

TUGAS AKHIR - TM 141585

**RANCANG BANGUN MEKANISME STABILISASI
DOUBLE-GYROSCOPE PADA KENDARAAN RODA
DUA**

WAYAN EKA PUTRI KSAMAWATI
NRP 2113 100 018

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



TUGAS AKHIR - TM 141585

**RANCANG BANGUN MEKANISME STABILISASI
DOUBLE-GYROSCOPE PADA KENDARAAN RODA
DUA**

**WAYAN EKA PUTRI KSAMAWATI
NRP 2113 100 018**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - TM 141585

**STUDY OF SELF BALANCING MECHANISM OF
TWO-WHEELED VEHICLE WITH
*DOUBLE-GYROSCOPE***

WAYAN EKA PUTRI KSAMAWATI
NRP 2113 100 018

Advisor
Dr.Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

**RANCANG BANGUN MEKANISME STABILISASI
DOUBLE-GYROSCOPE PADA KENDARAAN RODA
DUA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

WAYAN EKA PUTRI KSAMAWATI
NRP. 2113 100 018

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Agus Sigit Pramono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196508101991021001
2. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT (Penguji I)
NIP. 196807061999031004
3. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E (Penguji II)
NIP. 196511031990021001
4. Alief Wikarta, ST, M.Eng, PhD. (Penguji III)
NIP. 198202102006041002

SURABAYA

JULI, 2017

RANCANG BANGUN MEKANISME STABILISASI DOUBLE-GYROSCOPE PADA KENDARAAN RODA DUA

Nama : Wayan Eka Putri Ksamawati
NRP : 2113100018
Jurusan : Teknik Mesin ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

Abstrak

Di seluruh dunia, jumlah kasus kematian kecelakaan lalu lintas yang disebabkan oleh pengguna kendaraan bermotor menyumbang 23% kasus dari 1.25 juta kasus. Indonesia termasuk negara pengguna kendaraan bermotor roda dua nomor tiga terbesar di dunia setelah India dan China. Beragam kasus kecelakaan lalu lintas yang dialami khususnya kendaraan roda dua, yakni tabrakan dari depan, tabrakan dari belakang, dan tabrakan di belokan jalan raya. Pada kondisi tabrakan, posisi kendaraan roda dua tersebut mengalami perubahan yang membuat adanya simpangan berupa sudut terhadap posisi tegak/stabil awal. Tugas akhir ini bertujuan untuk mengevaluasi adanya fenomena perubahan posisi kendaraan tersebut dari segi kinematika dan dinamika sehingga dapat dibuat sebuah sistem stabilisasi kendaraan yang memungkinkan kendaraan kembali ke posisi awal karena adanya pengaruh putaran dari benda rigid lainnya yang akan ditambahkan pada kendaraan. Sistem stabilisasi ini dinamakan stabilisasi giroskopik.

Pada tugas akhir ini, sistem stabilisasi yang digunakan yakni stabilisasi double giroskop yang menggunakan dua buah benda rigid yang berputar pada suatu sistem kendaraan tidak stabil. Pengujian dilakukan pada model kendaraan skala kecil dan dievaluasi secara teoritis, simulasi 3D menggunakan Autodesk Inventor 2016, dan eksperimen. Ketiga cara evaluasi tersebut diberi input berupa variasi sudut kemiringan kendaraan (ϑ), dan posisi awal gimbal (α) dengan output berupa putaran giroskop (Ω)

yang dapat menstabilkan kendaraan. Pada simulasi 3D, putaran giroskop diperoleh melalui trial and error yakni dengan menginputkan besar putaran giroskop sampai diperoleh keadaan stabil yang diinginkan. Output lainnya yang akan didapatkan yakni waktu yang diperlukan agar sistem stabil. Output yang didapat tersebut akan dibandingkan satu sama lain. Sudut awal kemiringan kendaraan yang divariasikan mulai dari 0 derajat sampai 5 derajat untuk tiap jenis evaluasi yang dilakukan.

Hasil yang diperoleh secara teoritis yakni kecepatan putar flywheel tertinggi sebesar 7544 rpm pada sudut kemiringan awal kendaraan 4 derajat dan terendah sebesar 5600 rpm pada sudut awal kemiringan kendaraan 0 derajat. Sedangkan berdasarkan simulasi diperoleh kecepatan putar flywheel tertinggi 7700 rpm pada sudut awal kemiringan kendaraan 4 derajat dan terendah 5700 rpm pada kemiringan awal kendaraan 1 derajat. Berdasarkan eksperimen, kecepatan putar flywheel tertinggi yakni 3353 rpm pada sudut awal kemiringan kendaraan 4 derajat dan terendah yakni 2207 rpm pada sudut kemiringan kendaraan 0 derajat. Perbandingan yang dilakukan yakni antara kecepatan putar flywheel yang digunakan, waktu stabilisasi, dan osilasi sudut kendaraan dengan variasi sudut awal kemiringan kendaraan. Berdasarkan trendline dari ketiga jenis evaluasi tersebut, semakin besar sudut awal kendaraan, semakin besar pula nilai putaran flywheel yang digunakan.

Kata kunci: double-giroskop, gimbale, giroskop, kendaraan, roda dua, stabilisasi

STUDY OF SELF BALANCING MECHANISM OF TWO-WHEELED VEHICLE WITH DOUBLE-GYROSCOPE

Student Name : Wayan Eka Putri Ksamawati
NRP : 2113100018
Major : Teknik Mesin ITS
Advisor : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

Abstract

Across the world, the number of cases of traffic accident deaths caused by motor vehicle users contributed 23% of cases of 1.25 million cases. Indonesia is among countries using the two-wheeled motor vehicle third-largest in the world after India and China. Various cases of traffic accidents suffered especially two-wheeled, which collision from the front, rear-end collisions, and collisions on motorway curves. On the condition of a collision, the position of two-wheeled vehicles undergo changes that make the deviation in the form of an angle to an upright position early. This thesis aims to evaluate the phenomenon of change in the position of the vehicle in terms of kinematics and dynamics so that it can be made a vehicle stabilization system that allows the vehicle back to its original position due to the influence of the rotation of the other rigid body that will be added to the vehicle. This stabilization system called gyroscopic stabilization.

In this thesis, the stabilization system used double gyroscope stabilization that uses two rigid body that rotate on an unstable vehicle systems. Tests performed on a small scale vehicle models and evaluated theoretically using Matlab Simulink, 3D simulation using Autodesk Inventor Software, and experimental. All three method of the evaluation is given control input such as vehicle inclination angle (θ), and the initial position gimbal (α) with the output of the gyroscope rotation (Ω) to stabilize the vehicle. In 3D simulation, the rotation of gyroscope obtained through trial and

error by input the value of gyroscope rotation that obtain the desired steady state. In experiment, tilt angle of vehicle is obtained by adding a stick to the front wheel where the protactor is placed in front of the vehicle. As for measuring the gyro angular velocity is obtained by using an infrared tachometer directed to flywheel that have a white spot to measurement already. The other output that will be got is the time it takes for the system to stabilize. The output obtained will be compared with each other. Vehicle inclination angle variation that used is 0 degree up to 5 degree for each evaluation test performed.

The results obtained by the theoretical are highest flywheel rotation speed is 7544 rpm on the vehicle initial angle of 4 degree and the lowest is 5600 rpm on the vehicle starting angle of 0 degree. While based on the simulation obtained the highest flywheel rotation speed is 7700 rpm on the vehicle initial angle of 4 degree and the lowest is 5700 rpm on the vehicle initial angle of 1 degree. At the same time, based on experimental, the highest flywheel rotation speed is 3353 rpm on the vehicle initial angle of 4 degree and the lowest is 2207 rpm on the vehicle starting angle 0 degree. The comparison that run to the system are between flywheel rotation speed, stabilization period, and vehicle angle oscillation to vehicle initial angle variation. Based on trendline of the three evaluation test performed, the greater the starting angle of the vehicle, the greater the value of the flywheel rotation used.

Keywords: double-gyroscope, gimbal, gyroscope, stabilization, two-wheeled, vehicle

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rizki dan izin-Nya sehingga penyusunan laporan tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penyusunan laporan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademis untuk kelulusan mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Made Putra Astawa dan Ibu Kadek Delmi, orangtua penulis dan keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan do'a yang tak henti-henti hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA, selaku dosen pembimbing sekaligus dosen wali yang telah memberikan bimbingan, arahan dan nasehat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini dan nasehat lainnya dalam menjalani perkuliahan di Teknik Mesin ITS.
3. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, MSc.PhD., Bapak Ir.Julendra Bambang Ariatedja,MT., dan Bapak Bambang Achmad Syaifudin, S.T.,M.Eng., PhD., selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Eng.Sc., Ph.D., selaku Kepala Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
5. Seluruh Dosen beserta staff karyawan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan serta sarana dan prasarana kepada penulis selama menjalani perkuliahan.

6. Seluruh rekan-rekan Laboratorium Desain yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
7. Rekan-rekan seperjuangan Ulfah, Erik, Shofia, Ami, Anggita, dan rekan alumni Angelita Tiara yang banyak memberi masukan kami semua dalam pengerjaan tugas akhir sampai yudisium.
8. Salah satu rekan spesial, AD, yang selalu memberi motivasi dan mendengar segala keluh kesah yang dialami penulis saat pengerjaan tugas akhir dan sebagai tempat pelarian saat dilanda kejenuhan.
9. Seluruh rekan-rekan Teknik Mesin ITS 2013 M56 yang turut membantu dan memberikan dukungan kepada penulis, khususnya kepada Sutrisno calon engineer sejati, semoga cepat menyusul.

Semoga amal dan jasa yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat imbalan dari Yang Kuasa.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan laporan tugas akhir ini. Dan penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan TERIMA KASIH

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA dan Dasar teori	5
2.1 Stabilisasi Giroskopik	5
2.2 Kecepatan Sudut dan Percepatan Sudut.....	13
2.3 Torsi	15
2.4 Momen Inersia.....	15
2.5 Hukum Konservasi Energi	17
2.5.1 Energi Kinetik.....	17
2.5.2 Energi Potensial	18
2.6 Momentum Sudut	19
2.7 Giroskop dan Efek Giroskopik.....	21
2.8 Lagrangian Dinamis.....	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	27

3.1	Diagram Alir Penelitian	27
3.2	Tahap Studi Literatur	29
3.3	Analisa Model Sistem Stabilisasi Girokopik Kendaraan Roda Dua	29
3.3.1	<i>Free Body Diagram</i>	29
3.3.2	Persamaan Matematis Model Kendaraan Roda Dua dengan Stabilitas <i>Double Gyroscope</i>	30
3.4	Pemodelan Fisik dan Simulasi Sistem Stabilisasi Girokopik Kendaraan Roda Dua	39
3.4.1	Pemodelan Sistem	39
3.4.2	Simulasi Model	43
3.5	Perancangan Sistem Stabilisasi Girokopik dan Model Kendaraan Roda Dua.....	51
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN		57
4.1	Pengujian Teoritis	57
4.1.1	Perancangan Blok Diagram dan Input Data.....	57
4.1.2	Analisa Grafik Teoritis Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan <i>Double Gyroscope</i>	63
4.2	Pengujian Simulasi Dinamis	72
4.2.1	Tabel Data Karakteristik Sistem Kendaraan <i>Double Gyroscope</i> Berdasarkan Variasi Kecepatan Putar <i>Flywheel</i> (Ω)	72
4.2.2	Analisa Grafik Simulasi Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan <i>Double Gyroscope</i>	82
4.3	Pengujian <i>Prototype</i> Sistem Kendaraan.....	94
4.3.1	Perancangan <i>Prototype</i> Alat	94

4.3.2	Instalasi Pemasangan Alat Uji	95
4.3.3	Analisa Data Pengujian <i>Prototype</i> Sistem Kendaraan	96
4.4	Perbandingan Hasil Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen	98
4.4.1.	Perbandingan Kecepatan Putar <i>Flywheel</i> Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen.....	98
4.4.2.	Hasil Waktu Stabilisasi Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen	102
4.4.3.	Hasil Osilasi Sudut Kendaraan Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen.....	103
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		107
5.1	Kesimpulan	107
5.2	Saran	108
5.3	Inovasi yang Dapat Dilakukan	109
DAFTAR PUSTAKA		111

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Giroskop (a) horizontal (b) vertikal.....	6
Gambar 2.2	Efek Giroskopik	7
Gambar 2.3	<i>Free Body Diagram</i> dari model sepeda giroskopik	8
Gambar 2.4	Rancangan eksperimen stabilisasi giroskopik sepeda	8
Gambar 2.5	Hasil eksperimen stabilisasi giroskopik sepeda	9
Gambar 2.6	Stabilisasi Sepeda Statis Tidak Berawak (a) Skematik sistem, (b) Rancangan kendaraan sistem.....	9
Gambar 2.7	Hasil simulasi stabilisasi giroskopik sepeda	10
Gambar 2.8	Skematik stabilisasi menggunakan giroskop (a) tampak belakang, (b) tampak samping	11
Gambar 2.9	Kondisi stabilitas pada (a) Variasi K_{α} , (b) Variasi C_{α} , (c) Variasi K_{ϕ}	11
Gambar 2.10	Kondisi stabilitas terhadap variasi kecepatan (a) <i>single gyroscope</i> , (b) <i>double gyroscope</i>	12
Gambar 2.11	Model Kendaraan <i>Gyroscope</i>	12
Gambar 2.12	Rotasi.....	13
Gambar 2.13	Momen inersia <i>body</i>	16
Gambar 2.14	Translasi.....	18
Gambar 2.15	Gerak Bidang Umum.....	18
Gambar 2.16	Energi potensial gravitasi.....	19
Gambar 2.17	Hukum Tangan Kanan Arah Momentum Sudut..	20

Gambar 2.18	Vektor Momentum Sudut dengan Kecepatan Angular Presesi	21
Gambar 2.19	Giroskop (a) <i>single</i> gimbal, (b) <i>double</i> gimbal ...	22
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian tugas akhir	28
Gambar 3.2	<i>Free body diagram</i> model kendaraan giroskopik	30
Gambar 3.3	Blok diagram input output	37
Gambar 3.4	Diagram Alir Evaluasi Teoritis	38
Gambar 3.5	Pemodelan Fisik Sistem Stabilisasi Kendaraan Roda Dua (a) tampak depan, (b) tampak samping, (c) 3D view	42
Gambar 3.6	Diagram Alir Simulasi Sistem Stabilisasi Giroskopik Kendaraan Roda Dua	45
Gambar 3.7	Tampilan awal sebelum memasuki simulasi dinamis	46
Gambar 3.8	Tampilan simulasi dinamis	46
Gambar 3.9	Kondisi <i>part</i> sistem kendaraan roda dua	47
Gambar 3.10	Input <i>initial condition</i> pada gimbal	47
Gambar 3.11	Input kecepatan sudut pada <i>gyro/flywheel</i>	48
Gambar 3.12	Input variasi sudut kemiringan kendaraan (a) 0 derajat, (b) 3 derajat, (c) 5 derajat	49
Gambar 3.13	Menjalankan simulasi	50
Gambar 3.14	Plot grafik (a) menu plot, (b) plot grafik posisi kendaraan	50
Gambar 3.15	Diagram Alir Perancangan Model Kendaraan Roda Dua	52
Gambar 3.16	Pemberian variasi sudut kemiringan pada rancangan model kendaraan	54

Gambar 4.1.	M-file, input koefisien pada blok diagram <i>Simulink</i>	59
Gambar 4.2.	Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=0^\circ$, $\Omega=560$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2	64
Gambar 4.3.	Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=1^\circ$, $\Omega=720$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2	66
Gambar 4.4.	Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=2^\circ$, $\Omega=650$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2	67
Gambar 4.5.	Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=3^\circ$, $\Omega=720$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2	68
Gambar 4.6.	Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=4^\circ$, $\Omega=790$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2	70
Gambar 4.7.	Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=5^\circ$, $\Omega=590$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2	72
Gambar 4.8.	Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=0^\circ$, $\Omega=6500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2	83

- Gambar 4.9. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=0^\circ$, $\Omega=12500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 83
- Gambar 4.10. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=1^\circ$, $\Omega=5700$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 85
- Gambar 4.11. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=1^\circ$, $\Omega=17000$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 85
- Gambar 4.12. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=2^\circ$, $\Omega=6800$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 87
- Gambar 4.13. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=2^\circ$, $\Omega=19500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 87
- Gambar 4.14. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=3^\circ$, $\Omega=7000$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 89
- Gambar 4.15. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=3^\circ$, $\Omega=21500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 89
- Gambar 4.16. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=4^\circ$, $\Omega=7700$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 91
- Gambar 4.17. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=4^\circ$, $\Omega=24000$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 91

- Gambar 4.18. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=5^\circ$, $\Omega=6000$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 93
- Gambar 4.19. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=5^\circ$, $\Omega=25500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2 93
- Gambar 4.20. Prototype Sistem Kendaraan Roda Dua (a) Sebelum Pemasangan *Flywheel* (b) Sesudah Pemasangan *Flywheel*.....95
- Gambar 4.21. Instalasi Pengujian Stabilisasi *Prototype* Kendaraan Roda Dua.....96
- Gambar 4.22. Instalasi Pengambilan Sudut Awal Kemiringan Kendaraan.....96
- Gambar 4.23. Grafik Perbandingan Kecepatan Putar *Flywheel* Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen99
- Gambar 4.24. Ilustrasi penambahan massa bantuan pada simulasi dinamis 102
- Gambar 4.25. Ilustrasi Gerak Osilasi Sudut Kendaraan 104
- Gambar 4.26. Ilustrasi batasan kemiringan kendaraan pada simulasi dan eksperimen 105

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Komponen penyusun part sistem kendaraan roda dua	39
Tabel 3.2	Penggolongan part penyusun sistem	41
Tabel 3.3	Hubungan susunan antar part.....	41
Tabel 3.4	Parameter pemodelan sistem stabilisasi double giroskop kendaraan roda dua	43
Tabel 3.5	Material dan dimensi bahan-bahan perancangan model kendaraan	52
Tabel 3.6	Tabel pengambilan data eksperimen	55
Tabel 4.1	Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=1^\circ$	59
Tabel 4.2	Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=2^\circ$	60
Tabel 4.3	Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=3^\circ$	61
Tabel 4.4	Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=4^\circ$	62
Tabel 4.5	Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=5^\circ$	63
Tabel 4.6	Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik <i>Double Gyroscope</i> pada $\theta=0^\circ$	73
Tabel 4.7	Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik <i>Double Gyroscope</i> pada $\theta=1^\circ$	74
Tabel 4.8	Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik <i>Double Gyroscope</i> pada $\theta=2^\circ$	76

Tabel 4.9	Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Girokopik <i>Double Gyroscope</i> pada $\theta=3^\circ$ .....77
Tabel 4.10	Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Girokopik <i>Double Gyroscope</i> pada $\theta=4^\circ$ .....79
Tabel 4.11	Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Girokopik <i>Double Gyroscope</i> pada $\theta=5^\circ$ .....80
Tabel 4.12	Tabel Perbandingan Kecepatan Putaran <i>Flywheel</i> Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen.....98
Tabel 4.13	Tabel Waktu Stabilisasi Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen 102
Tabel 4.14	Tabel Osilasi Sudut Kendaraan Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen..... 103

BAB I

PENDAHULUAN

Pada bab ini, penulisan tugas akhir ini menunjukkan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan, dan manfaat mengenai penelitian tentang sistem stabilisasi giroskopik pada kendaraan roda dua yang akan dilakukan. Hal ini dilakukan untuk memperoleh kemudahan untuk memahami maksud dari tulisan ini.

