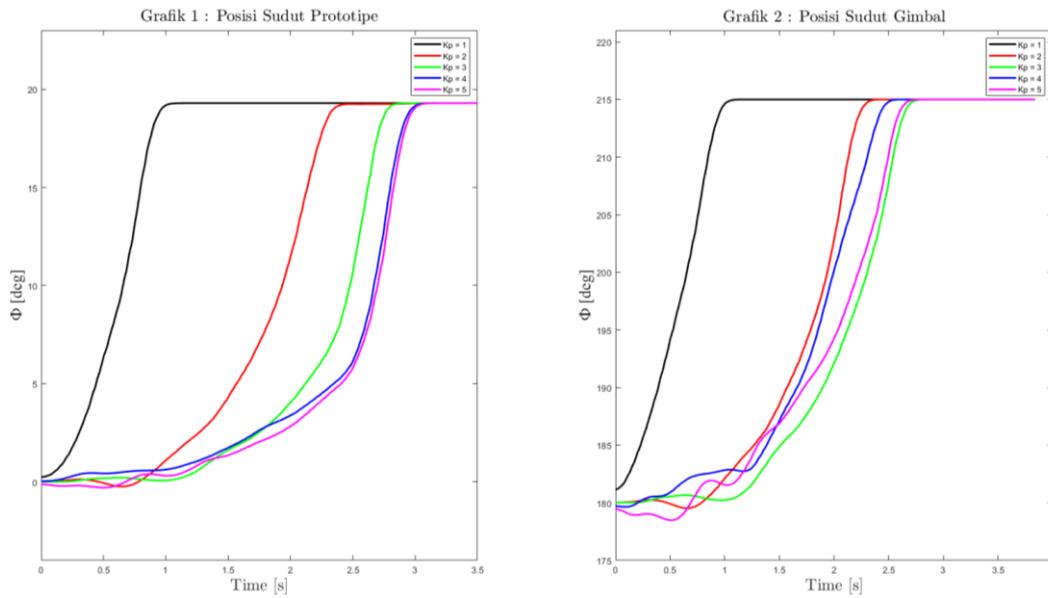
Tabel yang dibuat berdasarkan analisa respon terhadap grafik dari setiap pengubahan nilai parameter hingga didapatkan nilai yang memiliki respon paling mendekati titik setimbang. Pemilihan nilai parameter tidak hanya didasarkan pada lamanya prototipe dapat mempertahankan pada posisi tegak, juga melihat respon putaran gimbal dari perubahan kemiringan prototipe. Kriteria yang diambil dalam pemilihan nilai parameter Kp yaitu respon sudut gimbal yang tidak over responsif terhadap kemiringan prototipe.

Tabel 4.5 Respon tunning nilai Kp

Kp	Ki	Kd	Respon
1	0	0	Gimbal berputar terlalu lambat terhadap kemiringan prototipe
2	0	0	Respon gimbal lambat terhadap kemiringan prototipe
3	0	0	Respon gimbal sesuai dengan kemiringan prototipe
4	0	0	Putaran gimbal lebih cepat terhadap kemiringan prototipe
5	0	0	Putaran gimbal terlalu cepat terhadap kemiringan prototipe

Nilai Kp merupakan nilai penguat (pengali), semakin besar nilai Kp akan semakin cepat respon yang diberikan dari sistem terhadap prototipe. Pada nilai Kp = 1, berdasarkan grafik sudut prototipe seperti pada Gambar 4.7, saat prototipe mengalami kemiringan, respon yang dihasilkan gimbal tidak menunjukkan over responsif pada prototipe, namun respon gimbal sebanding dengan kemiringan prototipe, sehingga putaran gimbal tidak dapat mengembalikan prototipe ke posisi tegak. Karena untuk mengembalikan prototipe ke posisi tegak memerlukan respon yang cepat dan tepat agar tidak menghasilkan respon yang berlebihan sebelum prototipe jatuh.

Pada nilai Kp = 2, berdasarkan grafik sudut prototipe, respon yang diberikan dapat mempertahankan prototipe pada posisi tegak selama 0,7 detik sebelum prototipe jatuh. Dilihat dari sudut gimbal, pada detik 0,3 prototipe mengalami kemiringan sebesar 1,5 derajat, pada waktu yang sama gimbal merespon kemiringan tersebut sebagai error dan kemudian gimbal berputar sebesar 0,3 derajat.



Gambar 4.7 Grafik respon tuning Kp

untuk mengembalikan prototipe ke posisi tegak. Kemudian prototipe mengalami kemiringan kembali namun putaran gimbal tidak cukup kuat untuk mengembalikan prototipe ke posisi tegak, dan prototipe jatuh. Jika dibandingkan dengan nilai  $K_p = 1$ , nilai  $K_p = 2$  memiliki respon yang lebih baik karena dapat mempertahankan prototipe selama 0,7 detik pada posisi tegak.

Selanjutnya dengan nilai  $K_p = 3$ , berdasarkan respon pada grafik sudut prototipe, prototipe dapat mempertahankan pada posisi tegak selama 1,1 detik dan kemudian jatuh. Ditinjau dari grafik sudut gimbal, pada detik ke 0,3 prototipe mengalami kemiringan sebesar 0,03 derajat, pada saat itu gimbal memberikan respon dengan berputar untuk mengembalikan posisi prototipe pada posisi tegak. Putaran gimbal tidak over responsif, dapat ditunjukkan pada grafik tidak ada kenaikan atau penurunan yang signifikan pada grafik yang menandakan gimbal tidak over responsif. Pada kemiringan maksimal prototipe sebesar 0,25 derajat pada detik 0,65, respon gimbal berputar 0,73 derajat kemudian prototipe kembali ke posisi tegak. Jika dibandingkan dengan nilai  $K_p = 2$ , nilai  $K_p = 3$  lebih baik karena dapat mempertahankan prototipe pada posisi tegak selama 1 detik, hal tersebut dikarenakan respon gimbal dengan  $K_p = 3$  lebih cepat dibandingkan  $K_p = 2$ .

Pada nilai  $K_p = 4$ , prototipe mengalami kemiringan pada detik 0,1 sebesar 0,07 derajat. Berdasarkan respon gimbal pada waktu yang sama, gimbal merespon dengan berputar sebesar 0,57 derajat. Dibandingkan dengan  $K_p = 3$ , respon gimbal pada  $K_p = 4$  lebih cepat yang mengakibatkan osilasi seperti ditunjukkan pada Gambar 4.6. Sehingga putaran gimbal dapat dikatakan mengalami over responsif, dan nilai  $K_p = 4$  tidak lebih baik daripada nilai  $K_p = 3$ .

Dengan nilai  $K_p = 5$  respon prototipe berosilasi yang menandakan prototipe sulit untuk mencapai posisi tegak mendekati 0 derajat. Berdasarkan grafik pada detik 0,1 prototipe mengalami kemiringan sebesar 0,2 derajat, pada waktu yang sama respon gimbal berputar sebesar 1,05 derajat. Dibandingkan dengan nilai  $K_p = 3$ , respon gimbal pada  $K_p = 5$  mengalami over responsif yang ditunjukkan pada Gambar 4.7 grafik sudut gimbal berosilasi cukup besar yang mengakibatkan prototipe oleng dan jatuh.

Setelah dilakukan analisa seperti yang dijelaskan di atas, maka nilai  $K_p = 3$  digunakan sebagai nilai parameter yang digunakan pada prototipe penelitian ini.

Tabel 4.6 Respon tunning nilai  $K_p$  dan  $K_i$

$K_p$	$K_i$	$K_d$	Respon
3	1	0	Prototipe jatuh karena respon gimbal terlalu cepat
3	2	0	Prototipe jatuh karena dengan sedikit kemiringan respon gimbal sangat cepat
3	0.1	0	Tidak bisa menyeimbangkan karena putaran gimbal terlalu cepat
3	0.01	0	Bisa menyeimbangkan selama kurang dari 30detik kemudian jatuh
3	0.001	0	Prototipe jatuh karena putaran gimbal lambat

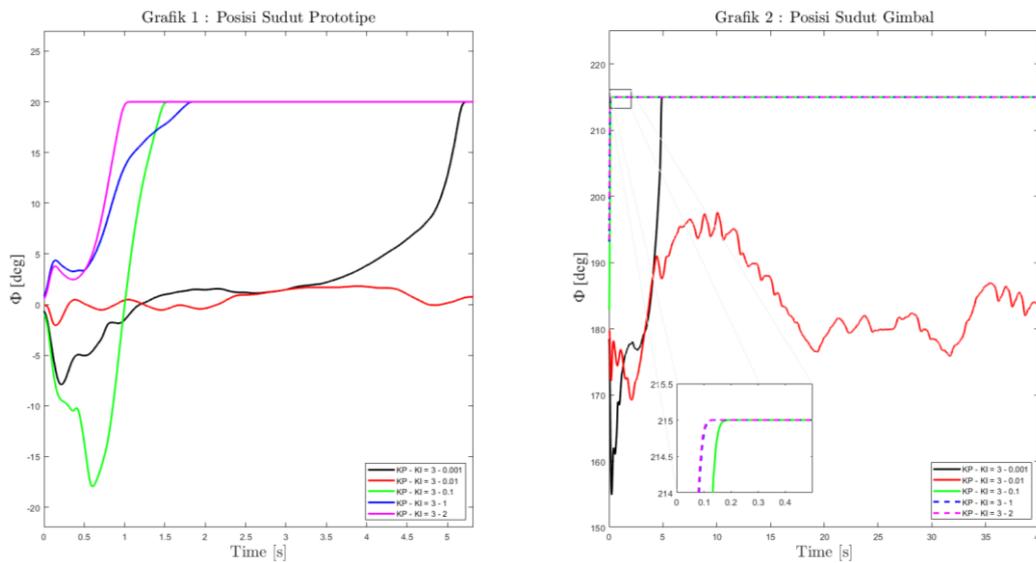
Kemudian melakukan tunning nilai  $K_i$ , dimana nilai  $K_i$  dapat memperbaiki respon *steady-state*, sehingga pada pemilihan nilai  $K_i$  yang tidak sesuai dapat mengakibatkan *transient response* yang tinggi, sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Pada nilai  $K_i = 1$  respon prototipe berosilasi sangat besar berdasarkan Gambar 4.8 pada detik 0,16 kemiringan prototipe sebesar 4,3 derajat, hal tersebut dikarenakan respon gimbal pada detik 0,91 berputar sebesar 35derajat yang mengakibatkan putaran gimbal mencapai batas maksimum dan prototipe jatuh

pada detik 1,7. Sehingga dengan nilai  $K_i = 1$  menyebabkan *transient response* yang tinggi yang mengakibatkan prototipe tidak seimbang.

Nilai  $K_i = 2$  berdasarkan grafik respon Gambar 4.8 memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan nilai  $K_i = 1$ . jadi *transient response* yang dihasilkan lebih besar daripada  $K_i = 1$ . Pada nilai  $K_i = 0,1$ , prototipe pada detik 0,01 mengalami kemiringan sebesar 0,7 derajat, respon gimbal berputar sebesar 35 derajat. Trend yang dihasilkan pada  $K_i = 0,01$  hampir sama dengan nilai  $K_i = 1$  dan  $K_i = 2$ , namun waktu yang dibutuhkan gimbal hingga mencapai sudut maksimal lebih lama 0,1 detik daripada respon pada nilai  $K_i = 1$  dan  $K_i = 2$ . Kemudian dari hasil tersebut memutuskan untuk menurunkan nilai parameter  $K_i$ .

Pada percobaan nilai  $K_i = 0,01$  didapatkan respon pada grafik berdasarkan sudut prototipe bahwa pada detik 0,04 prototipe mengalami kemiringan sebesar 0,2 derajat. Dalam waktu yang sama gimbal dapat merespon kemiringan tersebut dengan memutar gimbal sebesar 0,6 derajat untuk membawa prototipe kembali ke posisi tegak. Dapat dilihat pada Gambar 4.8, grafik respon menunjukkan prototipe dapat seimbang dengan osilasi gimbal yang tinggi selama 60detik.