1.1 Latar Belakang Masalah

Lembaga internasional WHO (*World Health Organization*) pada tahun 2015 mencatat setidaknya terdapat 1.25 juta kematian yang disebabkan oleh kecelakaan lalu lintas tiap tahunnya di seluruh dunia. Kecelakaan menggunakan kendaraan bermotor menjadi penyumbang terbesar kasus kematian yang terjadi yakni 23%. Di bagian selatan asia, angka kematian akibat kecelakaan lalu lintas berdasarkan tipe pengguna jalan dialami oleh kendaraan bermotor roda dua/ tiga sebesar 34%, pengendara sepeda 3%, pejalan kaki 13%, pengguna mobil 16% dan 34% pengguna kendaraan lainnya. Pada tahun 2013, Indonesia termasuk negara pengguna kendaraan bermotor roda dua/tiga nomor tiga terbesar di dunia setelah India dan China dengan jumlah 86 juta kendaraan. Hal inilah yang menjadi perhatian besar pemerintah Indonesia dalam menurunkan angka kematian akibat kecelakaan lalu lintas. Dari data yang dihimpun Korlantas Polri pada bulan Juli-Desember 2016, tercatat 31.751 kasus kecelakaan lalu lintas yang dilakukan oleh pengguna kendaraan bermotor roda 2. Hal ini menunjukkan penurunan kasus dari periode 6 bulan sebelumnya dengan 37.693 kasus meskipun jumlah pengguna kendaraan bermotor roda dua terus meningkat. Tipe kecelakaan lalu lintas yang terjadi pun beragam. Di Indonesia sendiri kasus tabrakan dari depan menyumbang tingkat fatalitas paling tinggi, disusul dengan kasus

tabrakan dari belakang, kasus tabrakan dengan pejalan kaki dan kasus tabrakan dibelokan jalan raya.

Berbagai kasus tabrakan kendaraan roda dua yang dialami oleh antar sesama kendaraan bermotor pada dasarnya mengakibatkan adanya perubahan posisi dari kendaraan roda dua yang mulanya stabil menjadi tidak stabil. Stabilitas dari kendaraan roda dua digambarkan sejajar dengan sumbu vertikal. Dengan adanya tabrakan mengakibatkan posisi kendaraan roda dua yang awalnya sejajar dengan sumbu vertikal menjadi posisi yang memiliki sudut kemiringan tertentu terhadap posisi awalnya. Saat kendaraan roda dua mengalami perubahan posisi berupa sudut kemiringan, sudah dapat dipastikan kendaraan akan jatuh dan mengakibatkan pengemudi celaka dan kendaraan tersebut tidak dapat kembali ke posisi stabilnya.

Dalam kasus ini pengetahuan akan momentum sudut suatu benda tegar diperlukan untuk menciptakan suatu sistem yang stabil dengan menambahkan adanya suatu benda tegar lainnya yang berputar. Dengan menerapkan ilmu tersebut pada kendaraan roda dua akan membuat kendaraan roda dua tetap pada kondisi stabilnya meskipun diberikan input berupa sudut kemiringan kendaraan yang bervariasi. Metode stabilisasi ini disebut dengan *gyroscopic stabilization*. Melihat dari tingginya angka kematian dunia akibat kecelakaan lalu lintas, khususnya di Indonesia, dikarenakan ketidakstabilan yang ditimbulkan oleh kendaraan roda dua, diperlukan adanya suatu kajian untuk meningkatkan mutu kendaraan bermotor yang ada sekarang.

Berdasarkan hal tersebut diatas, permasalahan yang masih harus dianalisa dan dijawab adalah bagaimana mengetahui besarnya kecepatan angular benda tegar yang berputar terhadap perubahan posisi kemiringan kendaraan roda dua agar kendaraan tersebut tetap di posisi stabilnya. Sehingga diperlukan nya sebuah model kendaraan roda dua skala kecil yang dapat diberi input berupa sudut kemiringan kendaraan yang bervariasi yang merepresentasikan dampak yang terjadi pada kendaraan roda dua yang saling bertabrakan. Maka dari itu, dibuatlah tugas akhir ini

dengan judul “Rancang Bangun Sistem Mekanisme *Double-gyroscope* pada Kendaraan Roda Dua”.

1.2 Perumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perumusan dinamika dan kinematika dari sistem mekanisme *double-gyroscope* pada kendaraan roda dua?
2. Bagaimana memodelkan dan menyimulasikan mekanisme stabilisasi *double-gyroscope* pada kendaraan roda dua?
3. Bagaimana merancang mekanisme stabilisasi *double-gyroscope* pada kendaraan roda dua skala kecil?
4. Bagaimana perbandingan hasil karakteristik stabilisasi *double-gyroscope* sistem berdasarkan teori, simulasi, dan eksperimen dalam menstabilkan kendaraan roda dua?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perumusan dinamika dan kinematika sistem mekanisme *double-gyroscope* pada kendaraan roda dua.
2. Pemodelan dan simulasi mekanisme stabilisasi *double-gyroscope* pada kendaraan roda dua.
3. Perancangan mekanisme stabilisasi *double-gyroscope* pada kendaraan roda dua skala kecil.
4. Perbandingan hasil karakteristik stabilisasi *double-gyroscope* sistem berdasarkan teori, simulasi, dan eksperimen untuk stabilisasi kendaraan roda dua.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Model berupa kendaraan roda dua dengan kondisi *dependent vehicle* dengan kedua roda terletak di depan dan belakang kendaraan.
2. Analisa dilakukan pada model kendaraan roda dua yang berpindah dengan arah perpindahan satu dimensi yakni berupa kemiringan kendaraan
3. Tidak ada pengaruh gaya eksitasi akibat kontur lintasan yang dilalui model kendaraan roda dua.
4. Sistem kendaraan double gyroscope mempunyai tiga arah perpindahan, menggunakan single gimbale dan vertikal giroskop dengan kecepatan putar *flywheel* konstan.
5. Dimensi dari model adalah sebagai berikut:
 - a. Massa model total = 4.36 kg
 - b. Dimensi model total = 634 mm x 212 mm x 178 mm
 - c. Massa giroskop = 0.992 kg
 - d. Dimensi giroskop = d: 150mm ; t: 30mm

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Rancang bangun yang dilakukan dapat digunakan sebagai referensi tugas akhir berikutnya untuk mengetahui pengaruh lainnya terhadap kecepatan angular giroskop maupun *gyroscopic stabilizer*
2. Analisis ini dapat digunakan sebagai acuan besar dalam menerapkan *double gyroscope system* pada kendaraan roda dua sebagai *stabilizer*
3. Memberikan kontribusi nyata pada pengembangan teknologi transportasi menggunakan *gyroscopic stabilizer* sebagai upaya untuk meningkatkan mobilitas manusia di kehidupan sehari-hari.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini, penulisan tugas akhir bertujuan untuk menjelaskan berbagai sumber yang dirujuk sebagai referensi untuk mendukung tugas akhir. Berisi tentang penelitian stabilisasi sistem giroskopik sebelumnya dan teori-teori yang mendukung untuk pemahaman sistem giroskopik.

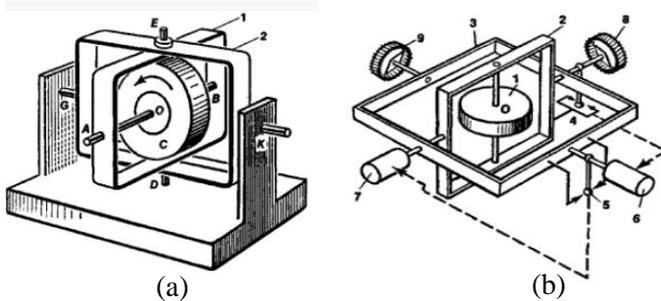
2.1 Stabilisasi Giroskopik

Self-stabilization dapat ditinjau pada benda yang tidak stabil seperti monorel roda dua, kendaraan roda dua, atau sepeda tanpa awak. Kendaraan tersebut memiliki konstruksi roda dua dengan roda berada di depan dan dibelakang kendaraan dengan sumbu putar masing-masing dan sejajar. Stabilisasi menggunakan sistem giroskopik memanfaatkan roda yang berputar pada kecepatan tertentu.

Penggunaan susunan giroskop dengan satu gimbal atau dua gimbal, vertikal giroskop maupun horizontal giroskop, bergantung terhadap gerak dan batasan yang diinginkan. Penggunaan single gimbal memberikan momen penyeimbang lebih besar daripada double gimbal sehingga penggunaan single gimbal lebih sering dijumpai pada kasus stabilisasi sehari-hari seperti pada kapal, monorel dan sebagainya.

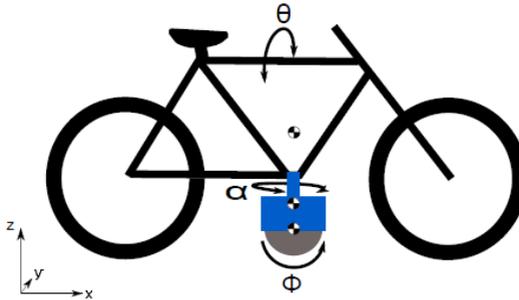
Berdasarkan sumbu putar giroskop, pada umumnya pemasangan giroskop dilakukan dengan dua macam, yakni vertikal dan horizontal. Jika giroskop dipasang dengan sumbu vertikal sebagai sumbu putar *flywheel*, maka giroskop tersebut dinamakan vertikal giroskop, sedangkan jika sumbu horizontal sebagai sumbu putar *flywheel*, maka disebut horizontal giroskop. Giroskop vertikal sangat cocok digunakan untuk mempertahankan suatu sistem pada kondisi vertikalnya seperti sudut kemiringan dari objek terhadap bidang dari sumbu vertikal dan juga cocok untuk

sistem yang dinamis. Giroskop jenis ini biasa digunakan untuk menjaga posisi vertikal objek dalam waktu yang lebih lama. Sedangkan giroskop horizontal biasanya digunakan untuk menjaga agar suatu sistem tetap pada kondisi horizontalnya. Pada penerapannya, giroskop horizontal digunakan pada sistem pesawat terbang bersama dengan giroskop vertikal, sebagai sistem navigasi. Giroskop horizontal hanya cocok digunakan untuk sistem yang statis. Sehingga untuk pengembangannya sering digunakan tipe giroskop vertikal.



Gambar 2.1 Giroskop (a) horizontal (b) vertikal

Stabilisasi dinamis dari kereta monorel atau kendaraan roda dua menjelaskan bahwa momen dari sisi luar yang bekerja pada kereta akan dinetralkan oleh momen yang dihasilkan oleh giroskop dari bagian dalam kereta. Dalam hal ini, giroskop digunakan sebagai aktuator dengan menggunakan gaya presesi yang dihasilkan oleh giroskop. Presesi oleh giroskop ini disebabkan oleh adanya torsi yang diberikan pada sumbu normal dari sumbu putar giroskop. Presesi terjadi pada sumbu ketiga, berpotongan dengan torsi dan sumbu putar. Saat kendaraan miring terhadap sumbu vertikal, torsi presesi diberikan pada *gyroscope cage* menghasilkan momen reaksi giroskopik yang akan cenderung meluruskan kendaraan.

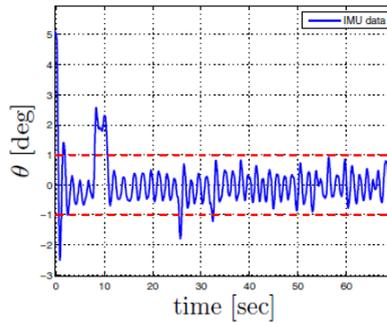


Gambar 2.3 *Free Body Diagram* dari model sepeda giroskopik



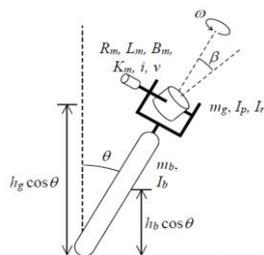
Gambar 2.4 Rancangan eksperimen stabilisasi giroskopik sepeda

Hasil dari eksperimen yang dilakukan untuk menstabilkan sepeda tak berawak ditunjukkan pada gambar 2.5. Eksperimen ini dilakukan dengan sudut kemiringan awal sebesar 5 derajat. Sedangkan pada sudut gimbal digunakan 30 derajat. Dari grafik tersebut ditunjukkan bahwa sepeda beresilasi diantara kurang lebih 1 derajat.



Gambar 2.5 Hasil eksperimen stabilisasi giroskopik sepeda

Penelitian lainnya juga dilakukan oleh John Y. Hung pada tahun 2000 yang berjudul “*Gyroscopic Stabilization of a Stationary Unmanned Bicycle*”. Pada penelitian tersebut digunakan sebuah giroskop dalam satu sumbu bingkai gimbale dipasang pada sepeda sehingga sumbu putar giroskop vertikal dan sumbu gimbal sejajar dengan sumbu sepeda. Massa kendaraan yang digunakan yakni 16.788 kg dengan diberi kondisi awal kemiringan kendaraan sebesar 1 derajat. Diasumsikan bahwa pergerakan kendaraan hanya berasal dari kemiringannya dan kecepatan putaran giroskop konstan sebesar 300π rad/s.



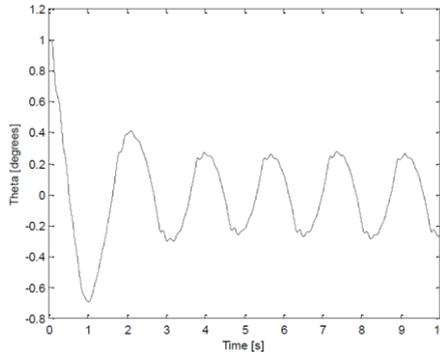
(a)



(b)

Gambar 2.6 Stabilisasi Sepeda Statis Tidak Berawak (a) Skematik sistem, (b) Rancangan kendaraan sistem

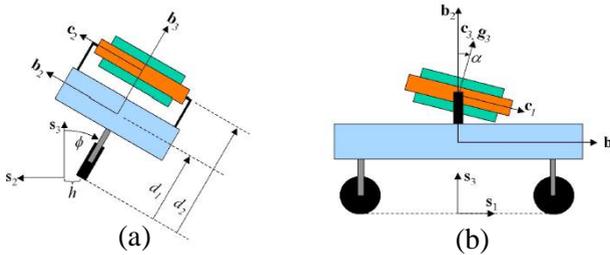
Hasil simulasi dari sistem stabilisasi giroskopik pada sepeda statis ini ditunjukkan pada gambar 2.7. Dilakukan simulasi selama 10 detik dengan sudut kemiringan awal sebesar 1 derajat. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa sepeda berosilasi pada sudut kurang lebih 0.2 derajat.



Gambar 2.7 Hasil simulasi stabilisasi giroskopik sepeda

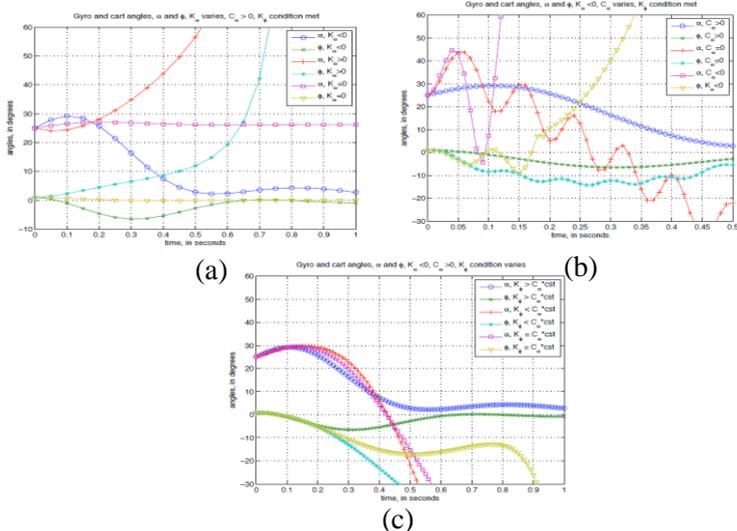
Pada penelitian yang dilakukan oleh Spry dan Girard pada tahun 2008, digunakan monorel roda dua sebagai model dari kendaraan yang tidak stabil. Model memiliki dimensi panjang 45 cm, lebar 17 cm, dan tinggi 20 cm, dengan menggunakan *flywheel motor* berdiameter 7.5 cm dan tebal 2.5 cm sebagai giroskop. Berat model yang digunakan sebesar 4.95 kg dengan berat giroskop (*flywheel*) 0.75 kg. Dalam kasus ini, giroskop digunakan sebagai aktuator, bukan sebagai sensor, dengan memanfaatkan gaya presesi yang ditimbulkan oleh giroskop. Dengan menggunakan metode Lagrange persamaan dinamis dari stabilisasi kendaraan menggunakan giroskop dikembangkan untuk memperoleh linearisasi model dan menjalankan analisis stabilitas dari sistem *close-loop feedback*. Pada gambar 2.8 ditunjukkan skema model yang digunakan pada penelitian ini. Notasi B, L, C, dan G menunjukkan secara berurutan yakni *body* kendaraan, beban pada kendaraan, *gyro cage*, dan roda *gyro*. Sedangkan notasi b, l, c, dan g merupakan titik pusat massa dari B, L, C, dan G. Untuk notasi

sudut digunakan ϕ sebagai sudut putar kendaraan, dan α sebagai sudut preseksi giroskop.

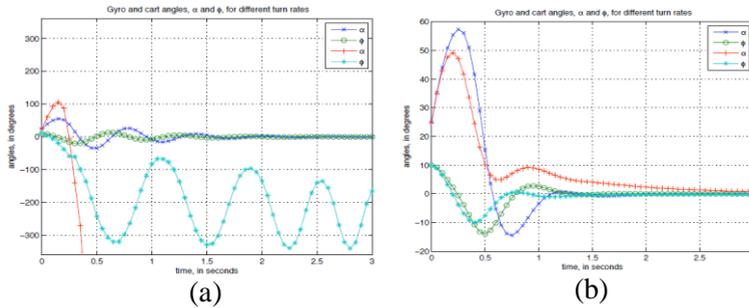


Gambar 2.8 Skematik stabilisasi menggunakan giroskop (a) tampak belakang, (b) tampak samping

Dari penelitian yang dilakukan oleh Spry and Girard pada tahun 2008 didapatkan respon stabilitas kendaraan menggunakan giroskop sebagai berikut:



Gambar 2.9 Kondisi stabilitas pada (a) Variasi K_α , (b) Variasi C_α , (c) Variasi K_ϕ



Gambar 2.10 Kondisi stabilitas terhadap variasi kecepatan (a) *single gyroscope*, (b) *double gyroscope*



Gambar 2.11 Model Kendaraan *Gyroscope*

Dari hasil simulasi tersebut didapat bahwa pada kondisi awal dengan $\alpha = 25^\circ$ dan $\phi = 2^\circ$, nilai K_α harus bernilai negatif, C_α harus bernilai positif lebih dari 0, dan nilai K_ϕ harus bernilai 2 kali lipat dari konstanta yang diizinkan untuk menghasilkan stabilitas kendaraan.

Dari ketiga penelitian yang telah dilakukan, hasil simulasi dari sistem stabilisasi single giroskop yang ditunjukkan pada grafiknya memiliki keseimbangan sudut kendaraan kurang dari 1 dengan waktu dan kondisi awal yang berbeda. Pada penelitian yang dilakukan John Y. Hung, analisa dilakukan pada sepeda dengan sistem stabilisasi giroskopik single giroskop diletakkan dengan ketinggian yang tinggi. Sumbu putar giroskop yang digunakan yakni sumbu vertikal sehingga hasil yang diperoleh lebih cepat

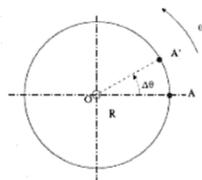
stabil dibanding dengan sumbu horizontal yang dilakukan pada penelitian Harun Yetkin. Pemasangan sistem stabilisasi pada percobaan Harun Yetkin terletak pada bagian bawah sepeda.

Dari kedua penelitian tersebut, hasil yang ditampilkan hanya berupa grafik yang diperoleh dari perhitungan teoritis dan tidak dilakukan perbandingan hasil teori terhadap eksperimen yang dilakukan. Ditinjau dari segi mekanisme, tidak dilakukan pembahasan mengenai double giroskop, perumusan persamaan gerak, maupun simulasi. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Stephen C. Spry yang membahas perumusan persamaan gerak dan simulasi dari single giroskop maupun double giroskop. Namun pada penelitiannya, tidak dilakukan perbandingan hasil yang diperoleh dari teori, maupun eksperimen.

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk melengkapi penelitian yang pernah dilakukan yakni dengan menganalisa sistem stabilisasi *double-gyroscope* ditinjau dari segi mekanisme untuk lebih mengetahui bagaimana persamaan matematis diperoleh. Pada penelitian kali ini juga dilakukan dengan tiga pendekatan yakni teoritis, simulasi model 3D, dan eksperimen. Dari tiga pendekatan itu pada akhirnya akan dilakukan perbandingan hasil berupa grafik stabilitas kendaraan yang nantinya akan dievaluasi hal-hal yang mempengaruhi hasil tersebut.