Pada nilai  $K_i = 0,001$  memberikan efek pada prototipe yang dapat menyeimbangkan selama 3,5 detik. Dikarenakan nilai  $K_p$  terlalu kecil yang menyebabkan transient response menjadi rendah, sehingga prototipe sulit untuk mencapai keseimbangan. Berdasarkan analisa tersebut, pada penelitian ini menggunakan nilai  $K_i = 0,01$  karena memiliki *transient response* yang tidak terlalu tinggi yang mengakibatkan prototipe dapat mencapai keadaan seimbang.



Gambar 4.8 Grafik respon tuning  $K_p, K_i$

Kemudian penentuan nilai  $K_d$ , pada pemberian nilai  $K_d$  ini berperan sebagai konstanta yang dapat mengurangi efek respon yang berlebihan pada sistem dalam menuju *steady-state*. Pada nilai  $K_d = 1$  berdasarkan sudut prototipe, alat dapat menyeimbangkan selama 60 detik dengan osilasi tertinggi sebesar 5,5 derajat kemudian jatuh. Ditinjau dari sudut gimbalnya, grafik pada Gambar 4.9 menunjukkan osilasi gimbal yang tinggi, dengan osilasi yang tidak teratur menunjukkan bahwa masih terdapat respon yang berlebihan pada gimbal, yang mengakibatkan sulit untuk membawa prototipe pada keadaan seimbang, hingga akhirnya pada detik 61,5 prototipe mengalami kehilangan keseimbangan dan kemudian jatuh.

Selanjutnya pada nilai  $K_d = 0,1$  grafik sudut prototipe menunjukkan sistem memiliki respon yang berlebihan, sehingga dengan nilai  $K_d$  yang kecil tidak mampu mengurangi efek respon yang berlebihan pada putaran gimbal terhadap kemiringan prototipe yang ditunjukkan pada sudut prototipe saat detik 0,2 mengalami kemiringan sebesar 4,2 derajat, kemudian respon gimbal pada waktu yang sama berputar sebesar 18,3 derajat, sudut putaran yang besar mengakibatkan prototipe oleng dan akhirnya jatuh.

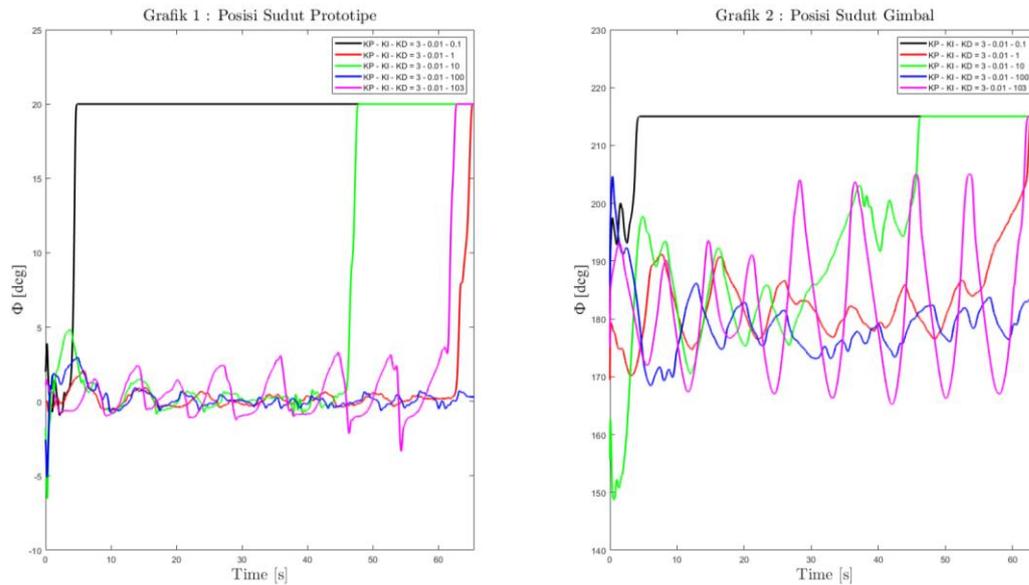
Tabel 4.7 Respon tunning nilai Kp, Ki dan Kd

Kp	Ki	Kd	Respon
3	0.01	1	Putaran gimbal menjadi lambat sehingga prototipe jatuh
3	0.01	0.1	Putaran gimbal semakin lambat
3	0.01	10	Putaran gimbal lambat hanya dapat menyeimbangkan sesaat kemudian prototipe jatuh
3	0.01	100	Putaran gimbal paling sesuai dengan respon kemiringan prototipe, dapat menyeimbangkan selama lebih dari 60detik
3	0.01	103	Dapat menyeimbangkan prototipe tapi putaran gimbal sedikit lebih cepat, menyebabkan prototipe oleng kemudian jatuh.

Berdasarkan analisa tersebut, peneliti memutuskan untuk menambahkan nilai parameter Kd lebih besar untuk mengurangi respon yang berlebihan pada gimbal. Dengan nilai  $Kd = 10$  grafik sudut prototipe menunjukkan keseimbangannya dengan berosilasi mendekati titik seimbang. Berdasarkan grafik sudut gimbal osilasi yang dihasilkan semakin lama semakin mendekati titik keseimbangan. Namun pada detik ke 30,1 gimbal bergerak menjauhi titik seimbang dari prototipe, sehingga gimbal tidak dapat mengembalikan prototipe ke posisi seimbang. Dibandingkan dengan nilai  $Kd = 1$  dan  $Kd = 0,1$ , nilai  $Kd = 10$  memiliki respon yang lebih baik seperti yang ditunjukkan pada grafik Gambar 4.9 dengan osilasi yang awalnya semakin lama semakin mendekati 0 derajat sebelum gimbal mengalami respon yang berlebihan.