2.2 Kecepatan Sudut dan Percepatan Sudut

Rotasi atau perpindahan sudut suatu titik didefinisikan sebagai perubahan posisi titik tersebut dengan jarak konstan terhadap titik lainnya. Pada gambar 2.12, dapat ditinjau titik A pada roda yang berputar terhadap sumbu O.



Gambar 2.12 Rotasi

Pada gambar, posisi awal yakni A bergerak menuju A' dengan lintasan sudut OA sebesar $\Delta\theta$ dalam selang waktu Δt . Jari-jari roda R sama besar dengan panjang OA sehingga panjang lintasan (Δs) dari A ke A' adalah $R \cdot \Delta\theta$, dimana θ adalah besar sudut yang dinyatakan dalam satuan radian. Kecepatan sudut roda ditulis melalui persamaan:

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta} \dots\dots\dots(2.1)$$

Sedangkan untuk persamaan kecepatan linear dan hubungan panjang lintasan dengan besar sudut dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$V = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R\Delta\theta}{\Delta t} = R \frac{d\theta}{dt} \dots\dots\dots(2.2)$$

Diperoleh persamaan yang menyatakan hubungan kecepatan linear dengan kecepatan sudut dengan mensubstitusikan persamaan 2.1 dengan 2.2 yakni:

$$V = R \omega \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan ω merupakan kecepatan sudut dengan satuan rad/s atau bisa dinyatakan dalam satuan putaran per menit (rpm). Jika satu putaran sama dengan 2π radian, maka hubungan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana:

ω = kecepatan sudut (rad/s)

n = putaran per menit (rpm)

Jika roda tersebut bergerak dengan mengalami perubahan kecepatan sudut ($\Delta\omega$) dalam selang waktu Δt , maka secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \dot{\omega} \dots\dots\dots(2.5)$$

Kemudian substitusikan persamaan 2.3 kedalam persamaan 2.5, maka diperoleh:

$$\alpha = \frac{\frac{\Delta V}{R}}{\Delta t} = \frac{\Delta V}{R \Delta t} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\alpha = \frac{a}{R} \dots\dots\dots(2.7)$$

Dimana a merupakan percepatan pada gerak translasi.

2.3 Torsi

Sebuah roda memerlukan adanya suatu gaya yang dikerjakan untuk membuatnya bergerak atau berotasi. Gaya yang terjadi pada roda diberikan pada salah satu titik dari titik pusat roda yang memiliki suatu jarak tertentu. Hasil perkalian kros (\times) antara vektor jarak \vec{r} dengan gaya \vec{F} disebut dengan torsi τ . Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} \dots\dots\dots(2.8)$$

Besarnya nilai torsi dipengaruhi tidak hanya oleh besarnya gaya, namun juga oleh jarak gaya yang diberikan terhadap pusat rotasi yang disebut dengan lengan gaya. Berdasarkan hukum Newton ke dua, dinyatakan $F = ma$, dimana a merupakan komponen percepatan partikel. Pada roda yang berputar, benda mempunyai percepatan angular dengan besaran α pada sumbu putarnya, maka:

$$a = r\alpha, \dots\dots\dots(2.9)$$

dan

$$F = m r \alpha \dots\dots\dots(2.10)$$

maka persamaan 2.8 menjadi,

$$\tau = m r^2 \alpha \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana:

m : massa roda/benda (kg)

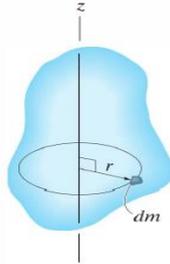
r : jari-jari roda/ jarak tegak lurus dengan gaya (m)

α : percepatan angular (rad/s^2)

2.4 Momen Inersia

Berdasarkan hukum Newton ke dua, gerak linear dari sebuah partikel atau benda dipengaruhi langsung oleh massanya. Pada

gerak rotasi dari benda tegar, ditunjukkan bahwa besarnya momen inersia berbanding lurus dengan produk inersia.



Gambar 2.13 Momen inersia *body*

Momen inersia ditentukan sebagai hasil integral dari momen kedua pada sumbu dari semua elemen massa dm yang menyusun *body*. Pada gambar 2.10, momen inersia *body* pada sumbu z dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I = \int_m r^2 dm \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana lengan momen (r) merupakan jarak tegak lurus terhadap sumbu z menuju sembarang elemen dm . Karena persamaan di atas terdapat r , nilai I berbeda untuk setiap sumbu yang akan dihitung.

Jika benda terbuat dari n partikel, maka momen inersia pada sumbu xx dituliskan sebagai berikut:

$$I_{xx} = \sum_{s=1}^n m_s r_s^2 \dots\dots\dots(2.13)$$

Dimana r_s merupakan jarak yang tegak lurus terhadap massa partikel m_s dari sumbu xx . Produk inersia dari benda berdasarkan sumbu koordinat $Oxyz$ dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$I_{xy} = \sum mxy, \quad I_{yz} = \sum myz, \quad I_{zx} = \sum mzx \dots\dots\dots(2.14)$$

Dimana (x,y,z) merupakan koordinat yang menggantikan partikel. Dua sumbu harus dispesifikkan untuk menentukan produk inersianya.

Jika sumbu yang digunakan dalam perhitungan melewati titik pusat massa *body* G , maka momen inersia pada sumbu tersebut

dinyatakan dengan I_G . Ketika momen inersia dipusat massa *body* sudah diketahui, momen inersia pada sumbu sejajar lainnya juga dapat ditentukan dengan menggunakan teorema *parallel-axis*. Maka persamaan momen inersia di sumbu sejajar lainnya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I = I_G + md^2 \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana:

I_G : Momen inersia di titik pusat massa

m : *massa body* (kg)

d : jarak sumbu paralel terhadap titik pusat massa

2.5 Hukum Konservasi Energi

Penjumlahan antara energi potensial suatu benda dengan energi kinetiknya biasa disebut dengan energi konservasi. Penjumlahan diantara keduanya relatif konstan saat benda bergerak dari posisi satu ke posisi lainnya. Sehingga secara model matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T_1 + V_1 = T_2 + V_2 \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana:

T_1 : energi kinetic benda posisi awal

V_1 : energi potensial benda posisi awal

T_2 : energi potensial benda posisi akhir

V_2 : energi kinetik benda posisi akhir

2.5.1 Energi Kinetik

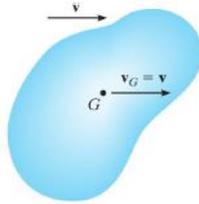
Energi kinetik suatu benda dibagi menjadi dua bagian, yakni energi kinetik translasi dan energi kinetik rotasi. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:

Translasi:
$$T = \frac{1}{2}mv_G^2 \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

Dimana:

m : *massa* benda (kg)

v_G : kecepatan pada titik pusat massa (m/s)



Gambar 2.14 Translasi

Rotasi: $T = \frac{1}{2} I_G \omega^2$ (2.18)

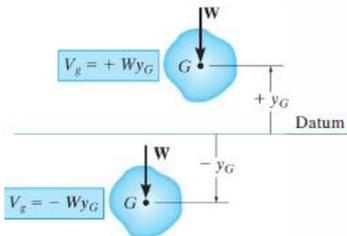
Dimana:

I_G : momen inersia di titik pusat massa

ω : kecepatan sudut benda (rad/s)

Saat benda termasuk bergerak dengan gerak bidang umum, maka benda tersebut mempunyai kecepatan sudut ω dan pada titik pusat massanya terdapat kecepatan v_G . Sehingga energi kinetiknya yakni:

$$T = \frac{1}{2} m v_G^2 + \frac{1}{2} I_G \omega^2$$
(2.19)



Gambar 2.15 Gerak Bidang Umum

2.5.2 Energi Potensial

Total berat dari benda dapat dianggap terkonsentrasi pada titik pusat massanya, maka energi potensial gravitasi ditentukan dengan mengetahui tinggi dari pusat massa benda diatas atau dibawah datum.

$$V_G = W y_G \dots\dots\dots(2.20)$$

$$V_G = m g y_G \dots\dots\dots(2.21)$$

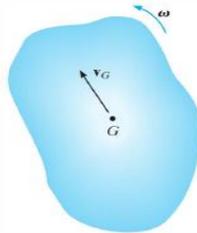
Dimana:

W : berat benda (N)

m : massa benda (kg)

g : percepatan gravitasi (m/s^2)

y_G : jarak datum ke pusat massa (m)



Gambar 2.16 Energi potensial gravitasi

2.6 Momentum Sudut

Sebuah partikel bergerak pada lintasan yang melingkar yang memiliki jari-jari r dan kecepatan sudut sebesar ω , momentum sudut L relatif terhadap pusat lingkaran sehingga dapat didefinisikan sebagai hasil kali momentum linear p dengan jari-jari r .

$$L = p r \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana, momentum linear $p = m v$, dan kecepatan linear $v = \omega r$ maka persamaan 2.22 menjadi:

$$L = m (\omega r)r$$

$$L = m r^2 \omega \dots\dots\dots(2.23)$$

Pada persamaan 2.12 dinyatakan $I = m r^2$, maka persamaan 2.23 menjadi:

$$L = I \omega \dots\dots\dots(2.24)$$

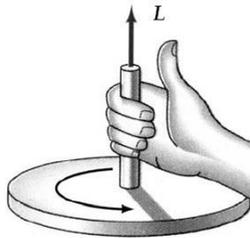
Dimana:

L : momentum sudut ($\text{kg m}^2/\text{s}$)

I : momen inersia (kg m^2)

ω : kecepatan sudut (rad/s)

Arah dari momentum angular dapat dihubungkan dengan arah putaran sudut (ω) menurut hukum tangan kanan seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.17 dimana lipatan ke empat jari merupakan arah putaran partikel atau benda dan ibu jari merupakan arah momentum sudutnya.



Gambar 2.17 Hukum Tangan Kanan Arah Momentum Sudut

Hukum kekekalan momentum menyatakan bahwa “Momentum sudut (L) adalah tetap, baik besar maupun arahnya jika resultan momen gaya yang bekerja pada partikel sama dengan nol.” Hal ini dapat dibuktikan melalui persamaan berikut ini:

Diketahui sebelumnya bahwa hubungan torsi dengan gaya ditunjukkan pada persamaan 2.8 sehingga:

$$\tau = F r \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\tau = (ma) r \dots\dots\dots(2.26)$$

$$\tau = m \left(\frac{\Delta v}{\Delta t} \right) r \dots\dots\dots(2.27)$$

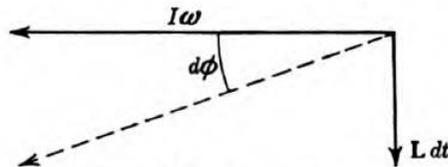
$$\tau = \frac{\Delta p}{\Delta t} r \dots\dots\dots(2.28)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.22 maka diiperoleh hubungan torsi dengan momentum sudut sebagai berikut:

$$\tau = \frac{\Delta L}{\Delta t} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dari persamaan diatas, saat benda yang berputar tidak diberi torsi ($\tau = 0$) maka besar momentum angular adalah konstan. Jika

benda yang berputar diberi torsi, maka momentum angular akan berubah mengikuti arah torsi yang diberikan. Perubahan arah dari momentum sudut akibat torsi ini akan mengakibatkan benda yang berputar tersebut mengalami perubahan posisi/ rotasi pada bidangnya dan menyebabkan benda tersebut memiliki kecepatan angular lain. Perubahan posisi berupa sudut (ϕ) dari benda yang berputar ini disebut presesi, dan kecepatan angular nya disebut dengan kecepatan angular presesi.



Gambar 2.18 Vektor Momentum Sudut dengan Kecepatan Angular Presesi

Pada koordinat Cartesian, momentum sudut dapat dituliskan menggunakan *principal axes of inertia* sehingga persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut:

$$L_x = I_x \omega_x, \quad L_y = I_y \omega_y, \quad L_z = I_z \omega_z \dots \dots \dots (2.30)$$

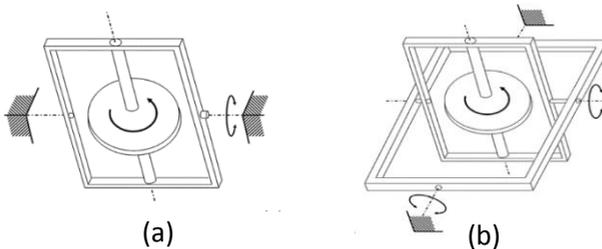
Dimana:

- L_i : Momentum sudut pada sumbu I ($\text{kg m}^2/\text{s}$)
- I_i : Momen Inersia pada sumbu I (kg m^2)
- ω : kecepatan sudut pada sumbu i (rad/s)

2.7 Giroskop dan Efek Girokopik

Giroskop adalah suatu benda padat yang bebas bergerak ke arah lainnya sambil berputar pada suatu sumbu karena diberi gaya eksternal. Sumbu rotasi giroskop dapat mengubah orientasi sistem dalam ruang, hal ini lah yang disebut dengan efek girokopik. Pergerakan yang bebas pada sumbunya pada umumnya diperoleh dari adanya penyangga motor pada gimbal/*cage* dan dapat

digunakan satu gimbal maupun dua gimbal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.19 Giroskop (a) *single* gimbal, (b) *double* gimbal

Efek giroskopik banyak dimanfaatkan dalam teknologi modern seperti navigasi otomatis pada pesawat terbang, kapal, roket, torpedo, untuk penentuan *horizon* atau garis meridian geografis, untuk pengukuran kecepatan translasi atau sudut benda bergerak, dan tujuan lainnya. Efek giroskopik dapat terjadi dalam dua kondisi, yakni sumbu rotasi giroskop harus mampu mengubah orientasi dalam ruang, dan kecepatan sudut rotasi giroskop pada porosnya harus sangat besar dibandingkan dengan kecepatan sudut dari sumbu giroskop ketika berorientasi.

Saat giroskop diberi torsi eksternal, giroskop cenderung bergerak tegak lurus terhadap momentum angular torsi yang diberikan. Gerakan yang diakibatkan dari torsi eksternal yang diberikan inilah yang dinamakan presesi.

2.8 Lagrangian Dinamis

Persamaan diferensial yang menyatakan gerak partikel atau sistem partikel dapat dibentuk melalui penerapan hukum gerak Newton atau dengan cara lain menggunakan persamaan Lagrange. Dalam menggunakan Lagrange dapat diperoleh melalui energi kinetik dan energi potensial dengan gaya umum tertentu termasuk untuk sistem non-konservatif. Persamaan Lagrange dinyatakan dalam koordinat umum, sehingga dapat dengan mudah dirubah ke

sistem koordinat lainnya yang diinginkan. Sehingga persamaan Lagrange dapat dituliskan sebagai berikut:

$$L = T - V \dots\dots\dots(2.31)$$

Dimana:

- T = Energi kinetic partikel/sistem
- V = Energi potensial partikel/sistem

Lagrange dinamis dibentuk dengan mensubtitusikan besaran skalar (energi dan usaha) ke bentuk besaran vektor (gaya, momentum, torsi, dan momentum angular) pada vektor dinamis. Persamaan Lagrange dapat diperoleh dengan menggunakan metodel *virtual displacement*, dimana partikel diasumsikan berpindah pada jarak yang sangat kecil sesuai dengan batasan yang ada pada sistem dan kerja yang dilakukan dapat dinyatakan secara matematis. Jika δx , δy , δz adalah komponen perpindahan *virtual*, maka usaha yang dilakukan adalah sebagai berikut:

$$\delta W = \Sigma F_x \delta x + \Sigma F_y \delta y + \Sigma F_z \delta z \dots\dots\dots(2.32)$$

Dalam hukum gerak Newton, $\Sigma F = m a$, dan a adalah turunan kedua dari posisi terhadap waktu, sehingga persamaan diatas dapat ditulis:

$$\delta W = m(\ddot{x}\delta x + \ddot{y}\delta y + \ddot{z}\delta z) \dots\dots\dots(2.33)$$

Untuk n partikel, maka:

$$\Sigma_{i=1}^n \Sigma F_{xi} \delta x_i + \Sigma F_{yi} \delta y_i + \Sigma F_{zi} \delta z_i = \Sigma_{i=1}^n m_i (\ddot{x}_i \delta x_i + \ddot{y}_i \delta y_i + \ddot{z}_i \delta z_i) \dots\dots\dots(2.34)$$

Untuk menyatakan persamaan 2. Dalam koordinat umum, maka dinyatakan koordinat sistem baru q_1, q_2, \dots, q_n sehingga:

$$\begin{aligned} x &= f_1(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ y &= f_2(q_1, q_2, \dots, q_n) \\ z &= f_3(q_1, q_2, \dots, q_n) \end{aligned}$$

Dimana f adalah fungsi deferensial. Diasumsikan bahwa sistem koordinat q adalah tetap relatif terhadap sistem koordinat xyz. Dengan asumsi perpindahan *virtual* pada koordinat q adalah ∂q_s , maka:

$$\delta x = \frac{\partial x_i}{\partial q_s} \delta q, \quad \delta y = \frac{\partial y_i}{\partial q_s} \delta q, \quad \delta z = \frac{\partial z_i}{\partial q_s} \delta q \dots\dots\dots(2.35)$$

Sehingga persamaan 2.34 menjadi:

$$\sum_{i=1}^n \Sigma F_{xi} \delta x_i + \Sigma F_{yi} \delta y_i + \Sigma F_{zi} \delta z_i = \sum_{i=1}^n m_i \left(\ddot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_s} + \ddot{y}_i \frac{\partial y_i}{\partial q_s} + \ddot{z}_i \frac{\partial z_i}{\partial q_s} \right) \delta q \dots\dots\dots(2.36)$$

Dari persamaan diatas, dapat dituliskan:

$$\dot{x}_i \frac{\delta x_i}{\delta q_s} = \frac{d}{dt} \left(\dot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_s} \right) - \dot{x}_i \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial x_i}{\partial q_s} \right) \quad (2.37)$$

Pernyataan yang sama untuk koordinat y dan z, maka persamaan 2.36 menjadi:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \Sigma F_{xi} \delta x_i + \Sigma F_{yi} \delta y_i + \Sigma F_{zi} \delta z_i = \\ \sum_{i=1}^n m_i \frac{d}{dt} \left(\dot{x}_i \frac{\partial x_i}{\partial q_s} + \dot{y}_i \frac{\partial y_i}{\partial q_s} + \dot{z}_i \frac{\partial z_i}{\partial q_s} \right) \delta q \\ - \sum_{i=1}^n m_i \left(\dot{x}_i \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial x_i}{\partial q_s} \right) + \dot{y}_i \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial y_i}{\partial q_s} \right) + \dot{z}_i \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial z_i}{\partial q_s} \right) \right) \delta q \end{aligned} \dots\dots\dots(2.38)$$

Ruas kanan pada persamaan diatas sama dengan

$$\left[\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_s} \right) \right] \delta q_i \dots\dots\dots(2.39)$$

Persamaan Lagrange dapat diberlakukan pada sistem yang mempunyai gerak relatif terhadap dua sistem koordinat. Karena partikel diasumsikan memiliki perpindahan *virtual* dalam q, koordinat arah, maka ruas kiri dari persamaan 2.38 sama dengan $Q_s \delta q$, dimana Q disebut sebagai *generalized force* dalam koordinat arah q_s . Dengan mensubstitusikannya pada ruas kiri dan kedua ruas dibagi dengan δq , maka:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_s} \right) = Q_s \dots\dots\dots(2.40)$$

Dalam sistem konservatif, gaya Q dapat dinyatakan sebagai *negative gradient* dari energi potensial V, sehingga:

$$Q_s = - \frac{\partial V}{\partial q_s} \dots\dots\dots(2.41)$$

Persamaan 2.41 disubstitusikan ke persamaan 2.40 menjadi,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \left(\frac{\partial T}{\partial q_s} \right) + \frac{\partial V}{\partial q_s} = 0 \dots\dots\dots(2.42)$$

Dari persamaan 2.31 diketahui $L = T - V$, maka persamaan diatas menjadi,

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_s} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial q_s} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(2.43)$$

Harus diperhatikan bahwa gaya umum Q dan koordinat umum q tidak harus memiliki dimensi dari gaya maupun panjang. Namun produk Q δq harus mempunyai dimensi dari usaha. Sebagai contoh pada gerakan rotasional, Q dapat menyatakan torsi dan q adalah sudut.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

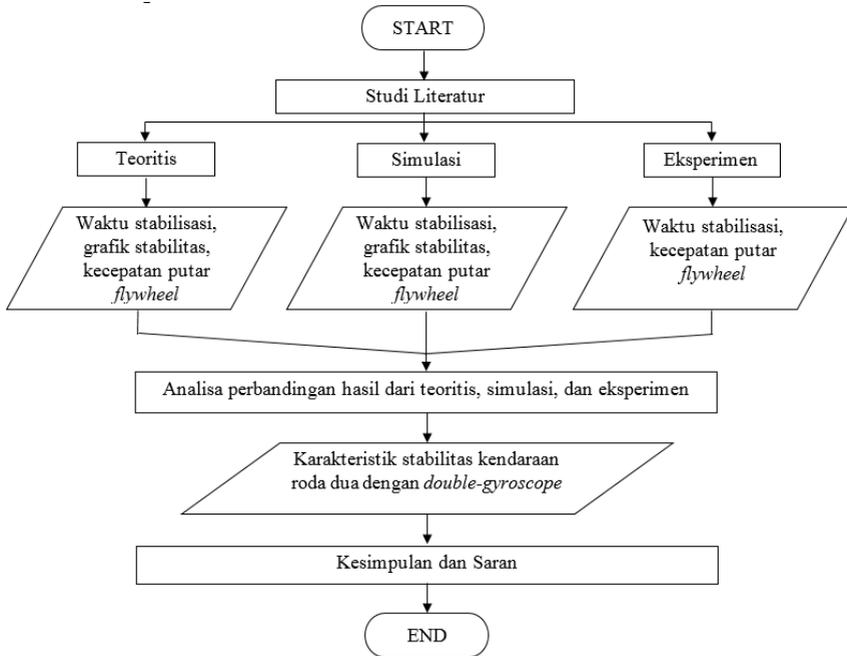
Pada bab ini, penulisan tugas akhir bertujuan untuk menjelaskan tahapan dari penelitian yang dilakukan, pemodelan matematis dan pemodelan tiga dimensi yang dilakukan, parameter-parameter yang digunakan, dan tahapan perancangan sistem untuk kemudian didapatkan hasil yang dapat dianalisa di tahapan berikutnya.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut kemiringan kendaraan terhadap putaran giroskop yang dibutuhkan untuk menstabilkan kembali posisi kendaraan. Sehingga hal yang ingin dicapai dalam penulisan tugas akhir ini antara lain sudut gimbale yang dihasilkan, kecepatan angular giroskop, dan perancangan model sistem stabilisasi giroskopik kendaraan roda dua. Adapun tahapan analisa penelitian ditunjukkan pada gambar 3.1.

Penelitian tugas akhir ini dimulai dengan studi literatur mengenai sistem stabilisasi giroskopik kendaraan roda dua menggunakan jurnal-jurnal terdahulu. Selanjutnya dilakukan pemodelan fisik rancangan kendaraan roda dua yang akan dipasang sistem stabilisasi giroskopik. Setelah itu, sistem stabilisasi giroskopik dirancang dengan menggunakan *double/twin* giroskop.

Dari rancangan sistem dan kendaraan stabilitas giroskopik maka dapat dicari persamaan gerak giroskop terhadap kendaraan dan mendapatkan persamaan tentang hubungan sudut kemiringan kendaraan terhadap besarnya kecepatan sudut dan sudut presesi giroskop. Kemudian rancangan kendaraan tersebut disimulasikan menggunakan *Inventor Dynamic Analysis* untuk mendapatkan besar kecepatan sudut giroskop yang dibutuhkan dan grafik sudut kemiringan kendaraan terhadap putaran giroskop.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian tugas akhir

Besaran kecepatan sudut, dimensi kendaraan yang diperoleh dari hasil simulasi digunakan sebagai acuan dalam melakukan perhitungan untuk memperoleh hasil dari persamaan gerak sebelumnya dan pembuatan rancangan fisik sistem stabilisasi kendaraan roda dua. Massa sistem, putaran sudut giroskop dan varasi sudut kemiringan kendaraan diinput ke dalam persamaan gerak yang disimulasikan ke dalam *Matlab Simulink* sehingga diperoleh besarnya putaran motor yang digunakan serta grafik stabilitas sudut kemiringan kendaraan dan sudut presesi giroskop terhadap waktu.

Parameter yang sama juga digunakan dalam perancangan fisik kendaraan roda dua dengan stabilisasi giroskopik untuk

memperoleh hasil eksperimen sebuah kendaraan yang stabil. Kemudian dari hasil simulasi, perhitungan, dan eksperimen, dilakukan analisa data dan membandingkan hasilnya satu sama lain. Pada akhir penelitian dilakukan penarikan kesimpulan berdasarkan hasil penelitian untuk selanjutnya bisa digunakan sebagai referensi untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

3.2 Tahap Studi Literatur

Dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan referensi-referensi yang dapat menunjang dalam menganalisa sistem stabilisasi giroskopik kendaraan roda dua. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan tugas akhir ini yakni kinematika mekanisme, dinamika teknik, *gyrodynamics*, sistem stabilisasi giroskopik giroskop ganda, metode lagrange, *Inventor Dynamic Analysis*, serta pembuatan blok diagram pada program *MATLAB Simulink*. Parameter yang digunakan diambil dari jurnal-jurnal untuk memperoleh sistem yang stabil seperti massa kendaraan, massa giroskop, putaran giroskop yang dibutuhkan, dan variasi kemiringan kendaraan namun dengan nilai yang berbeda.

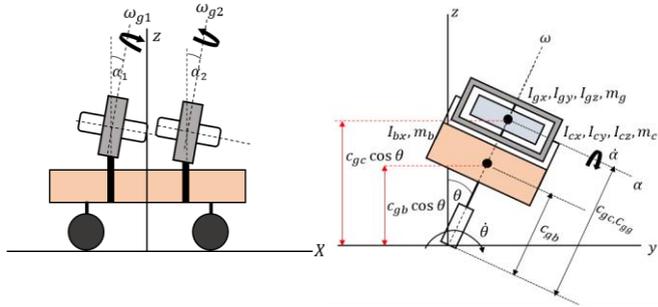
Referensi untuk studi literatur didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan. Sedangkan studi lapangan dilakukan untuk menentukan komponen rancangan sistem stabilisasi giroskopik kendaraan roda dua yang didapat dari eksperimen yang berhasil.

3.3 Analisa Model Sistem Stabilisasi Giroskopik Kendaraan Roda Dua

3.3.1 *Free Body Diagram*

Model kendaraan roda dua dengan sistem stabilisasi giroskopik ini terdiri dari 3 body penyusun, yakni *body* kendaraan, *body* gimbale, dan *body flywheel* (*double* giroskop). Ketiga *body* ini kemudian disusun menjadi satu sistem, dimana *flywheel* dan

gimbal sebagai sistem stabilitas dari *body* kendaraan dengan memanfaatkan efek giroskopik yang dihasilkan oleh putaran *flywheel*. Model matematis dari sistem stabilisasi giroskopik kendaraan roda dua dapat dilihat pada gambar 3.4 sebagai berikut:



Gambar 3.2 *Free body diagram* model kendaraan giroskopik

Dari gambar diatas, notasi b, c, dan g menyatakan *body* kendaraan, gimbal *case* dan *gyro/flywheel* secara berturut-turut. Notasi m, I, dan Cg yang diikuti dengan *subscript* b, c dan g berturut-turut menyatakan massa, momen inersia, dan titik pusat massa dari sistem yang bersangkutan. Untuk sumbu-sumbu yang digunakan yakni x,y,z koordinat yang menyatakan posisi dari kendaraan relatif terhadap dasar roda. Sumbu putar yang ada pada sistem yakni θ , α , Ω dimana θ menyatakan sudut kemiringan kendaraan, α menyatakan sudut presesi giroskop, Ω menyatakan kecepatan putar giroskop.

3.3.2 Persamaan Matematis Model Kendaraan Roda Dua dengan Stabilitas *Double Gyroscope*

Sistem kendaran dengan stabilitas giroskopik dibagi menjadi tiga *rigid body* untuk dianalisa antara lain, *body* kendaraan, *case*, dan *gyro*. Pada sistem stabilisasi *double-gyroscope*, asumsi yang digunakan yakni putaran *gyro* dan putaran presesi *gyro* antara satu dengan yang lain yakni sama besar namun

berbeda arah. Sehingga hubungan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Omega_2 &= -\Omega_1 \\ \dot{\alpha}_2 &= -\dot{\alpha}_1\end{aligned}$$

Asumsi lainnya yakni kendaraan dalam keadaan diam sehingga semua kecepatan linear kendaraan bernilai nol ($v_b = v_{c1} = v_{c2} = v_{g1} = v_{g2} = 0$) dan juga putaran flywheel dianggap konstan.

Dinamika non linear dari tiga buah rigid body ini diperoleh dari eneri konservasi dengan menggunakan metode Lagrange. Untuk menggunakan metode Lagrange, terlebih dahulu menyatakan persamaan energi kinetik dan energi potensial dari tiga rigid body tersebut.

a) Energi Kinetik Rigid Body

Energi kinetic total untuk model kendaraan ini yakni:

$$T = T_b + (T_{c1} + T_{c2}) + (T_{g1} + T_{g2})$$

Sehingga untuk tiap rigid body yang dianalisa adalah sebagai berikut:

- Body kendaraan

$$T_b = \frac{1}{2} m_b v_b^2 + \frac{1}{2} (I_{bx} + m_b Cg_b) \omega_{bx}^2$$

$$T_b = \frac{1}{2} (I_{bx} + m_b Cg_b^2) \dot{\theta}^2 \dots\dots\dots(3.1)$$

- Gimbal cage

Cage 1:

$$T_{c1} = \frac{1}{2} m_{c1} v_{c1}^2 + \frac{1}{2} (I_{c1x} \omega_{c1x}^2 + I_{c1y} \omega_{c1y}^2 + I_{c1z} \omega_{c1z}^2) + \frac{1}{2} m_{c1} Cg_{c1}^2 \dot{\theta}^2$$

$$T_{c1} = \frac{1}{2} (I_{c1x} (\dot{\theta} \cos \alpha_1)^2 + I_{c1y} \dot{\alpha}_1^2 + I_{c1z} (\dot{\theta} \sin \alpha_1)^2 + m_{c1} Cg_{c1}^2 \dot{\theta}^2)$$

$$T_{c1} = \frac{1}{2} (I_{c1x} (\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_1) + I_{c1y} \dot{\alpha}_1^2 + I_{c1z} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_1) + m_{c1} Cg_{c1}^2 \dot{\theta}^2) \dots\dots\dots(3.2)$$

Cage 2:

$$T_{c2} = \frac{1}{2} m_{c2} v_{c2}^2 + \frac{1}{2} (I_{c2x} \omega_{c2x}^2 + I_{c2y} \omega_{c2y}^2 + I_{c2z} \omega_{c2z}^2) + \frac{1}{2} m_{c2} C g_{c2}^2 \dot{\theta}^2$$

$$T_{c2} = \frac{1}{2} (I_{c2x} (\dot{\theta} \cos \alpha_2)^2 + I_{c2y} \dot{\alpha}_2^2 + I_{c2z} (\dot{\theta} \sin \alpha_2)^2 + m_{c2} C g_{c2}^2 \dot{\theta}^2)$$

$$T_{c2} = \frac{1}{2} (I_{c2x} (\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_2) + I_{c2y} \dot{\alpha}_2^2 + I_{c2z} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_2) + m_{c2} C g_{c2}^2 \dot{\theta}^2) \dots\dots\dots(3.3)$$

- Gyro/Flywheel

Gyro 1:

$$T_{g1} = \frac{1}{2} m_{g1} v_{g1}^2 + \frac{1}{2} ((I_{g1x} + m_{g1} C g_{g1}) \omega_{g1x}^2 + I_{g1y} \omega_{g1y}^2 + I_{g1z} \omega_{g1z}^2) + \frac{1}{2} m_{g1} C g_{g1}^2 \dot{\theta}^2$$

$$T_{g1} = \frac{1}{2} (I_{g1x} (\dot{\theta} \cos \alpha_1)^2 + I_{g1y} \dot{\alpha}_1^2 + I_{g1z} (\dot{\theta} \sin \alpha_1 + \Omega_1)^2 + m_{g1} C g_{g1}^2 \dot{\theta}^2)$$

$$T_{g1} = \frac{1}{2} (I_{g1x} (\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_1) + I_{g1y} \dot{\alpha}_1^2 + I_{g1z} (\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_1 + 2\dot{\theta} \Omega_1 \sin \alpha_1 + \Omega_1^2) + m_{g1} C g_{g1}^2 \dot{\theta}^2) \dots\dots\dots(3.5)$$

Gyro 2:

$$T_{g2} = \frac{1}{2} m_{g2} v_{g2}^2 + \frac{1}{2} ((I_{g2x} + m_{g2} C g_{g2}) \omega_{g2x}^2 + I_{g2y} \omega_{g2y}^2 + I_{g2z} \omega_{g2z}^2) + \frac{1}{2} m_{g2} C g_{g2}^2 \dot{\theta}^2$$

$$T_{g2} = \frac{1}{2} (I_{g2x} (\dot{\theta} \cos \alpha_2)^2 + I_{g2y} \dot{\alpha}_2^2 + I_{g2z} (\dot{\theta} \sin \alpha_2 + \Omega_2)^2 + m_{g2} C g_{g2}^2 \dot{\theta}^2)$$

$$T_{g2} = \frac{1}{2}(I_{g2x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_2) + I_{g2y}\dot{\alpha}_2^2 + I_{g2z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_2 + 2\dot{\theta}\Omega_2 \sin \alpha_2 + \Omega_2^2) + m_{g2}Cg_{g2}^2\dot{\theta}^2) \dots\dots\dots(3.6)$$

Sehingga, energi kinetik total dari sistem yakni:

$$T = \frac{1}{2}(I_{bx} + m_bCg_b)\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}(I_{c1x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_1) + I_{c1y}\dot{\alpha}_1^2 + I_{c1z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_1) + m_{c1}Cg_{c1}^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}(I_{c2x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_2) + I_{c2y}\dot{\alpha}_2^2 + I_{c2z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_2) + m_{c2}Cg_{c2}^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}(I_{g1x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_1) + I_{g1y}\dot{\alpha}_1^2 + I_{g1z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_1 + 2\dot{\theta}\Omega_1 \sin \alpha_1 + \Omega_1^2) + m_{g1}Cg_{g1}^2\dot{\theta}^2) + \frac{1}{2}(I_{g2x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_2) + I_{g2y}\dot{\alpha}_2^2 + I_{g2z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_2 + 2\dot{\theta}\Omega_2 \sin \alpha_2 + \Omega_2^2) + m_{g2}Cg_{g2}^2\dot{\theta}^2) \dots\dots\dots(3.7)$$

b) Energi Potensial *Rigid Body*

$$V = V_b + (V_{c1} + V_{c2}) + (V_{g1} + V_{g2}) \dots\dots\dots(3.8)$$

- *Body* Kendaraan

$$V_b = m_b g Cg_b \cos \theta \dots\dots\dots(3.9)$$

- *Gimbal Cage*

$$V_{c1+c2} = (m_{c1} + m_{c2})gCg_c \cos \theta \dots\dots\dots(3.10)$$

- *Gyro/Flywheel*

$$V_{g1+g2} = (m_{g1} + m_{g2})gCg_g \cos \theta \dots\dots\dots(3.11)$$

Sehingga, energi potensial total dari sistem yakni:

$$V = m_b g Cg_b \cos \theta + (m_{c1} + m_{c2})gCg_c \cos \theta + (m_{g1} + m_{g2})gCg_g \cos \theta \dots\dots\dots(3.12)$$

Menggunakan metode Lagrange, persamaan menjadi:

$$L = T - V$$

$$\begin{aligned}
L = & \frac{1}{2}(I_{bx} + m_b Cg_b)\dot{\theta}^2 + \frac{1}{2}(I_{c1x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_1) + \\
& I_{c1y}\dot{\alpha}_1^2 + I_{c1z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_1) + m_{c1} Cg_{c1}^2 \dot{\theta}^2) + \\
& \frac{1}{2}(I_{c2x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_2) + I_{c2y}\dot{\alpha}_2^2 + I_{c2z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_2) + m_{c2} Cg_{c2}^2 \dot{\theta}^2) + \\
& \frac{1}{2}(I_{g1x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_1) + I_{g1y}\dot{\alpha}_1^2 + I_{g1z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_1 + 2\dot{\theta}\Omega_1 \sin \alpha_1 + \\
& \Omega_1^2) + m_{g1} Cg_{g1}^2 \dot{\theta}^2) + \\
& \frac{1}{2}(I_{g2x}(\dot{\theta}^2 \cos^2 \alpha_2) + I_{g2y}\dot{\alpha}_2^2 + I_{g2z}(\dot{\theta}^2 \sin^2 \alpha_2 + 2\dot{\theta}\Omega_2 \sin \alpha_2 + \\
& \Omega_2^2) + m_{g2} Cg_{g2}^2 \dot{\theta}^2)) \\
& - m_b g Cg_b \cos \theta - (m_{c1} + m_{c2})g Cg_c \cos \theta - (m_{g1} + m_{g2})g Cg_g \cos \theta \\
& \dots\dots\dots(3.13)
\end{aligned}$$

Penyelesaian untuk koordinat θ yakni:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial \theta} = & (I_{bx} + m_b Cg_b^2 + m_{c1} Cg_{c1}^2 + m_{c2} Cg_{c2}^2 + m_{g1} Cg_{g1}^2 + m_{g2} Cg_{g2}^2)\dot{\theta} + \\
& I_{c1x}(\dot{\theta} \cos^2 \alpha_1) + I_{c1z}(\dot{\theta} \sin^2 \alpha_1) + I_{c2x}(\dot{\theta} \cos^2 \alpha_2) + I_{c2z}(\dot{\theta} \sin^2 \alpha_2) + \\
& I_{g1x}(\dot{\theta} \cos^2 \alpha_1) + I_{g1z}(\dot{\theta} \sin^2 \alpha_1 + \Omega_1 \sin \alpha_1) + \\
& I_{g2x}(\dot{\theta} \cos^2 \alpha_2) + I_{g2z}(\dot{\theta} \sin^2 \alpha_2 + \Omega_2 \sin \alpha_2) \dots\dots\dots(3.14)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = & (I_{bx} + m_b Cg_b^2 + m_{c1} Cg_{c1}^2 + m_{c2} Cg_{c2}^2 + m_{g1} Cg_{g1}^2 + m_{g2} Cg_{g2}^2)\ddot{\theta} + \\
& (I_{c1x}(\ddot{\theta} \cos^2 \alpha_1 - 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1) + \\
& I_{c1z}(\ddot{\theta} \sin^2 \alpha_1 + 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) + \\
& (I_{c2x}(\ddot{\theta} \cos^2 \alpha_2 - 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2) + \\
& I_{c2z}(\ddot{\theta} \sin^2 \alpha_2 + 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_2^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2) + \\
& (I_{g1x}(\ddot{\theta} \cos^2 \alpha_1 - 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1) + \\
& I_{g1z}(\ddot{\theta} \sin^2 \alpha_1 + 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) + I_{g1z}(\dot{\alpha}_1 \Omega_1 \cos \alpha_1) + \\
& (I_{g2x}(\ddot{\theta} \cos^2 \alpha_2 - 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2) + \\
& I_{g2z}(\ddot{\theta} \sin^2 \alpha_2 + 2\dot{\theta}\dot{\alpha}_2^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2) + I_{g2z}(\dot{\alpha}_2 \Omega_2 \cos \alpha_2) \\
& \dots\dots\dots(3.15)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial \theta} = & m_b g Cg_b \sin \theta + (m_{c1} + m_{c2})g Cg_c \sin \theta + (m_{g1} + m_{g2})g Cg_g \sin \theta \\
& \dots\dots\dots(3.16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = & 0 \quad \dots\dots\dots(3.17)
\end{aligned}$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 3.15 dan 3.16, maka persamaan 3.17 menjadi:

$$\begin{aligned}
 & (I_{bx} + m_b Cg_b^2 + m_{c1} Cg_{c1}^2 + m_{c2} Cg_{c2}^2 + m_{g1} Cg_{g1}^2 + m_{g2} Cg_{g2}^2) \ddot{\theta} + \\
 & (I_{c1x}(\ddot{\theta} \cos^2 \alpha_1 - 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1) + I_{c1z}(\ddot{\theta} \sin^2 \alpha_1 + 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) + \\
 & (I_{c2x}(\ddot{\theta} \cos^2 \alpha_2 - 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2) + I_{c2z}(\ddot{\theta} \sin^2 \alpha_2 + 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_2^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2) + \\
 & (I_{g1x}(\ddot{\theta} \cos^2 \alpha_1 - 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1) + I_{g1z}(\ddot{\theta} \sin^2 \alpha_1 + 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_1^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1) + \\
 & I_{g1z}(\dot{\alpha}_1 \Omega_1 \cos \alpha_1) + \\
 & (I_{g2x}(\ddot{\theta} \cos^2 \alpha_2 - 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2) + I_{g2z}(\ddot{\theta} \sin^2 \alpha_2 + 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_2^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2) + \\
 & I_{g2z}(\dot{\alpha}_2 \Omega_2 \cos \alpha_2) - \\
 & m_b g Cg_b \sin \theta - (m_{c1} + m_{c2}) g Cg_c \sin \theta - (m_{g1} + m_{g2}) g Cg_g \sin \theta = 0
 \end{aligned}
 \tag{3.19}$$

$$\begin{aligned}
 \diamond \quad \ddot{\theta} = \frac{1}{A} \times [& (I_{c1z} - I_{c1x} + I_{g1z} - I_{g1x}) 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 + \\
 & (I_{c2z} - I_{c2x} + I_{g2z} - I_{g1x}) 2\dot{\theta} \dot{\alpha}_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 - \\
 & I_{g1z} \dot{\alpha}_1 \Omega_1 \cos \alpha_1 - I_{g2z} \dot{\alpha}_2 \Omega_2 \cos \alpha_2 - \\
 & m_{c2} Cg_{c2} + m_{g1} Cg_{g1} + m_{g2} Cg_{g2}) g \sin \theta]
 \end{aligned}
 \tag{3.20}$$