Pada nilai  $Kd = 100$  berdasarkan grafik sudut prototipe osilasi terjadi disekitar 0 derajat prototipe, dengan osilasi tertinggi sekitar 0,6 derajat selama lebih dari 60 detik. Respon gimbal sesuai pada grafik memiliki osilasi sekitar 5 derajat dengan semakin lama semakin mendekati titik 0 derajat dan berosilasi disekitar titik keseimbangan tersebut. Selanjutnya dengan nilai  $Kd = 103$  sudut prototipe memiliki respon osilasi yang semakin besar, yang diakibatkan dari putaran gimbal yang semakin lebar sudut putarnya. Dengan melihat grafik pada sudut gimbal, grafik menunjukkan osilasi yang terjadi tidak terdapat getaran atau respon yang berlebihan terhadap kemiringan prototipe, hal tersebut yang mengakibatkan gimbal membutuhkan putaran sudut yang lebih besar untuk menyeimbangkan prototipe, sehingga pada detik ke 61 menunjukkan gimbal tidak dapat mengembalikan

putarannya untuk membawa prototipe ke posisi tegak, sehingga putaran gimbal mencapai batas maksimum yang mengakibatkan prototipe jatuh.



Gambar 4.9 Grafik respon tuning Kp ,Ki, Kd

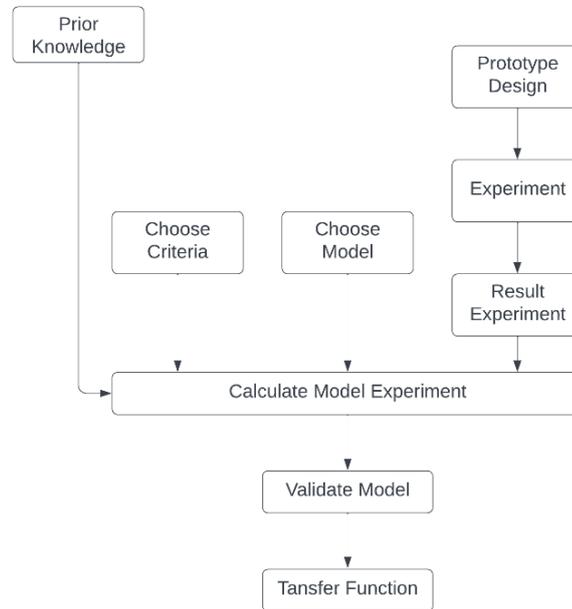
Berdasarkan analisa tersebut, 100 merupakan nilai parameter Kd yang dipilih dalam mengontrol keseimbangan prototipe pada penelitian ini. Sehingga didapatkan nilai Kp, Ki, dan Kd yang mendekati titik keseimbangan pada prototipe yaitu  $K_p = 3$ ,  $K_i = 0.01$ , dan  $K_d = 100$ .

### 4.3 Identifikasi Sistem Prototipe

Sistem identifikasi digunakan sebagai pendekatan terhadap model matematis prototipe. Identifikasi ini menggunakan *system identification tool* (SIT) pada matlab untuk mendapatkan informasi berupa model matematis yang didapat dari hasil analisis data masukan dan keluaran dari sistem prototipe yang telah dikontrol. Data yang menjadi masukan yaitu sudut servo dan yang menjadi keluaran merupakan kemiringan dari prototipe.

Gambar 4.10 merupakan blok diagram tentang identifikasi parameter sistem eksperimen dengan mendesain prototipe kemudian didapatkan data eksperimen yang digunakan sebagai input dan output kemudian didapatkan model matematis.

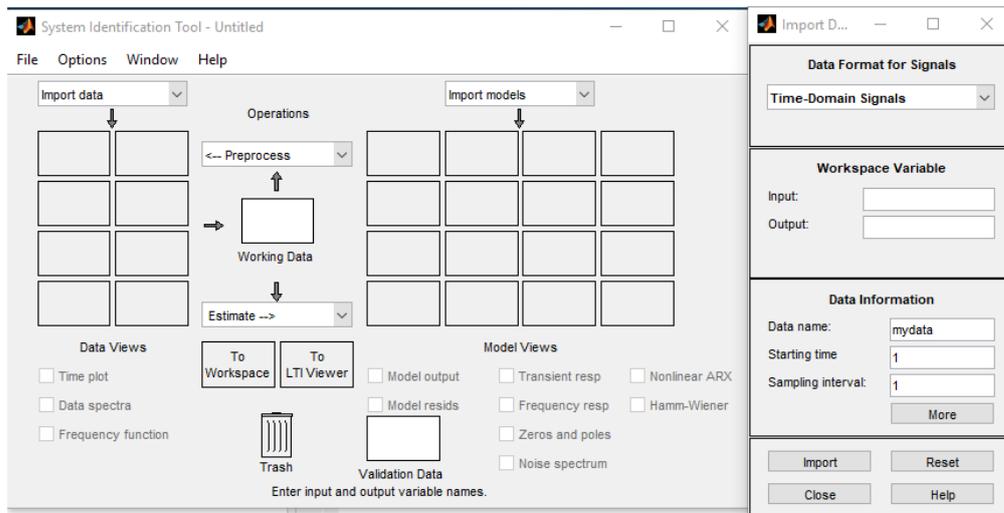
Untuk model matematisnya dapat disesuaikan dengan pengaturan model proses yang diasumsikan.



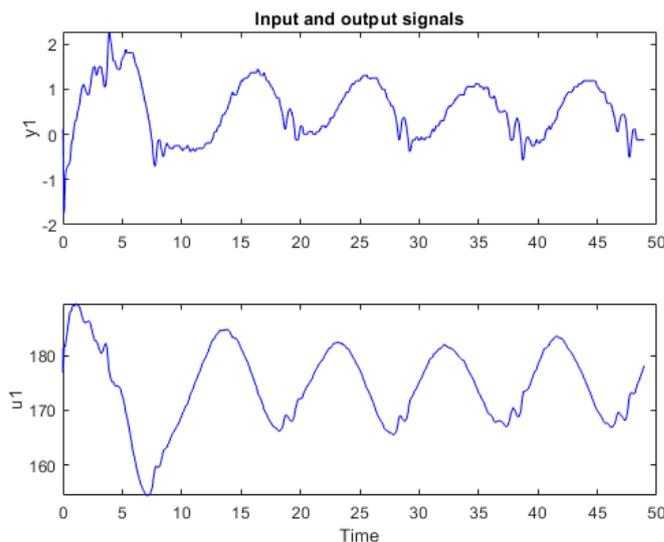
Gambar 4.10 Blok diagram identifikasi berdasarkan estimasi parameter