Dimana,

$$\begin{aligned}
 A = & (I_b + m_b Cg_b^2 + m_{c1} Cg_{c1}^2 + m_{c2} Cg_{c2}^2 + m_{g1} Cg_{g1}^2 + m_{g2} Cg_{g2}^2) \\
 & + (I_{c1x} + I_{g1x}) \cos^2 \alpha_1 + (I_{c2x} + I_{g2x}) \cos^2 \alpha_2 \\
 & + (I_{c1z} + I_{g1z}) \sin^2 \alpha_1 + (I_{c2z} + I_{g2z}) \sin^2 \alpha_2
 \end{aligned}$$

Penyelesaian untuk koordinat α_1 yakni:

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_1} = (I_{c1y} + I_{g1y}) \dot{\alpha}_1 \tag{3.21}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_1} \right) = (I_{c1y} + I_{g1y}) \ddot{\alpha}_1 \tag{3.22}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial L}{\partial \alpha_1} = & -I_{c1x} \dot{\theta}^2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 + I_{c1z} \dot{\theta}^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 - I_{g1x} \dot{\theta}^2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 + \\
 & I_{g1z} \dot{\theta}^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + I_{g1z} \dot{\theta} \Omega_1 \cos \alpha_1 \tag{3.23}
 \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \tag{3.24}$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 3.22 dan 3.23, maka persamaan 3.24 menjadi:

$$(I_{c1y} + I_{g1y})\ddot{\alpha}_1 + I_{c1x}\dot{\theta}^2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 - I_{c1z}\dot{\theta}^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + I_{g1x}\dot{\theta}^2 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 - I_{g1z}\dot{\theta}^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 - I_{g1z}\dot{\theta}\Omega_1 \cos \alpha_1 = 0 \quad \dots\dots\dots(3.24)$$

$$\diamond \ddot{\alpha}_1 = \frac{1}{(I_{c1y} + I_{g1y})} \times [(I_{c1x} - I_{c1z} + I_{g1x} - I_{g1z})\dot{\theta}^2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 + I_{g1z}\dot{\theta}\Omega_1 \cos \alpha_1] \quad \dots\dots\dots(3.25)$$

Penyelesaian untuk koordinat α_2 yakni:

$$\frac{\partial L}{\partial \ddot{\alpha}_2} = (I_{c2y} + I_{g2y})\ddot{\alpha}_1 \quad \dots\dots\dots(3.26)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}_2} \right) = (I_{c2y} + I_{g2y})\ddot{\alpha}_2 \quad \dots\dots\dots(3.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \alpha_2} = & -I_{c2x}\dot{\theta}^2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 + I_{c2z}\dot{\theta}^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 - \\ & I_{g2x}\dot{\theta}^2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 + \\ & I_{g2z}\dot{\theta}^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 + I_{g2z}\dot{\theta}\Omega_2 \cos \alpha_2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(3.28)$$

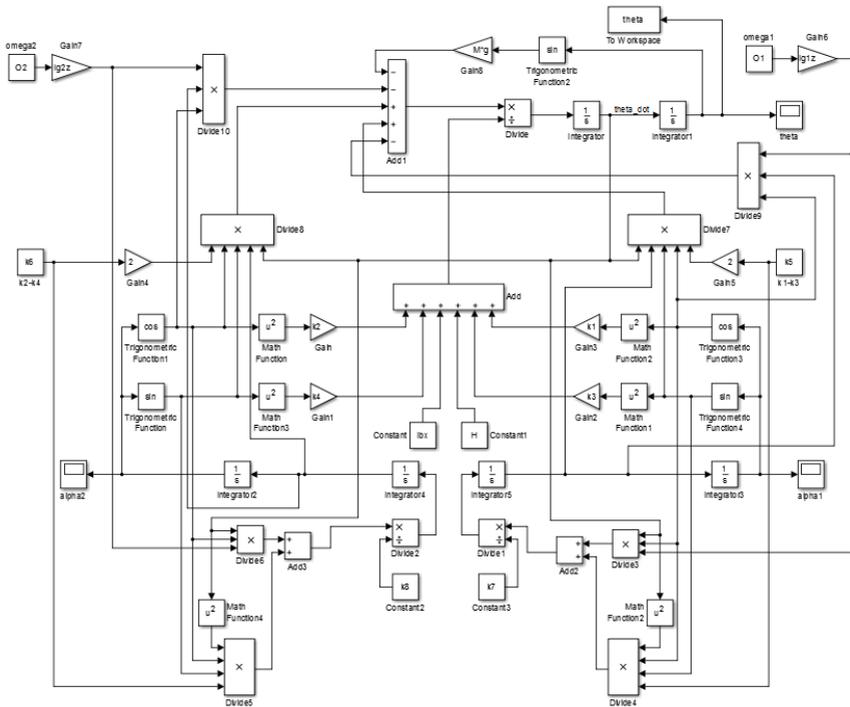
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \quad \dots\dots\dots(3.29)$$

Dengan melakukan substitusi persamaan 3.27 dan 3.28, maka persamaan 3.29 menjadi:

$$(I_{c2y} + I_{g2y})\ddot{\alpha}_2 + I_{c2x}\dot{\theta}^2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 - I_{c2z}\dot{\theta}^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 + I_{g2x}\dot{\theta}^2 \cos \alpha_2 \sin \alpha_2 - I_{g2z}\dot{\theta}^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 - I_{g2z}\dot{\theta}\Omega_2 \cos \alpha_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(3.30)$$

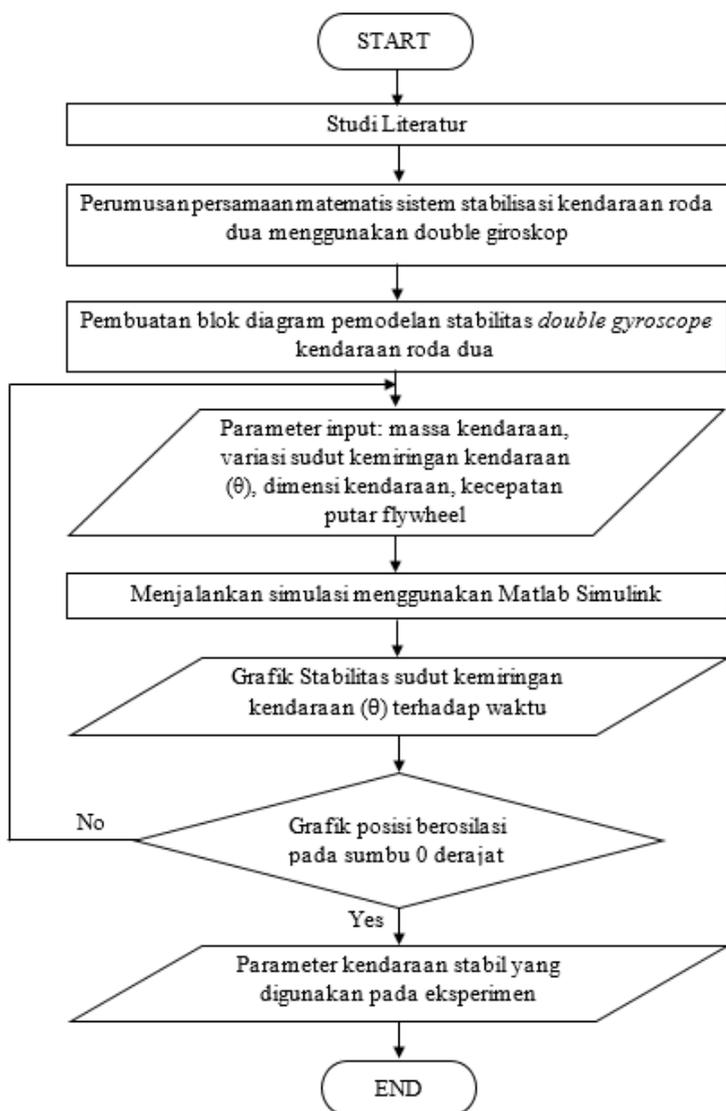
$$\diamond \ddot{\alpha}_2 = \frac{1}{(I_{c2y} + I_{g2y})} \times [(I_{c2x} - I_{c2z} + I_{g2x} - I_{g2z})\dot{\theta}^2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 + I_{g2z}\dot{\theta}\Omega_2 \cos \alpha_2] \quad \dots\dots\dots(3.31)$$

Dari perumusan diatas, dilakukan pembuatan blok diagram untuk memperjelas kedudukan input dan outputnya. Blok diagram tersebut adalah sebagai berikut:



Gambar 3.3 Blok diagram input output

Setelah diperoleh persamaan seperti diatas, maka tahap evaluasi secara teoritis dapat dilakukan sesuai dengan digram alir berikut ini:



Gambar 3.4 Diagram Alir Evaluasi Teoritis

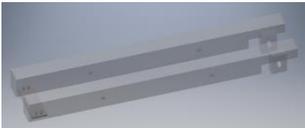
3.4 Pemodelan Fisik dan Simulasi Sistem Stabilisasi Girokopik Kendaraan Roda Dua

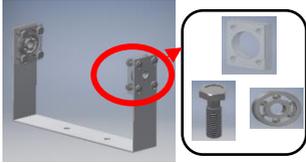
3.4.1 Pemodelan Sistem

Pemodelan fisik kendaraan roda dua yang dilakukan menyerupai bentuk kendaraan bermotor dengan menyederhanakan bentuk *body* kendaraan dalam satu bentuk. Pemodelan dilakukan menggunakan *software design Autodesk Inventor 2016*. Kendaraan dilengkapi dengan dua roda dengan roda depan tidak dapat melakukan *maneuver* ke kanan maupun ke kiri (*dependent wheel*). Kendaraan di modelkan tanpa mempunyai penahan kanan atau kiri agar posisi kendaraan sebenarnya dapat terjadi akibat gaya gravitasi.

Berdasarkan derajat kebebasan *body*, pemodelan dilakukan dengan menyusun *part* yang saling bergerak satu sama lain, yakni *body* kendaraan, *gimbal* dan *gyro/flywheel*. Tiap *part* memiliki masing – masing komponen penyusunnya. Hal tersebut akan dijelaskan pada tabel komponen penyusun part berikut ini:

Tabel 3.1 Komponen penyusun part sistem kendaraan roda dua

PART	KOMPONEN PENYUSUN
1. Body Kendaraan 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Roda (depan dan belakang)  ➤ Dudukan body 

	<p>➤ Pegangan roda depan</p>  <p>➤ Pegangan gimbal</p> 
2. Gimbal	
3. Gyro	

Setelah seluruh part telah dibuat, maka *assembly* dilakukan sesuai dengan *part* mana yang diinginkan bergerak. Untuk *part* kendaraan, semua komponen penyusunnya disusun menggunakan *constrain-mate*, yang berfungsi untuk menyatukan semua komponen agar pada tempatnya dan tidak bergerak. Untuk ketiga *part* diatas yang memiliki derajat kebebasan masing-masing dilakukan penyusunan menggunakan pilihan *joint-revolution* untuk menghasilkan *part* dapat berputar terhadap part lainnya sesuai dengan sumbu yang ditentukan. Dalam hal ini, untuk

mempermudah penjelasannya, dibuatlah tabel yang menyatakan hubungan antara part satu dengan part lainnya.

Tabel 3.2 Penggolongan part penyusun sistem

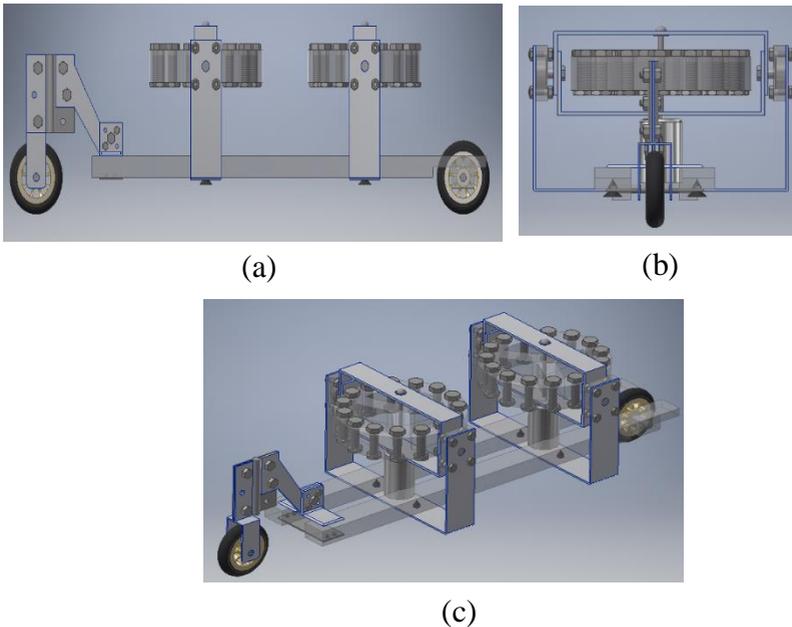
STATIS	DINAMIS
<p>1. Jalan</p> 	<p>1. Body Kendaraan</p>  <p>2. Gimbal</p>  <p>3. Gyro/Flywheel</p> 

Tabel 3.3 Hubungan susunan antar part

PART 1	PART 2	HUBUNGAN
<p>Jalan</p> 	<p>Kendaraan</p> 	<p><i>Joint-revolution</i>, kendaraan bergerak rotasi terhadap jalan. Rotasi terjadi pada sumbu x</p>
<p><i>Body</i> Kendaraan</p> 	<p>Gimbal</p> 	<p><i>Joint-revolution</i>, gimbal bergerak rotasi terhadap body kendaraan. Rotasi terjadi pada sumbu z.</p>

<p>Gimbal</p> 	<p>Gyro/Flywheel</p> 	<p><i>Joint-revolution, gyro/flywheel bergerak rotasi terhadap gimbal. Rotasi terjadi pada sumbu y.</i></p>
---	--	---

Sehingga dari susunan *part* dan hubungan antar *part* diatas, maka diperoleh pemodelan sistem adalah sebagai berikut:



Gambar 3.5 Pemodelan Fisik Sistem Stabilisasi Kendaraan Roda Dua (a) tampak depan, (b) tampak samping, (c) 3D view

Dari pemodelan yang dilakukan diatas, didapatkan beberapa parameter yang diperoleh menggunakan *tools* pada *inventor*. Parameter-parameter tersebut antara lain:

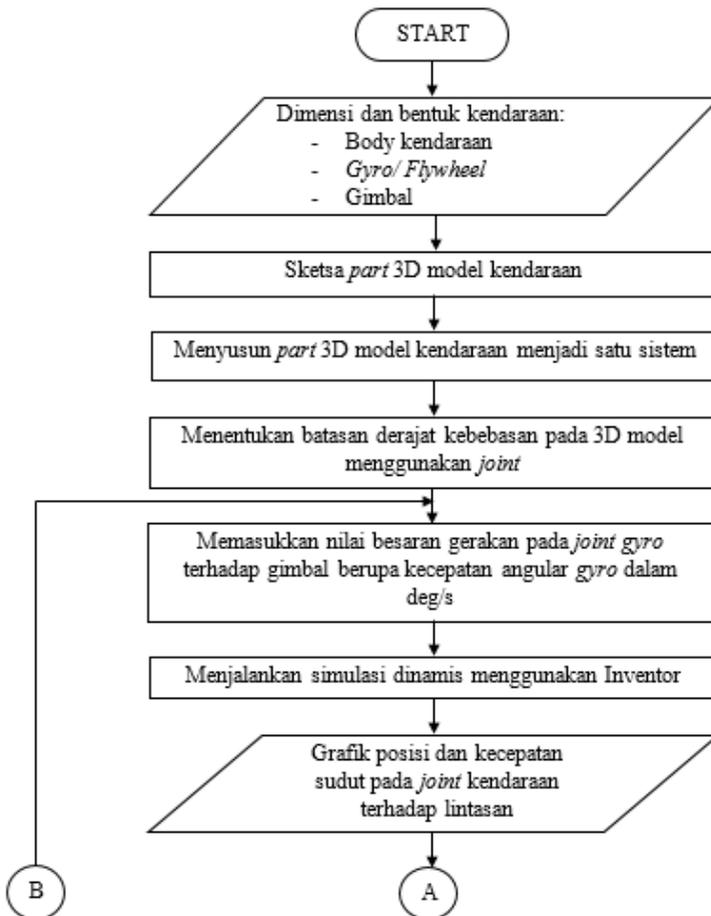
Tabel 3.4 Parameter pemodelan sistem stabilisasi double giroskop kendaraan roda dua