Dapat dilihat pada Gambar 4.11, pada sisi kiri terdapat tempat untuk memasukkan data impor yang merupakan sebagai data eksperimen yang sudah kita dapat, didalam data impor perlu dimasukkan data berdasarkan *time domain* karena input dan output data hasil eksperimen pada penelitian ini berbasis waktu. Data eksperimen yang dijadikan sebagai input dan output pada sistem identifikasi ini ditunjukkan pada Gambar 4.12 dengan sudut kemiringan gimpal merupakan sebagai input yang ditunjukkan pada grafik  $u_1$ , dan sudut kemiringan prototipe merupakan sebagai output yang ditunjukkan pada grafik  $y_1$ .

Kemudian memilih estimasi model yang ingin digunakan untuk proses analisa selanjutnya, pada penelitian ini memilih estimasi model matematis dari data eksperimen sebagai model *transfer function*, dimana nantinya dari model transfer fuction ini dapat dilihat keseimbangan sistem berdasarkan poles dan zeros dengan melihat posisi poles dan zeros yang jika sistem seimbang akan berada di sebelah kiri dari sumbu imajiner vertikal.



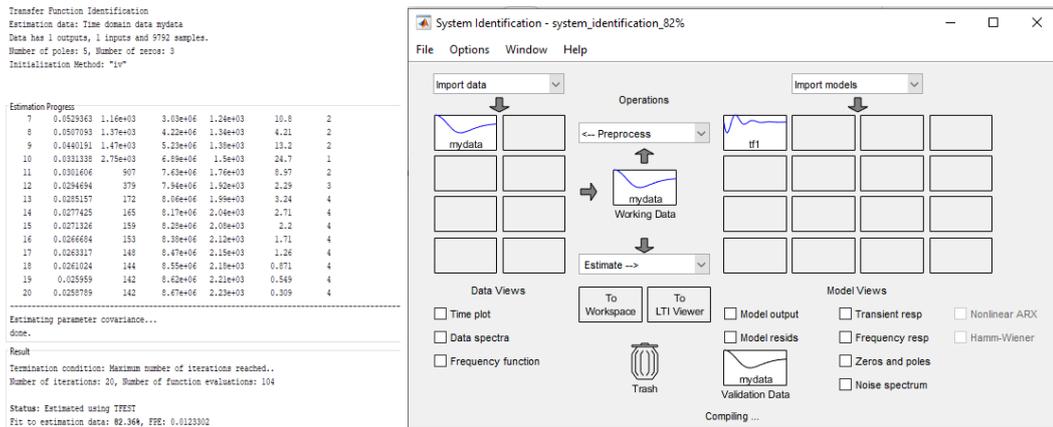
Gambar 4.11 Tampilan system identification toolbox(SIT) matlab



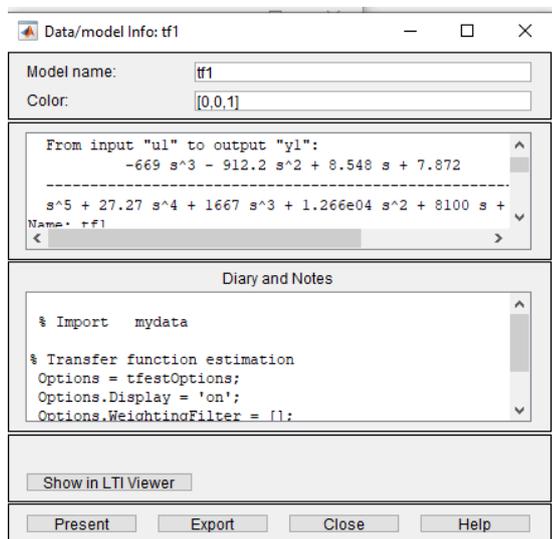
Gambar 4.12 Grafik input dan output sebagai data yang diimpor

Ditentukan dengan jumlah 5 pole dan 3 zero, menggunakan SIT hasil estimasi model matematis dengan iterasi 20 didapatkan *best fit of estimation data* sebesar 82,36%, proses iterasi pada *system identification* menjadi model *transfer function* dapat dilihat pada Gambar 4.13. Untuk hasil *transfer function* yang didapat dari *System Identification Toolbox* ditunjukkan pada Gambar 4.14 dengan jumlah 5 pole dan 3 zero.

$$\frac{-669s^3 - 912.2s^2 + 8.548s + 7.872}{s^5 + 27s^4 + 1667s^3 + 12656s^2 + 8100s + 2665} \quad (4.1)$$



Gambar 4.13 Estimasi progres SIT dengan pole 5 dan zero 3

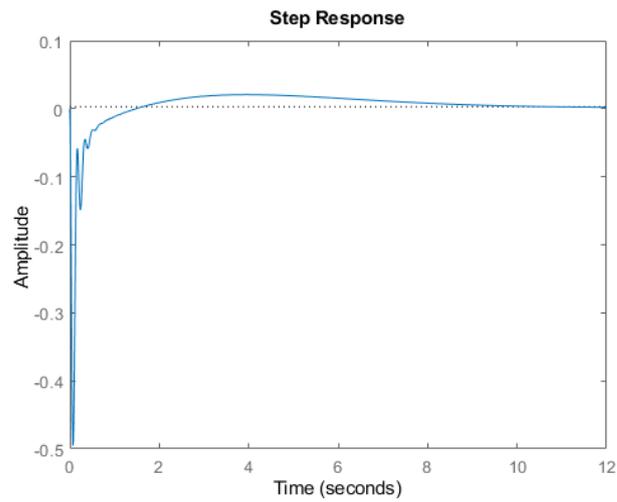


Gambar 4.14 Hasil model matematis transfer function

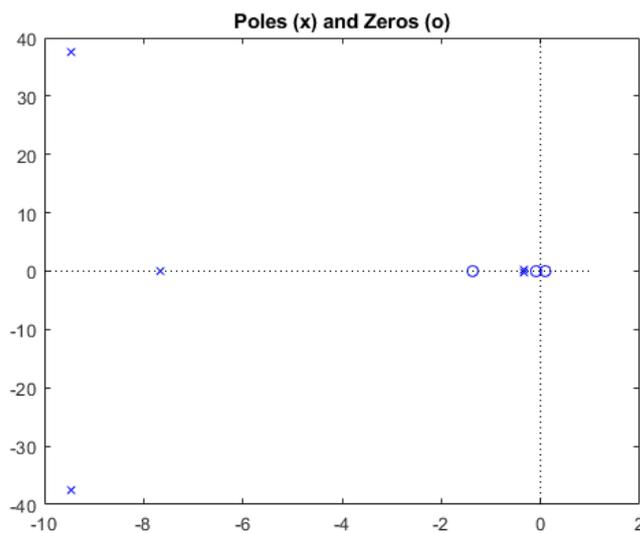
Dari model *transfer function* tersebut didapatkan *transient response* seperti pada Gambar 4.15 yang menunjukkan kestabilan dari sistem prototipe yang telah dibuat. Sebagai pembuktian secara teori bahwa sistem pada prototipe tersebut merupakan sistem yang stabil yaitu dengan melihat posisi *pole* dan *zero* nya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16, dengan meninjau posisi *pole* dan *zero* nya, berdasarkan koordinat sumbu vertikal yang merupakan garis imajiner, terdapat lima *pole* di sebelah kiri dan satu *zero* yang berada di sebelah kanan garis imajiner, sistem dianggap stabil jika semua pole berada pada sisi kiri dari garis imajiner,

sehingga dapat dipastikan sistem dari prototipe yang dibuat merupakan sistem yang stabil. Dengan koordinat posisi pole ditunjukkan pada matriks lamda.

$$\lambda = \begin{bmatrix} -9.3321 + 37.6693i \\ -9.3321 - 37.6693i \\ -7.6673 + 0.0000i \\ -0.3342 + 0.3451i \\ -0.3342 - 0.3451i \end{bmatrix}$$



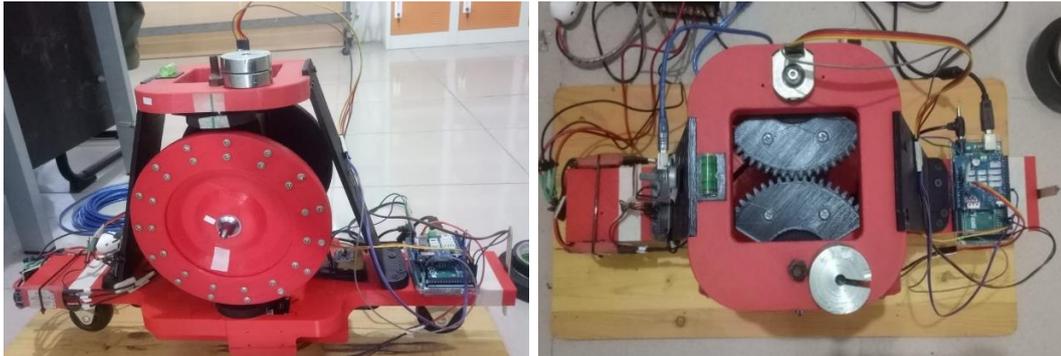
Gambar 4.15 Transient respon sistem pada prototipe dengan pendekatan SIT



Gambar 4.16 Posisi pole dan zero

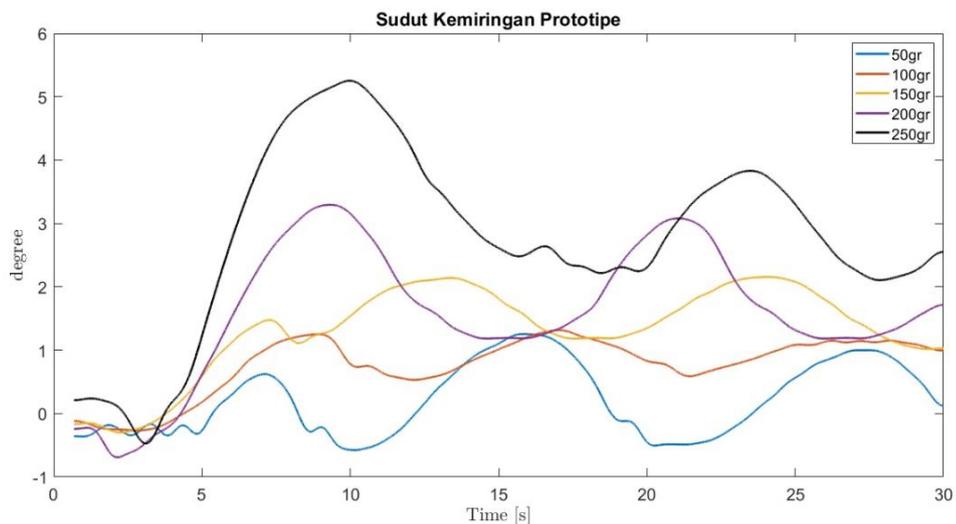
#### 4.4 Penambahan Masa Pada Prototipe

Penambahan masa pada prototipe dilakukan untuk melihat ketahanan prototipe dalam mempertahankan posisi agar tetap berdiri tegak vertikal. Penambahan masa diberikan pada *body* sisi kiri dengan posisi di atasnya gimbal, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Posisi penambahan massa pada body prototipe