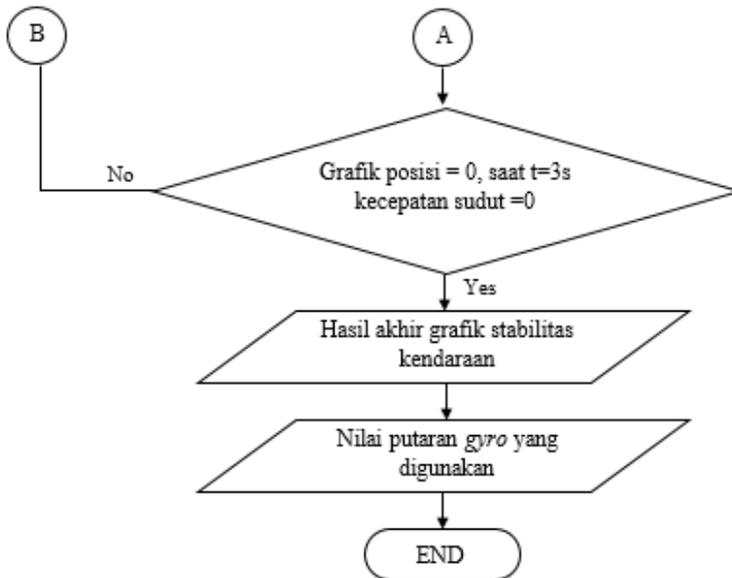
Parameter	Nilai		Keterangan
Sudut kemiringan kendaraan (θ)	0° - 5°		-
Sudut gimbal (α)	output		-
Kecepatan angular giroskop (Ω)	Variasi		Berdasarkan simulasi 3D
Momen inersia body kendaraan (I_{bx})	8295	kg mm ²	Berdasarkan simulasi 3D
Momen inersia gimbal (I_c)			
➤ Sumbu x (I_{cx})	1550	kg mm ²	Berdasarkan simulasi 3D
➤ Sumbu y (I_{cy})	924	kg mm ²	
➤ Sumbu z (I_{cz})	679	kg mm ²	
Momen inersia gyro 1 (I_{g1})			
➤ Sumbu x (I_{g1x})	1872	kg mm ²	Berdasarkan simulasi 3D
➤ Sumbu y (I_{g1y})	3561	kg mm ²	
➤ Sumbu z (I_{g1z})	1872	kg mm ²	
Momen inersia gyro 2 (I_{g2})			
➤ Sumbu x (I_{g2x})	1872	kg mm ²	Berdasarkan simulasi 3D
➤ Sumbu y (I_{g2y})	3561	kg mm ²	
➤ Sumbu z (I_{g2z})	1872	kg mm ²	
Massa body kendaraan (m_b)	1.644	kg	Berdasarkan simulasi 3D
Massa gimbal (m_c)	0.366	kg	Berdasarkan simulasi 3D
Massa gyro 1 dan 2 (m_{g1} , m_{g2})	0.992	kg	Berdasarkan simulasi 3D
Pusat massa body kendaraan (C_{gb})	70.2	mm	Berdasarkan simulasi 3D
Pusat massa gimbal (C_{gc})	102.4	mm	Berdasarkan simulasi 3D
Pusat massa gyro 1 dan 2 (C_{g1} , C_{g2})	145	mm	Berdasarkan simulasi 3D

3.4.2 Simulasi Model

Dua buah giroskop diletakkan pada bagian atas *body* kendaraan yang akan menghasilkan putaran yang diperoleh dari motor. Posisi kendaraan akan berubah (miring) dikarenakan adanya pengaruh gravitasi sehingga akan menghasilkan input pada

sistem stabilisasinya. Gerakan yang dilakukan kendaraan hanya disebabkan oleh posisi kemiringan kendaraan. Besarnya sudut kemiringan kendaraan mempengaruhi besarnya putaran giroskop untuk menstabilkan kendaraan. Adapun batasan-batasan yang dilakukan pada simulasi ini yakni, roda kendaraan terhadap jalan tidak bergerak dan gerakan hanya dipengaruhi oleh massa. Simulasi dilakukan dengan tahapan-tahapan yang ditunjukkan pada gambar 3.5 sebagai berikut:





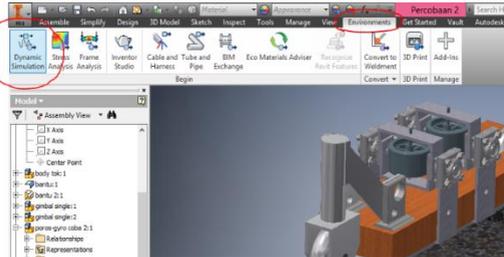
Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi Sistem Stabilisasi Giroskopik Kendaraan Roda Dua

Berdasarkan diagram alir diatas, dalam melakukan simulasi dilakukan beberapa tahapan sebelum menjalankan simulasi dinamis pada *software* desain *Autodesk Inventor 2016*. Tahapan tersebut yakni memulai simulasi, menginput kondisi awal yang diinginkan, menginput putaran *gyro/flywheel*, melakukan variasi kemiringan kendaraan pada model, dan memplot grafik hasil dari simulasi.

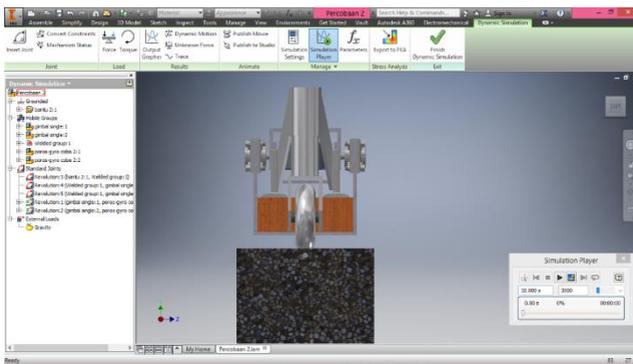
3.4.2.1 Tampilan Awal Simulasi

Untuk memulai simulasi, model terlebih dahulu dipastikan telah tersusun secara tepat. Pada *software Autodesk Inventor 2016*, simulasi dinamis dilakukan dengan memilih menu *environment*,

lalu pilih *Dynamic Simulation*. Lalu kemudian akan muncul tampilan *dynamic simulation* seperti gambar 3.7.

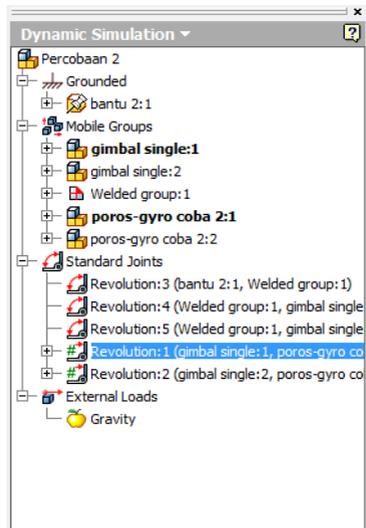


Gambar 3.7 Tampilan awal sebelum memasuki simulasi dinamis



Gambar 3.8 Tampilan simulasi dinamis

Setelah muncul tampilan seperti diatas, kondisi *part* dicek untuk memastikan *part* yang bergerak masuk dalam kondisi *mobile* sedangkan yang tidak memiliki kondisi *grounded*. Dalam kasus ini, *grounded* berarti tidak memiliki derajat kebebasan yang hanya dimiliki oleh jalan saja. Lalu pengaruh gravitasi ditambahkan pada *external loads* untuk membuat simulasi model mendekati keadaan sebenarnya.



Gambar 3.9 Kondisi *part* sistem kendaraan roda dua

3.4.2.2 Input Kondisi Awal

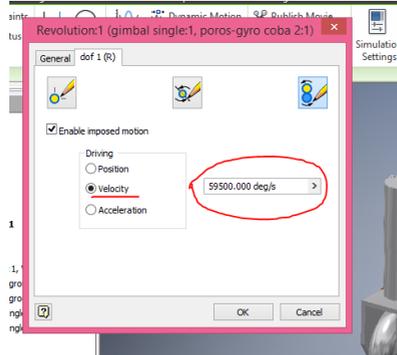
Setiap *part* yang bergerak memiliki *joint* yang nantinya dapat diatur kondisi awal, ataupun pergerakan pada *joint* tersebut. Kondisi awal yang diinputkan pada model antara lain sudut gimbal sebesar nol. Maka dari itu pada *joint* antara gimbal dengan *body* kendaraan (*welded group*) diberi *initial condition* pada posisinya.



Gambar 3.10 Input *initial condition* pada gimbal

3.4.2.3 Input Kecepatan Sudut *Gyro/Flywheel*

Kecepatan sudut *gyro* diinputkan untuk menstabilkan kendaraan. Input kecepatan sudut pada *gyro* dilakukan dengan cara *trial and error* sampai menemukan besar putaran yang tepat. Input diberikan pada *joint* dari *gyro* terhadap gimbal.



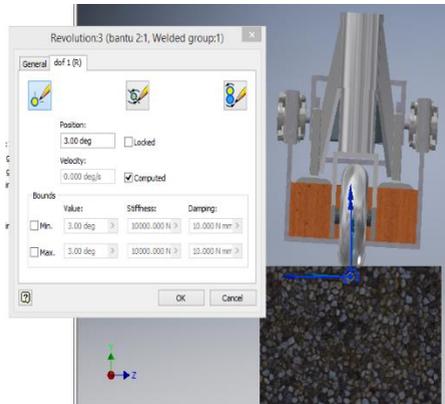
Gambar 3.11 Input kecepatan sudut pada *gyro/flywheel*

3.4.2.4 Input Variasi Kemiringan Model Kendaraan

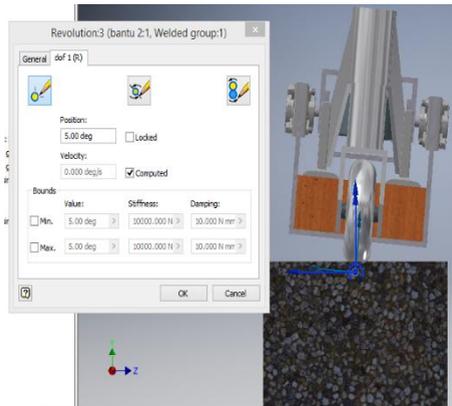
Untuk menampilkan pengaruh kemiringan kendaraan terhadap putaran giroskop, dilakukan variasi pada sudut kemiringan kendaraan terhadap jalan. Input dilakukan pada *joint* kendaraan terhadap jalan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.12 Input variasi sudut kemiringan kendaraan (a) 0 derajat, (b) 3 derajat, (c) 5 derajat

3.4.2.5 Plot Grafik Simulasi

Setelah input yang diperlukan sudah dimasukkan kedalam simulasi, maka simulasi dijalankan. Untuk memunculkan grafik yang menunjukkan stabilitas kendaraan, maka grafik yang

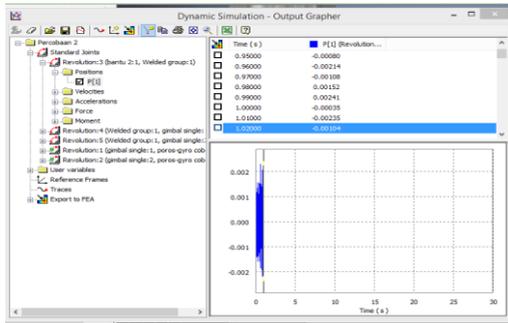
dimunculkan saat simulasi berjalan yakni grafik dari posisi *joint* kendaraan terhadap jalan.



Gambar 3.13 Menjalankan simulasi



(a)

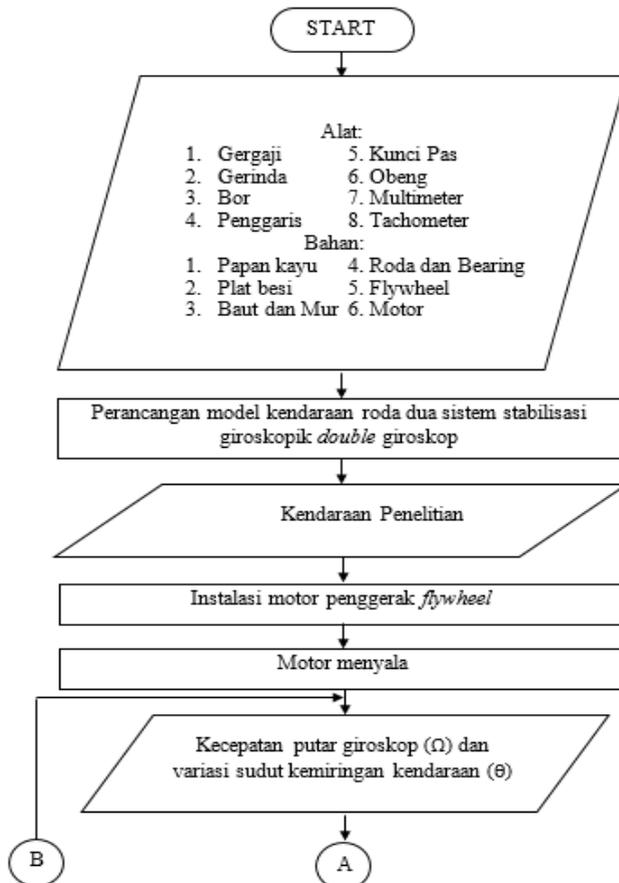


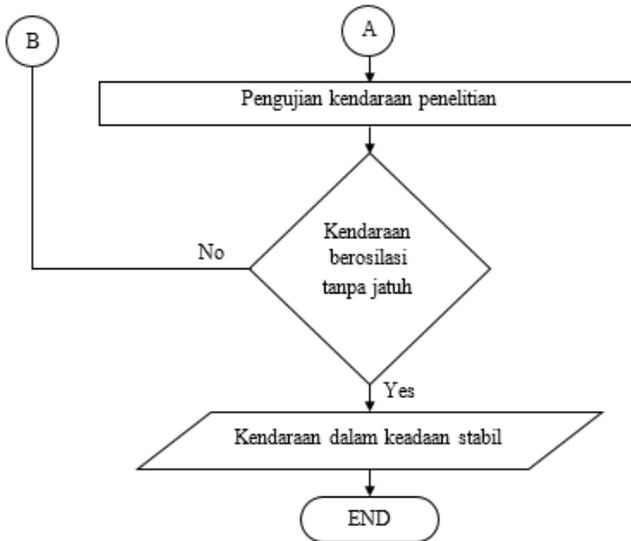
(b)

Gambar 3.14 Plot grafik (a) menu plot, (b) plot grafik posisi kendaraan

3.5 Perancangan Sistem Stabilisasi Giroskopik dan Model Kendaraan Roda Dua

Setelah diperoleh hasil dari simulasi berupa besaran putaran motor yang akan digunakan dan dimensi model berupa massa *body* kendaraan, gimbals, *gyro/flywheel*, maka dilakukan perancangan model kendaraan berdasarkan model 3D dari simulasi yang dilakukan. Adapun tahapan-tahapan perancangan model ditunjukkan pada gambar 3.5 berikut ini:





Gambar 3.15 Diagram Alir Perancangan Model Kendaraan Roda Dua

Pada tahap ini, dilakukan perancangan model berdasarkan simulasi yang dilakukan sebelumnya. Dengan dimensi dan material yang sesuai maka perancangan model kendaraan roda dua skala kecil dibuat. Adapun material-material yang digunakan sebagai bahan perancangan dijelaskan pada tabel 3.5.

Tabel 3.5 Material dan dimensi bahan-bahan perancangan model kendaraan

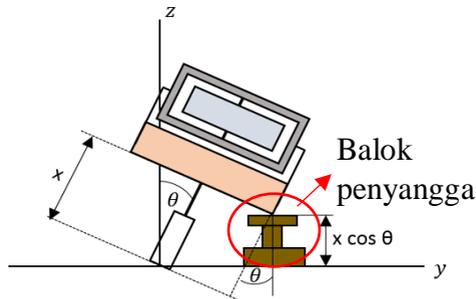
No	Part	Dimensi	Material
1.	Roda (2 buah)	\varnothing roda = 75 mm, t = 20 mm \varnothing poros = 8 mm	Velg : plastik Roda : rubber
2	Body Kendaraan	P = 520mm, L= 100 mm, t = 20mm	PMMA
3	Rangka body + gimb'al	Luas plat = 1500 cm ²	Aluminium sheet

4	Bearing (4 buah)	Rolling Bearing, $\varnothing_{inside} = 10 \text{ mm}$ $\varnothing_{outside} = 30 \text{ mm}$	
5	Poros Gimbali (4 buah)	$\varnothing = 10 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$	Steel
6	Flywheel (2 buah)	$\varnothing = 15 \text{ mm}$, $t = 30 \text{ mm}$	PMMA
7	Motor (2 buah)	Motor DC 24 V, 21000 rpm (no load) $\varnothing_{shaft} = 3.2 \text{ mm}$	
8	Engsel	$P = 3 \text{ in}$	Stainless Steel
9	Baut dan Mur	$\varnothing = 6 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$ (21 buah) $\varnothing = 4 \text{ mm}$, $L = 10 \text{ mm}$ (2 buah) $\varnothing = 4 \text{ mm}$, $L = 30 \text{ mm}$ (8 buah)	Steel

Berbeda dengan simulasi, pada eksperimen pemberian *initial condition* dilakukan secara manual dikarenakan tugas akhir ini hanya meninjau dari segi mekanismenya saja. Oleh karena itu diperlukan cara khusus untuk memberi *initial condition* seperti sudut kemiringan kendaraan dan input lain berupa putaran giroskop.

a) Memberikan variasi sudut kemiringan kendaraan

Sudut kemiringan kendaraan ini divariasikan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap besarnya putaran *gyro*. Pada eksperimen ini digunakan variasi sudut kemiringan kendaraan sebesar 0 derajat sampai 5 derajat. Untuk menciptakan kemiringan yang sesuai, digunakanlah balok penyangga dengan ketinggian yang berbeda-beda tergantung sudut yang divariasikan. Skema pemberian balok penyangga pada sistem ditunjukkan pada gambar 3.15 berikut ini:



Gambar 3.16 Pemberian variasi sudut kemiringan pada rancangan model kendaraan

Ketinggian balok penyangga untuk masing-masing sudut berbeda-beda sesuai dengan yang digambarkan pada skema. Pada skema ditunjukkan tinggi balok penyangga sebesar $x \cos \theta$, dimana x merupakan jarak body menuju roda dan θ merupakan sudut variasinya. Pada bagian atas balok penyangga yang kontak dengan *body* kendaraan, diberi bantalan dari bahan karet untuk mencegah *body* bergeser.

b) Mengukur kecepatan putaran *gyro*

Setelah variasi sudut dan *initial condition* lainnya telah diinputkan, maka motor yang dikopel pada poros *gyro/flywheel* dinyalakan. *Gyro* akan berputar sebesar putaran motor. Saat kendaraan mulai stabil, maka *gyro* memiliki kecepatan sudut tertentu. Untuk mengetahuinya dilakukan pengukuran besar putarannya. Dalam kasus ini, digunakan tachometer inframerah untuk mengetahui besarnya kecepatan sudut *gyro* dengan menembakkan inframerah kebagian sisi *gyro* yang sebelumnya telah diberi penanda berwarna putih.

Berdasarkan diagram alir pada gambar 3.15, digunakan tabel eksperimen untuk mempermudah data yang akan diambil sebagai

pembandingan dengan data-data lainnya. Berikut tabel pembandingan dari hasil teoritis, simulasi, dan eksperimen.

Tabel 3.6 Tabel pengambilan data eksperimen

Parameter Pembandingan		Teoritis	Simulasi	Eksperimen
INPUT	➤ Sudut kemiringan kendaraan (θ)			
	- Variasi 1	0°	0°	-
	- Variasi 2	3°	3°	-
	- Variasi 3	5°	5°	-
	➤ Sudut kemiringan gimbal (α)			
	- Variasi 1	.....	.....	.....
	- Variasi 2	.....	.....	.....
	- Variasi 3	.....	.....	.....
	➤ Kecepatan angular giroskop			
- $\theta = 0^\circ$	.....	.....	.....
- $\theta = 3^\circ$	.....	.....	.....
- $\theta = 5^\circ$	.....	.....	.....
OUTPUT	Waktu Stabilisasi			
	- $\theta = 0^\circ$	.....	.....	.....
	- $\theta = 3^\circ$	.....	.....	.....
	- $\theta = 5^\circ$	.....	.....	.....
	Grafik Stabilisasi Kendaraan	.....	.....	.....

Pengambilan data dilakukan dengan pengulangan sebanyak 3 kali dengan besar variasi yang sama untuk mendapatkan hasil pengukuran yang akurat.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini, penulisan tugas akhir bertujuan untuk menjelaskan hasil penelitian yang dilakukan secara teoritis, simulasi dan eksperimen. Hasil teoritis diperoleh melalui *software Matlab*, hasil simulasi diperoleh melalui *Dynamic Simulation Autodesk Inventor*, dan hasil eksperimen diperoleh dengan melakukan perancangan *prototype* model kendaraan.

4.1 Pengujian Teoritis

4.1.1 Perancangan Blok Diagram dan Input Data

Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan *matlab code* yang kemudian diperoleh grafik stabilisasi kendaraan berupa sudut kemiringan kendaraan (θ), sudut gimbal 1 (α_1), dan sudut gimbal 2 (α_2). Pada perumusan yang dimasukkan ke dalam *matlab code*, digunakan input berupa initial condition kendaraan yakni $\alpha_1=0$, $\alpha_2=0$, $\dot{\alpha}_1=0$, $\dot{\alpha}_2=0$ dan input variasi berupa sudut kemiringan kendaraan (θ) mulai dari 0 derajat sampai 5 derajat, dengan kenaikan variasi pengujian sebesar 1 derajat.