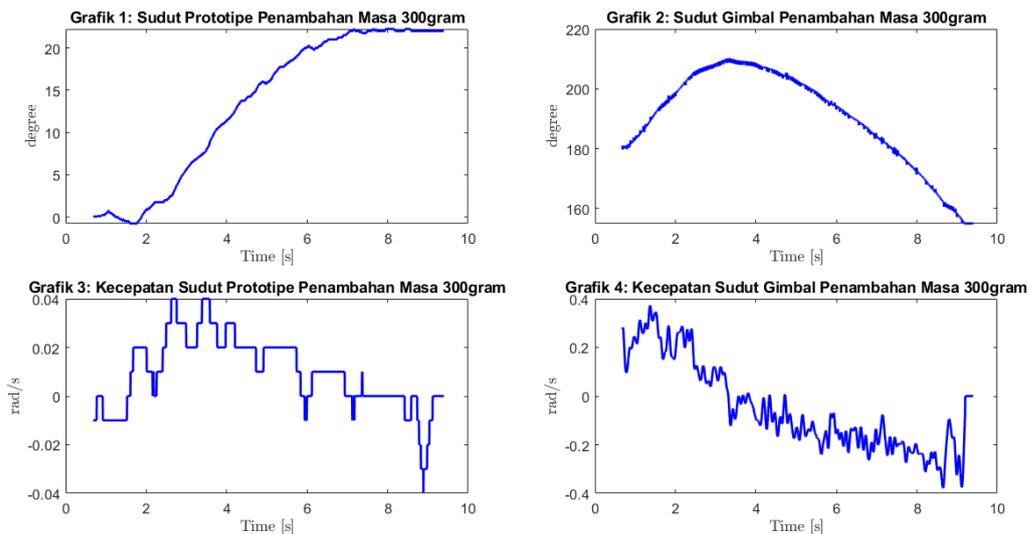
Variasi beban yang diberikan yaitu 50gram, 100gram, 150gram, 200gram, 250gram dan 300gram. Pengujian dilakukan selama 30detik dan respon prototipe direkam dan dianalisa berdasarkan grafik respon.



Gambar 4.18 Grafik respon berdasarkan penambahan massa yang diberikan

Dengan penambahan massa ini akan merubah besaran energi kinetik dan potensial pada prototipe terutama pada *body*, dengan demikian masa momen inersia *body* akan berubah dan *center of gravity* dari *body* akan bergeser. Respon yang ditunjukkan oleh prototipe memiliki suatu kecenderungan dalam mempertahankan kestabilan sistem pada setiap penambahan massa yang diberikan. Berdasarkan grafik respon pada Gambar 4.18, dimana pada pembacaan sudut kemiringan prototipe, semakin besar penambahan massa yang diberikan, semakin bergeser trend penyeimbangan pada prototipe. Dari penambahan massa 50gram hingga 250gram trend keseimbangan sistem semakin tinggi, amplitudo terbesar terjadi pada penambahan massa 250gram dengan kemiringan sudut prototipe 5,25 derajat pada detik 10,03.

Dapat disimpulkan besarnya penambahan massa berbanding lurus dengan amplitudo yang dihasilkan. Amplitudo tinggi disebabkan karena adanya penambahan massa yang menyebabkan gaya berat searah gravitasi. Sehingga dibutuhkan energi yang besar untuk menyeimbangkan sistem menuju setimbang. Selain itu dapat pula dianalisa bahwa pengaruh dari penambahan massa dapat mengubah momen inersia *body*, sehingga posisi *center of gravity* dari *body* bergeser.



Gambar 4.19 Grafik respon penambahan masa 300gram

Pada Gambar 4.19 menunjukkan penambahan massa 300 gram sistem tidak mampu mempertahankan keseimbangannya, dapat dilihat pada perubahan sudut prototipe yang semakin besar dari 0 derajat menuju 20 derajat. Hal tersebut dikarenakan *center of gravity* dari *body* bergeser, kemudian gimbal merespon dengan berputar untuk mengangkat prototipe pada posisi setimbang, karena putaran gimbal memiliki batasan yang bertujuan untuk antara gimbal 1 dan gimbal 2 tidak saling bertabrakan, maka gimbal berhenti pada batas tersebut, sehingga tidak dapat melanjutkan putarannya untuk membawa prototipe ke keadaan setimbang. Yang mengakibatkan prototipe jatuh ke arah posisi penambahan massa karena gaya berat yang searah gaya gravitasi.

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

## **Bab 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian *self-balancing* kendaraan roda dua yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Prototipe kendaraan roda dua dapat diseimbangkan menggunakan sistem giroskopik dengan bantuan sistem kontrol PID.
2. Penerapan sistem kontrol PID dapat diimplementasikan pada prototipe kendaraan roda dua dengan memperhatikan nilai parameter  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ . Pada penelitian ini didapatkan nilai  $K_p = 3$ ,  $K_i = 0.01$  dan  $K_d = 100$  dimana respon yang dihasilkan dapat menyeimbangkan prototipe selama 60 detik.

#### **5.2 Saran**

Saran untuk penelitian selanjutnya mengenai *self-balancing* kendaraan roda dua adalah sebagai berikut:

1. Dari eksperimen yang telah dilakukan terdapat gangguan yang berpengaruh pada sistem prototipe yaitu gangguan getaran dari putaran motor BLDC yang mempengaruhi performa pembacaan IMU. Sehingga dalam proses penyeimbangan kecepatan motor kurang maksimal. Perancangan untuk mengurangi getaran pada IMU dapat dipertimbangkan untuk penelitian selanjutnya.