Dari persamaan lagrange yang diperoleh pada bab 3, digunakan persamaan derivatif tetha (θ) dan persamaan derivatif alpha (α) untuk menghasilkan simulasi sistem dalam kondisi yang bervariasi. Adapun persamaan derivatif yang digunakan yakni:

$$\bullet \quad \ddot{\theta} = \frac{1}{I_b + H + k_1 \cos^2 \alpha_1 + k_2 \cos^2 \alpha_2 + k_3 \sin^2 \alpha_1 + k_4 \sin^2 \alpha_2} \times$$

$$[(k_3 - k_1)2\dot{\theta}\dot{\alpha}_1 \cos \alpha_1 \sin \alpha_1 + (k_4 - k_2)2\dot{\theta}\dot{\alpha}_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_2 -$$

$$-I_{g1z}\dot{\alpha}_1\Omega_1 \cos \alpha_1 - I_{g2z}\dot{\alpha}_2\Omega_2 \cos \alpha_2 - Mg \sin \theta]$$

.....(4.1)

$$\bullet \quad \ddot{\alpha}_1 = \frac{I_{g1z}\dot{\theta}\Omega_1\cos\alpha_1+(k_3-k_1)\dot{\theta}^2\cos\alpha_1\sin\alpha_1}{k_5} \dots\dots\dots(4.2)$$

$$\bullet \quad \ddot{\alpha}_2 = \frac{I_{g2z}\dot{\theta}\Omega_2\cos\alpha_2+(k_4-k_2)\dot{\theta}^2\cos\alpha_2\sin\alpha_2}{k_6} \dots\dots\dots(4.3)$$

Dimana:

$$k_1 = I_{g1x} + I_{c1x}$$

$$k_2 = I_{g2x} + I_{c2x}$$

$$k_3 = I_{g1z} + I_{c1z}$$

$$k_4 = I_{g2z} + I_{c2z}$$

$$k_5 = I_{g1y} + I_{c1y}$$

$$k_6 = I_{g2y} + I_{c2y}$$

$$H = m_b C g_b^2 + m_{c1} C g_{c1}^2 + m_{c2} C g_{c2}^2 + m_{g1} C g_{g1}^2 + m_{g2} C g_{g2}^2$$

$$M = m_b C g_b + m_{c1} C g_{c1} + m_{c2} C g_{c2} + m_{g1} C g_{g1} + m_{g2} C g_{g2}$$

Dari ketiga persamaan diatas, digambarkan sebuah blok diagram dengan menggunakan Matlab yang ditunjukkan pada gambar 3.3 dengan output berupa sudut kemiringan kendaraan, sudut gimbal 1 dan sudut gimbal 2.

Kemudian pada *m.file* pada editor *Matlab*, dimasukkan input nilai stabilisasi yang digunakan dengan satuan sudut kemiringan berupa radian, dan kecepatan motor yang digunakan dalam satuan rad/s. Pada gambar 4.1 Ditunjukkan penulisan data input untuk blok diagram pada editor. Dilakukan variasi berupa *initial condition* sudut kemiringan (θ) pada blok integrator theta dalam satuan radian, dan input kecepatan *flywheel* (O) pada editor. Kemudian simulink dan editor dijalankan sehingga menghasilkan grafik stabilisasi yang diinginkan.

```

code_new.m | code_new.m |
1 %input is mgsinteta
2 %output is teta and alpha and alpha2
3 clear;
4 clear;
5 %input material properties
6 Ibx = 8.295*10^-3; %(kg m^2)
7 Ibx1 = 1.85*10^-3; %(kg m^2)
8 Ibx2 = 9.24*10^-4;
9 Ibx3 = 6.79*10^-4;
10 Ibx4 = 1.55*10^-3; %(kg m^2)
11 Ibx5 = 9.24*10^-4;
12 Ibx6 = 6.79*10^-4;
13 Ibx7 = 1.872*10^-3;
14 Ibx8 = 3.561*10^-3;
15 Ibx9 = 1.872*10^-3;
16 Ibx10 = 1.872*10^-3;
17 Ibx11 = 3.561*10^-3;
18 Ibx12 = 1.872*10^-3;
19
20 Mb = 1.644; %(kg)
21 Mcl = 0.366; %(kg)
22 Mcc = 0.366; %(kg)
23 Mgl = 0.869; %(kg)
24 Mgc = 0.869; %(kg)
25
26 Cgb = 0.0702; %(m)
27 Cgl1 = 0.1024; %(m)
28 Cgl2 = 0.1024; %(m)
29 Cgl3 = 0.145; %(m)
30 Cgl4 = 0.145; %(m)
31
% = = = =
32
33 Cgg1 = 0.145; %(m)
34 Cgg2 = 0.145; %(m)
35
36 g = 9.8;
37 O1 = 2900; %rad/s
38 O2 = -2900; %rad/s
39
40 %calculate constant value
41 k1 = Ibx1*Igl1;
42 k2 = Ibx2*Igl2;
43 k3 = Ibx3*Igl3;
44 k4 = Ibx4*Igl4;
45 k5 = k1-k3;
46 k6 = k2-k4;
47
48 M = Mb*Cgb + Mcl*Cgl1 + Mcc*Cgl2 + Mgl*Cgl3 + Mgc*Cgl4;
49 H = Mb*Cgb^2 + Mcl*Cgl1^2 + Mcc*Cgl2^2 + Mgl*Cgl3^2 + Mgc*Cgl4^2;
50
51 % for t=0:100;
52
53 %user input
54 % theta_in = 0;
55 % C = M*theta_in;
56 % in = ([t, C]);
57
58 %run simulink code
59 sim('new');
60 % sducrma(theta);
61 % Sudut (basis, kolom)=t;
62
63 %plot results

```

Gambar 4.1. M-file, input koefisien pada blok diagram *Simulink*

Dari hasil Simulink yang telah dijalankan, diperoleh karakteristik stabilisasi sistem kendaraan roda dua. Dari beberapa data yang diperoleh mulai dari besar putaran flywheel 500 rad/s sampai dengan 1000 rad/s dengan kenaikan pengujian 10 rad/s, diambil data putaran flywheel terbaik yang menghasilkan sistem kendaraan yang beresilasi pada sumbu 0 derajat kendaraan. Adapun data yang diambil untuk setiap kenaikan nilai putaran flywheel yakni:

a) Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Girokopik Pada $\theta=1^\circ$

Tabel 4.1 Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Girokopik Pada $\theta=1^\circ$

Putaran Flywheel (rad/s)	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1	Sudut Gimbal 2
500	Osilasi kendaraan $\pm 6^\circ$	44 s	$\pm 70^\circ$	$\pm 70^\circ$
530	Osilasi kendaraan $\pm 11^\circ$	25 s	$\pm 48^\circ$	$\pm 48^\circ$
540	Osilasi kendaraan $\pm 11^\circ$	25 s	$\pm 48^\circ$	$\pm 48^\circ$

610	Osilasi kendaraan $\pm 13^\circ$	29 s	$\pm 73^\circ$	$\pm 73^\circ$
620	Osilasi kendaraan $\pm 13^\circ$	29 s	$\pm 73^\circ$	$\pm 73^\circ$
630	Osilasi kendaraan $\pm 5^\circ$	30 s	$\pm 55^\circ$	$\pm 55^\circ$
640	Osilasi kendaraan $\pm 7^\circ$	30 s	$\pm 87^\circ$	$\pm 87^\circ$
710	Osilasi kendaraan $\pm 7^\circ$	34 s	$\pm 82^\circ$	$\pm 82^\circ$
720	Osilasi kendaraan $\pm 4^\circ$	34 s	$\pm 50^\circ$	$\pm 50^\circ$
730	Osilasi kendaraan $\pm 5^\circ$	34 s	$\pm 51^\circ$	$\pm 51^\circ$
740	Osilasi kendaraan $\pm 7^\circ$	35 s	$\pm 59^\circ$	$\pm 59^\circ$
770	Osilasi kendaraan $\pm 22^\circ$	58 s	$\pm 89^\circ$	$\pm 89^\circ$
830	Osilasi kendaraan $\pm 6^\circ$	39 s	$\pm 70^\circ$	$\pm 70^\circ$
840	Osilasi kendaraan $\pm 4^\circ$	40 s	$\pm 57^\circ$	$\pm 57^\circ$
960	Osilasi kendaraan $\pm 6^\circ$	45 s	$\pm 60^\circ$	$\pm 60^\circ$
1000	Osilasi kendaraan $\pm 8^\circ$	61 s	$\pm 64^\circ$	$\pm 64^\circ$

b) Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=2^\circ$

Tabel 4.2 Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=2^\circ$

Putaran Flywheel (rad/s)	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1	Sudut Gimbal 2
530	Osilasi kendaraan $\pm 7^\circ$	36 s	$\pm 73^\circ$	$\pm 73^\circ$
580	Osilasi kendaraan $\pm 5^\circ$	26 s	$\pm 67^\circ$	$\pm 67^\circ$

590	Osilasi kendaraan $\pm 10^\circ$	37 s	$\pm 57^\circ$	$\pm 57^\circ$
630	Osilasi kendaraan $\pm 6^\circ$	60 s	$\pm 76^\circ$	$\pm 76^\circ$
650	Osilasi kendaraan $\pm 4^\circ$	49 s	$\pm 75^\circ$	$\pm 75^\circ$
740	Osilasi kendaraan $\pm 6^\circ$	39 s	$\pm 71^\circ$	$\pm 71^\circ$
750	Osilasi kendaraan $\pm 4^\circ$	50 s	$\pm 48^\circ$	$\pm 48^\circ$
800	Osilasi kendaraan $\pm 8^\circ$	50 s	$\pm 76^\circ$	$\pm 76^\circ$
840	Osilasi kendaraan $\pm 7^\circ$	36 s	$\pm 80^\circ$	$\pm 80^\circ$
960	Osilasi kendaraan $\pm 14^\circ$	40 s	$\pm 72^\circ$	$\pm 72^\circ$
970	Osilasi kendaraan $\pm 4^\circ$	56 s	$\pm 57^\circ$	$\pm 57^\circ$
1000	Osilasi kendaraan $\pm 4^\circ$	50 s	$\pm 55^\circ$	$\pm 55^\circ$

c) Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=3^\circ$

Tabel 4.3 Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=3^\circ$

Putaran Flywheel (rad/s)	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1	Sudut Gimbal 2
620	Osilasi kendaraan $\pm 9^\circ$	22 s	$\pm 46^\circ$	$\pm 46^\circ$
680	Osilasi kendaraan $\pm 12^\circ$	53 s	$\pm 82^\circ$	$\pm 82^\circ$
720	Osilasi kendaraan $\pm 8^\circ$	35 s	$\pm 70^\circ$	$\pm 70^\circ$
750	Osilasi kendaraan $\pm 9^\circ$	30 s	$\pm 62^\circ$	$\pm 62^\circ$
810	Osilasi kendaraan $\pm 10^\circ$	64 s	$\pm 70^\circ$	$\pm 70^\circ$

820	Osilasi kendaraan $\pm 12^\circ$	56 s	$\pm 60^\circ$	$\pm 60^\circ$
870	Osilasi kendaraan $\pm 9^\circ$	56 s	$\pm 62^\circ$	$\pm 62^\circ$
890	Osilasi kendaraan $\pm 8^\circ$	53 s	$\pm 85^\circ$	$\pm 85^\circ$
900	Osilasi kendaraan $\pm 13^\circ$	59 s	$\pm 72^\circ$	$\pm 72^\circ$

d) Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=4^\circ$

Tabel 4.4 Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=4^\circ$

Putaran Flywheel (rad/s)	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1	Sudut Gimbal 2
610	Osilasi kendaraan $\pm 12^\circ$	32 s	$\pm 71^\circ$	$\pm 71^\circ$
630	Osilasi kendaraan $\pm 9^\circ$	36 s	$\pm 52^\circ$	$\pm 52^\circ$
680	Osilasi kendaraan $\pm 13^\circ$	71 s	$\pm 86^\circ$	$\pm 86^\circ$
790	Osilasi kendaraan $\pm 8^\circ$	34 s	$\pm 8^\circ$	$\pm 8^\circ$
860	Osilasi kendaraan $\pm 8^\circ$	41 s	$\pm 78^\circ$	$\pm 78^\circ$
880	Osilasi kendaraan $\pm 20^\circ$	156 s	$\pm 65^\circ$	$\pm 65^\circ$
920	Osilasi kendaraan $\pm 9^\circ$	50 s	$\pm 53^\circ$	$\pm 53^\circ$

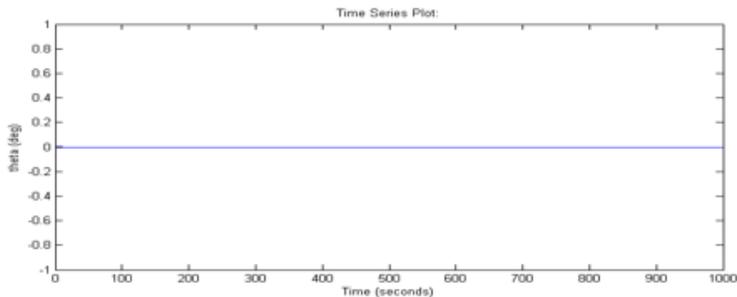
e) Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=5^\circ$

Tabel 4.5 Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta=5^\circ$

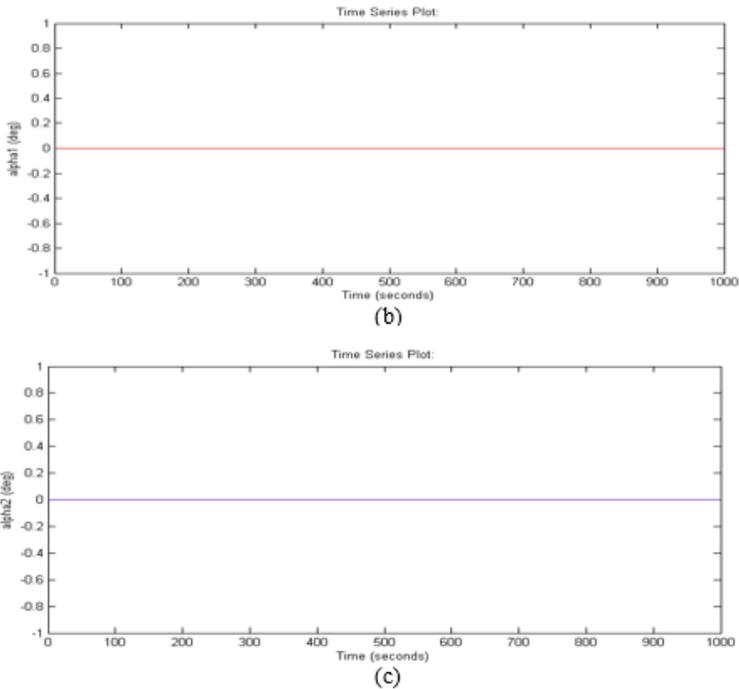
Putaran Flywheel (rad/s)	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1	Sudut Gimbal 2
590	Osilasi kendaraan $\pm 16^\circ$	56 s	$\pm 65^\circ$	$\pm 65^\circ$
660	Osilasi kendaraan $\pm 17^\circ$	27 s	$\pm 73^\circ$	$\pm 73^\circ$
820	Osilasi kendaraan $\pm 22^\circ$	177 s	$\pm 64^\circ$	$\pm 64^\circ$
880	Osilasi kendaraan $\pm 16^\circ$	58 s	$\pm 56^\circ$	$\pm 56^\circ$
940	Osilasi kendaraan $\pm 23^\circ$	153 s	$\pm 80^\circ$	$\pm 80^\circ$
950	Osilasi kendaraan $\pm 16^\circ$	59 s	$\pm 85^\circ$	$\pm 85^\circ$
980	Osilasi kendaraan $\pm 17^\circ$	75 s	$\pm 69^\circ$	$\pm 69^\circ$

4.1.2 Analisa Grafik Teoritis Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan *Double Gyroscope*

a) Grafik Kondisi Stabilisasi Kendaraan dengan *Initial Condition* $\theta = 0^\circ$



(a)

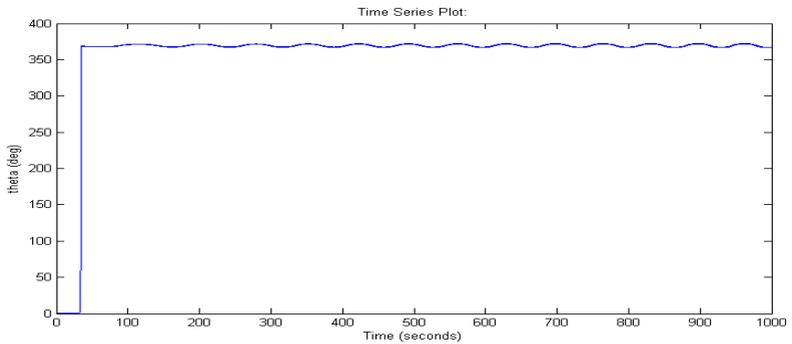


Gambar 4.2. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=0^\circ$, $\Omega=560$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2

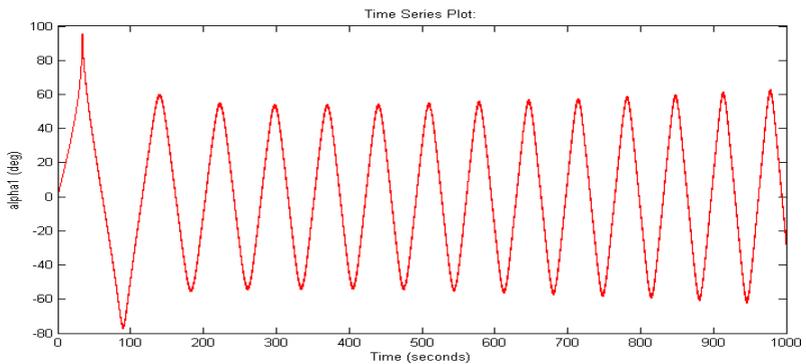
Pada gambar 4.2, ditunjukkan secara berturut-turut sudut osilasi (a) kendaraan, (b) gimbal 1, (c) gimbal 2 terhadap fungsi waktu. Pada kecepatan *flywheel* sebesar 560 rad/s dan *initial condition* θ sebesar 0 derajat serta sudut gimbal sebesar 0 derajat, diperoleh grafik dengan sudut osilasi kendaraan sebesar 0 derajat, gimbal 1 sebesar 0 derajat dan gimbal 2 sebesar 0 derajat. Hal ini terjadi dikarenakan nilai *initial condition* 0 mengakibatkan semua perumusan bernilai 0 sehingga secara teoritis dinilai kendaraan

sudah dalam kondisi stabil pada kondisi berapapun nilai kecepatan *flywheel* diinputkan.