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Vu Ngoc Kien, Hong Quang Nguyen. *Balancing control of two wheel bicycle problems*. Page 12. Hindawi, 2020.
- [2] B. Susmitha, Harish P., Ashok V., Chandrasekhar M.. *Design and fabrication of self balancing bike using gyroscopic effect*. Page: 33-38. IJERA, 2020.
- [3] R. S. Sharp, "The stability and control of motorcycles," *Journal of mechanical engineering science*, vol. 13, no. 5, pp. 316–329, 1971.
- [4] S. Madhankumar, Rajesh S., Balamurugan R., Prawin Sangkar T. A., Shibin T. S., Nishar A. B.. *Design and modeling of self balancing electric two wheeler using gyroscope*. Vol 7, Page 953-957 *ResearchGate*, 2020.
- [5] Lam P. Y., Tan K. S., "Gyroscope stabilization of a self-balancing robot bicycle". Vol 5 No 6. *Creative Commons*, 2011.
- [6] S. Lee, W. Ham, "Self-stabilizing strategy in tracking control of unmanned electric bicycle with mass balance," *IEEE int. conf. on intelligent robots and systems*, p. 2200-5, 2002.
- [7] Bakarac. P, M. Klau ˇ co, and M. Fikar, "Comparison of inverted pendulum stabilization with PID,LQ , and MPC control," in *2018 Cybernetics & Informatics (K&I)*, pp. 1–6, IEEE, 2018.
- [8] Setiawan Agus, Deddy S., Gunawan D., "Self-Balancing Robot Beroda Dua Dengan Metode PID", *Jurnal Saintek: LPPM, Undiksha Vol. 10 No. 1*, 2021.
- [9] Chairunnas, Andi, Triyoga Ginanjar P., 2018, "Sistem Kontrol Robot Penyeimbang Berbasis Arduino Menggunakan Metode PID Dengan Komunikasi Bluetooth HC-05", *15(02): 140–51*, 2018.
- [10] Bista D, "Understanding and Design of an Arduino-based PID Controller," *Master Thesis, Richmond VA. Virginia Commonwealth University*, 2016.
- [11] Shaon, A K M Ashfaque Shakil et al, "Design and Implementaion of a Self Balancing Robot", *ICMERE*, 2017.
- [12] Chhron Buntheng. "Two wheeled vehicle balancing using control moment gyroscope". *Program Sarjana Teknik Mesin, Thesis. Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2020.

*(Halaman sengaja dikosongkan)*

## LAMPIRAN

### Program Arduino Sistem Kontrol PID

```
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BNO055.h>
#include <utility/imu maths.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

uint16_t BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS = 100;
Adafruit_BNO055 Gyro = Adafruit_BNO055(55, 0x28);

double SetpointAccum;
float adjustment = 1.00;

const uint8_t DXL_ID = 1;
const float DXL_PROTOCOL_VERSION = 2.0;
DynamixelShield dxl;
using namespace ControlTableItem;
float PosisiTuju = 175; // derajat
float PosisiAwal = 175; // derajat

double PitchManipulation, newPitch, finalPitch;
boolean calibration = true;
float Pitch,
vel, encod_velF, encod_vel, encod_rawF, encod_raw, imu_velF, imu_vel, imu_rawF, i
mu_raw;;
boolean adj1 = false;
```

```

boolean adj2 = false;

float k1 = 3; // Kp // 5.72 // 1.9 //1.82 // //3
float k2 = 1000; // Kd // 78.0 // 93.0 //103
float k3 = 0.01; // Ki // 0.0001 // 0.022

unsigned long milliOld;
unsigned long milliNew;
unsigned long dt;

float pitchTarget = 0.0;
float pitchActual;
float pitchError = 0;
float pitchErrorOld;
float pitchErrorChange;
float pitchErrorSlope = 0;
float pitchErrorArea = 0;
float pitchServoVal = 90;

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);

  DEBUG_Serial.begin(57600);
  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);
  dxl.setGoalPosition(DXL_ID, PosisiTuju, UNIT_DEGREE);
}

```

```

void loop() {
  //could add VECTOR_ACCELEROMETER,
  VECTOR_MAGNETOMETER, VECTOR_GRAVITY...
  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;
  }

  newPitch = -Pitch;

  if ( ( calibration) && (newPitch != 0.00) && (newPitch <= 20.0) && (newPitch
  >= -20)) {
    PitchManipulation = newPitch;
    calibration = false;
  }
  if ( PitchManipulation < 0.00 ) pitchActual = newPitch - PitchManipulation;
  else if ( PitchManipulation > 0.00 ) pitchActual = newPitch - PitchManipulation;

  // if ((pitchActual <= 1.00) && (pitchActual >= -1.00)) pitchActual = 0.0;
  encoder.update();
  pitchErrorOld = pitchError;
  pitchError = pitchTarget - pitchActual;
  pitchErrorChange = pitchError - pitchErrorOld;
  milliOld = milliNew;
  milliNew = millis();
  dt = milliNew - milliOld;
  pitchErrorSlope = pitchErrorChange / dt;
  pitchErrorArea = pitchErrorArea + pitchError * dt;

  pitchServoVal = (k1 * pitchError) + (k2 * pitchErrorSlope) + (k3 *
  pitchErrorArea);

  SetpointAccum = SetpointAccum + (pitchServoVal / 5500); // 5500 6500
  if (SetpointAccum <= -0.05) SetpointAccum = -0.05; // -0.05

```

```

else if (SetpointAccum >= 12) SetpointAccum = 12; // 12.00
pitchTarget = SetpointAccum;

int 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(milliNew);
Serial.print(",");
Serial.print(pitchActual);
Serial.print(",");
Serial.print(PosisiTuju);
Serial.print(",");
Serial.print(imu_vel);
Serial.print(",");
Serial.println(encod_vel);

PosisiTuju = PosisiAwal + pitchServoVal;
if (PosisiTuju >= 210) PosisiTuju = 210;
if (PosisiTuju <= 150) PosisiTuju = 150;

dxl.setGoalPosition(DXL_ID, PosisiTuju, UNIT_DEGREE);

imu_velF = imu_vel;
imu_rawF = imu_raw;
encod_velF = encod_vel;
encod_rawF = encod_raw;
}

```

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Madiun, pada tanggal 14 Agustus 1996, anak kedua dari Bapak Sugiono dan Ibu Nur Syarifah Budianti. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SDN Bangunsari 01 pada tahun 2009, kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 01 Geger dan lulus pada tahun 2012, kemudian pada tahun 2015 penulis menyelesaikan pendidikan sekolah menengah atas di SMAN 01 Geger. Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Diploma 4 di Departemen Teknik Mesin dengan jurusan Teknik Mesin Produksi dan Perawatan di Politeknik Negeri Malang dan lulus pada tahun 2019. Kemudian penulis memutuskan untuk melanjutkan pendidikan pada jenjang Strata dua (S2) di Departemen Teknik Mesin di ITS. Pada jenjang magister ini penulis bergabung di Laboratorium Rekayasa Sistem dan Kontrol dan menjadi asisten laboratorium selama satu semester.

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. [nurcandra1996@gmail.com](mailto:nurcandra1996@gmail.com).