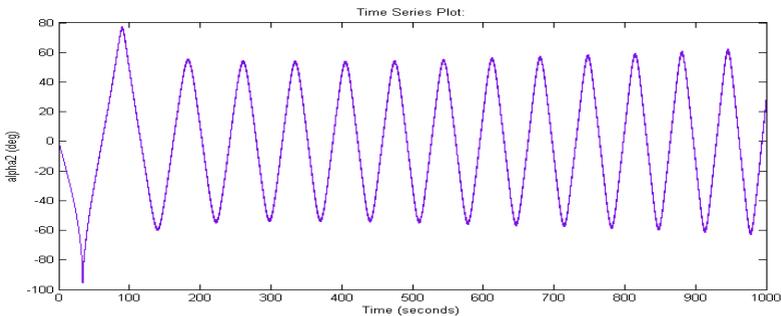
- b) Grafik Kondisi Stabilisasi Kendaraan dengan *Initial Condition* $\theta = 1^\circ$



(a)



(b)

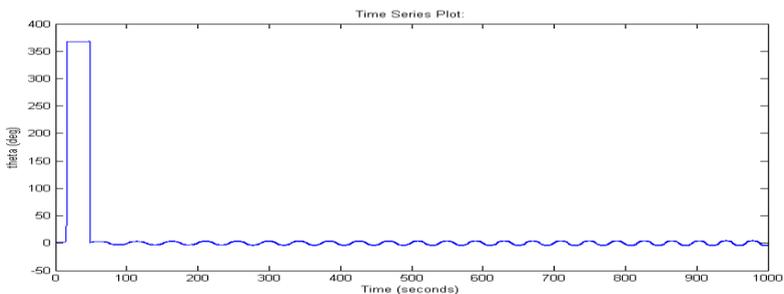


(c)

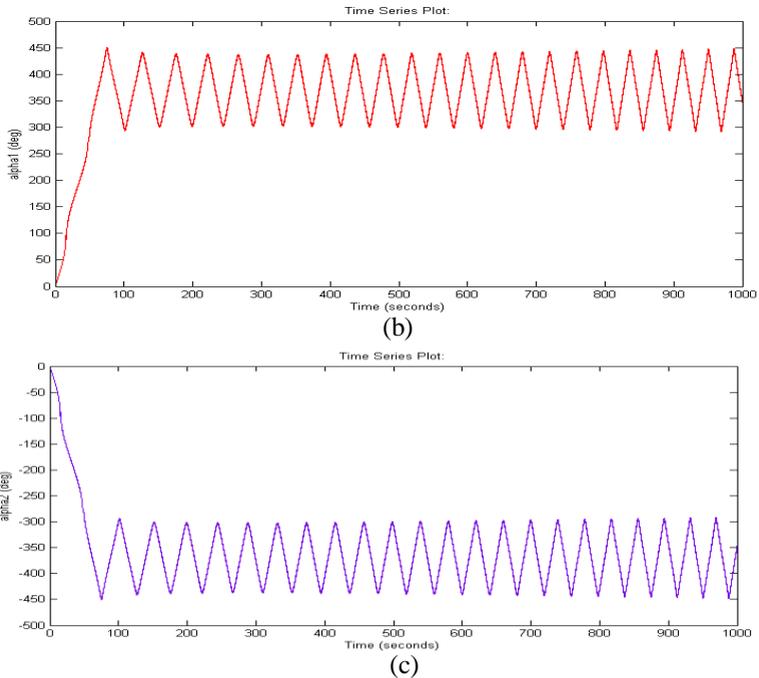
Gambar 4.3. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=1^\circ$, $\Omega=720$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2

Pada gambar 4.3, ditunjukkan secara berturut-turut sudut osilasi (a) kendaraan, (b) gimbal 1, (c) gimbal 2 terhadap fungsi waktu. Pada kecepatan *flywheel* sebesar 720 rad/s dan *initial condition* θ sebesar 1 derajat serta sudut gimbal sebesar 0 derajat, diperoleh grafik dengan sudut osilasi kendaraan sebesar 4 derajat, gimbal 1 dan gimbal 2 sebesar berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 50 derajat dengan arah yang saling berlawanan serta waktu stabil yang diperlukan sistem sebesar 34 detik.

c) Grafik Kondisi Stabilisasi Kendaraan dengan *Initial Condition* $\theta = 2^\circ$



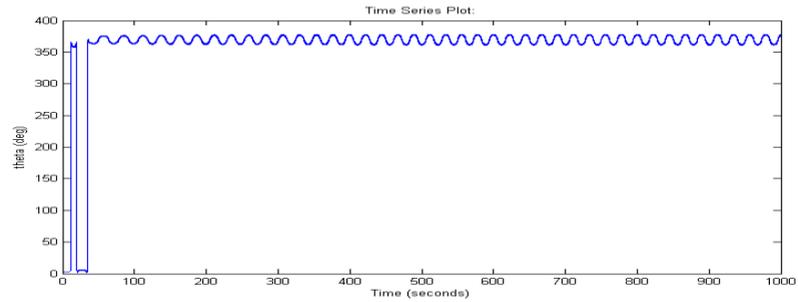
(a)



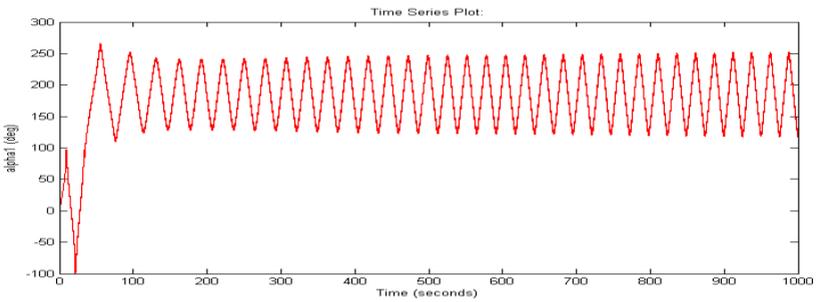
Gambar 4.4. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=2^\circ$, $\Omega=650$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2

Pada gambar 4.4, ditunjukkan secara berturut-turut sudut osilasi (a) kendaraan, (b) gimbal 1, (c) gimbal 2 terhadap fungsi waktu. Pada kecepatan *flywheel* sebesar 650 rad/s dan *initial condition* θ sebesar 2 derajat serta sudut gimbal sebesar 0 derajat, diperoleh grafik dengan sudut osilasi kendaraan sebesar 4 derajat, gimbal 1 dan gimbal 2 sebesar berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 75 derajat dengan arah yang saling berlawanan serta waktu stabil yang diperlukan sistem sebesar 49 detik.

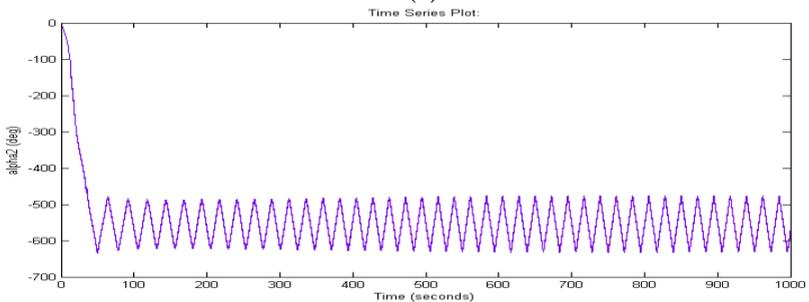
d) Grafik Kondisi Stabilisasi Kendaraan dengan *Initial Condition*
 $\theta = 3^\circ$



(a)



(b)

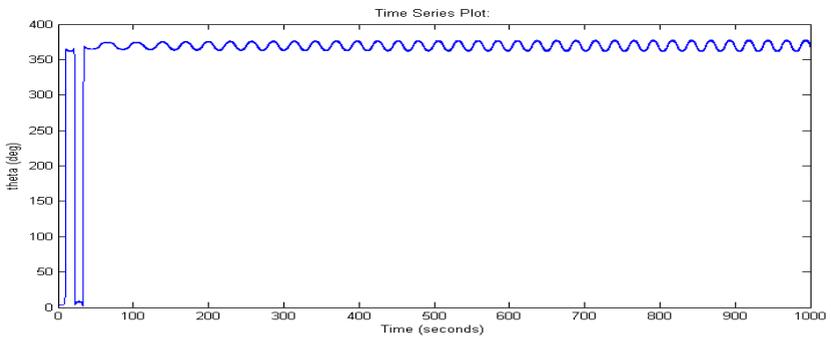


(c)

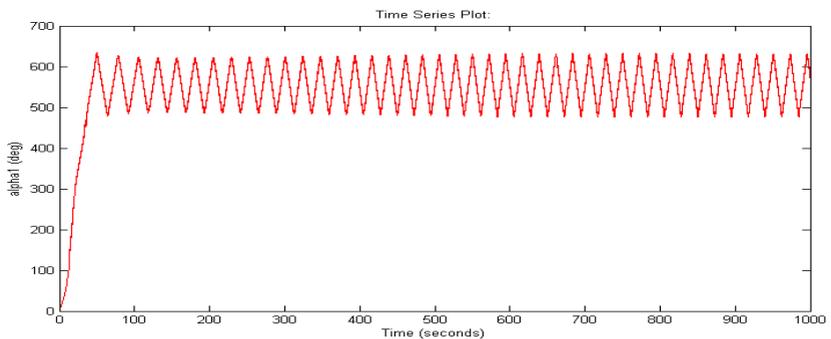
Gambar 4.5. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=3^\circ$, $\Omega=720$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2

Pada gambar 4.5, ditunjukkan secara berturut-turut sudut osilasi (a) kendaraan, (b) gimbal 1, (c) gimbal 2 terhadap fungsi waktu. Pada kecepatan *flywheel* sebesar 720 rad/s dan *initial condition* θ sebesar 3 derajat serta sudut gimbal sebesar 0 derajat, diperoleh grafik dengan sudut osilasi kendaraan sebesar 8 derajat, gimbal 1 dan gimbal 2 sebesar berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 70 derajat dengan arah yang saling berlawanan serta waktu stabil yang diperlukan sistem sebesar 35 detik.

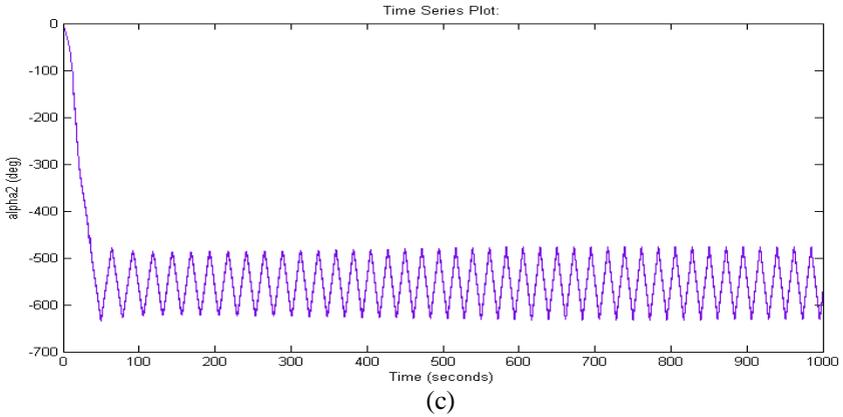
- e) Grafik Kondisi Stabilisasi Kendaraan dengan *Initial Condition* $\theta = 4^\circ$



(a)



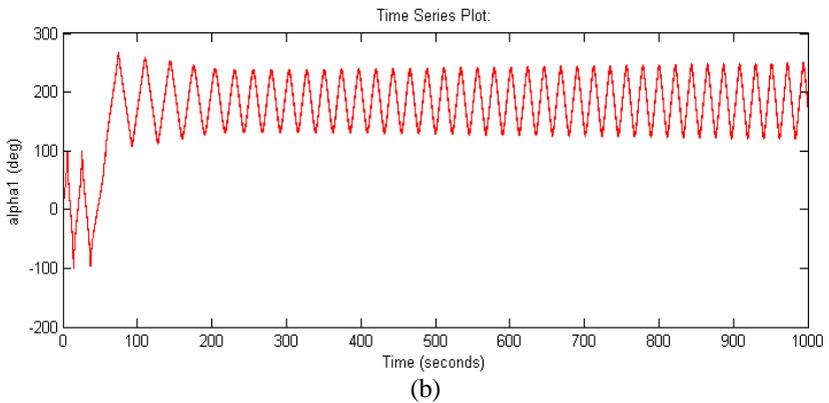
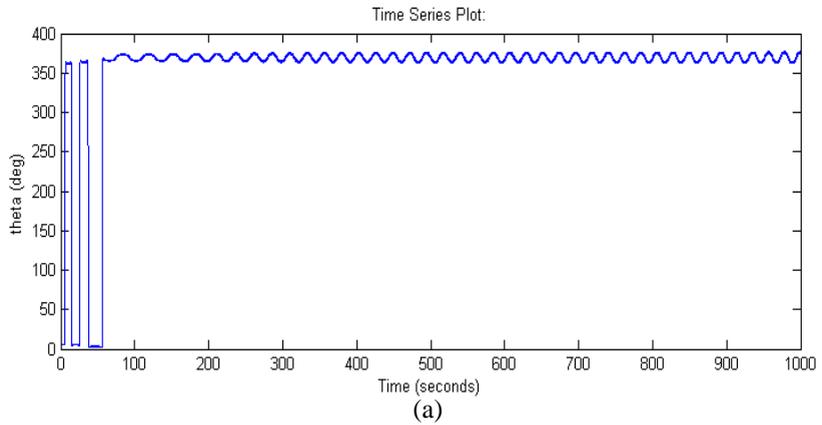
(b)

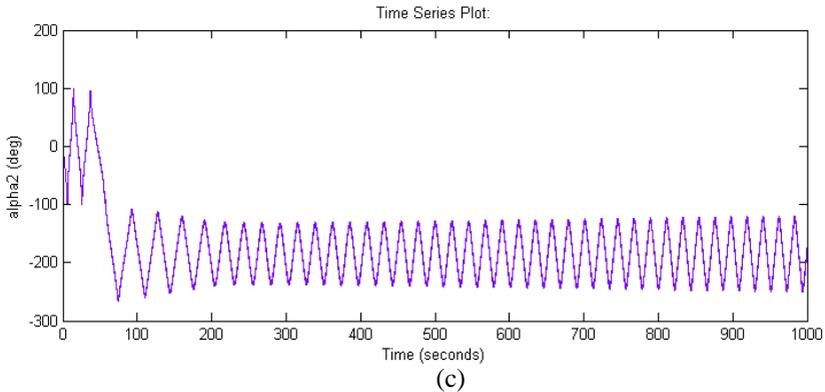


Gambar 4.6. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=4^\circ$, $\Omega=790$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2

Pada gambar 4.6, ditunjukkan secara berturut-turut sudut osilasi (a) kendaraan, (b) gimbal 1, (c) gimbal 2 terhadap fungsi waktu. Pada kecepatan flywheel sebesar 790 rad/s dan initial condition θ sebesar 4 derajat serta sudut gimbal sebesar 0 derajat, diperoleh grafik dengan sudut osilasi kendaraan sebesar 8 derajat, gimbal 1 dan gimbal 2 sebesar berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 80 derajat dengan arah yang saling berlawanan serta waktu stabil yang diperlukan sistem sebesar 34 detik.

- f) Grafik Kondisi Stabilisasi Kendaraan dengan Initial Condition $\theta = 5^\circ$





Gambar 4.7. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=5^\circ$, $\Omega=590$ rad/s (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal 1 α_1 , dan (c) Sudut Gimbal 2 α_2

Pada gambar 4.7, ditunjukkan secara berturut-turut sudut osilasi (a) kendaraan, (b) gimbal 1, (c) gimbal 2 terhadap fungsi waktu. Pada kecepatan *flywheel* sebesar 590 rad/s dan *initial condition* θ sebesar 5 derajat serta sudut gimbal sebesar 0 derajat, diperoleh grafik dengan sudut osilasi kendaraan sebesar 16 derajat, gimbal 1 dan gimbal 2 sebesar berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 65 derajat dengan arah yang saling berlawanan serta waktu stabil yang diperlukan sistem sebesar 56 detik.

4.2 Pengujian Simulasi Dinamis

4.2.1 Tabel Data Karakteristik Sistem Kendaraan *Double Gyroscope* Berdasarkan Variasi Kecepatan Putar *Flywheel* (Ω)

Pengujian dilakukan dengan menggunakan *Dynamic Simulation* pada *Autodesk Inventor*. Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik sistem berdasarkan variasi sudut kemiringan kendaraan (θ) terhadap nilai kecepatan putaran *flywheel* (Ω). Seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab 3.4.2,

simulasi dilakukan dengan tahapan seperti yang dijelaskan. Kemudian diperoleh data karakteristik grafik stabilitas sistem yang menunjukkan pengaruh adanya perubahan kecepatan putaran *flywheel* terhadap karakteristik grafik stabilitas dan waktu stabilisasi sistem saat beresilasi pada sudut kendaraan 0 derajat berdasarkan simulasi dinamis. Adapun data karakteristik stabilitas tersebut adalah sebagai berikut:

a) Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta = 0^\circ$

Tabel 4.6 Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik *Double Gyroscope* pada $\theta=0^\circ$

RPM	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1 (α_1)	Sudut Gimbal 2 (α_2)
6300	θ Osilasi pada $\pm 14^\circ$	127 s	-85°	$\pm 40^\circ$
6500	θ Osilasi pada $\pm 15^\circ$	70 s	-86°	$\pm 43^\circ$
6800	θ Osilasi pada $\pm 16^\circ$	100 s	-86°	$\pm 45^\circ$
7000	θ Osilasi pada $\pm 16^\circ$	96 s	$\pm 39^\circ$	87°
7200	θ Osilasi pada $\pm 17^\circ$	80 s	82°	$\pm 45^\circ$
7300	θ Osilasi pada $\pm 17^\circ$	81 s	$\pm 45^\circ$	-83°
7600	θ Osilasi pada $\pm 19^\circ$	122 s	$\pm 44^\circ$	83°
8100	θ Osilasi pada $\pm 20^\circ$	63 s	85°	$\pm 45^\circ$
8500	θ Osilasi pada $\pm 20^\circ$	77 s	$\pm 42^\circ$	-87°
8700	θ Osilasi pada $\pm 20^\circ$	79 s	$\pm 46^\circ$	-86°
8800	θ Osilasi pada $\pm 20^\circ$	111 s	$\pm 41^\circ$	-86°

9000	θ Osilasi pada $\pm 22^\circ$	50 s	$\pm 45^\circ$	-86°
9200	θ Osilasi pada $\pm 22^\circ$	84 s	$\pm 45^\circ$	-86°
9300	θ Osilasi pada $\pm 17^\circ$	54 s	-88°	$\pm 32^\circ$
9400	θ Osilasi pada $\pm 22^\circ$	68 s	$\pm 46^\circ$	86°
9500	θ Osilasi pada $\pm 22^\circ$	51 s	$\pm 45^\circ$	-87°
9800	θ Osilasi pada $\pm 20^\circ$	85 s	$\pm 37^\circ$	88°
9900	θ Osilasi pada $\pm 20^\circ$	70 s	$\pm 40^\circ$	-88°
10000	θ Osilasi pada $\pm 20^\circ$	78 s	-88°	$\pm 40^\circ$
12000	θ Osilasi pada $\pm 12^\circ$	0 s	$\pm 22^\circ$	90°
12500	θ Osilasi pada $\pm 3^\circ$	0 s	$\pm 11^\circ$	90°
13000	θ Osilasi pada $\pm 5^\circ$	0 s	$\pm 15^\circ$	90°

b) Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta = 1^\circ$

Tabel 4.7 Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik *Double Gyroscope* pada $\theta=1^\circ$

RPM	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1 (α_1)	Sudut Gimbal 2 (α_2)
5700	θ berosilasi pada $\pm 13^\circ$	61 s	$\pm 40^\circ$	80°
6400	θ berosilasi pada $\pm 13^\circ$	80 s	80°	$\pm 45^\circ$
7000	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	70 s	$\pm 45^\circ$	82°
7100	θ berosilasi pada $\pm 16^\circ$	74 s	$\pm 46^\circ$	82

7400	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	76 s	$\pm 43^\circ$	-85°
7600	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	90 s	86°	$\pm 35^\circ$
7700	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	70 s	$\pm 44^\circ$	85°
7900	θ berosilasi pada $\pm 19^\circ$	103 s	-85°	$\pm 45^\circ$
8300	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	90 s	85°	$\pm 40^\circ$
8900	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	75 s	86°	$\pm 45^\circ$
9000	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	81 s	$\pm 42^\circ$	88°
9100	θ berosilasi pada $\pm 21^\circ$	50 s	$\pm 45^\circ$	-87°
9200	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	90 s	87°	$\pm 40^\circ$
9400	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	75 s	-87°	$\pm 44^\circ$
9500	θ berosilasi pada $\pm 24^\circ$	100 s	-87°	$\pm 45^\circ$
9700	θ berosilasi pada $\pm 23^\circ$	47 s	-87°	$\pm 42^\circ$
9900	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	54 s	-88°	$\pm 40^\circ$
10000	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	60 s	88°	$\pm 39^\circ$
17000	θ berosilasi pada $\pm 29^\circ$	0 s	-90°	$\pm 31^\circ$
17500	θ berosilasi pada $\pm 31^\circ$	0 s	-90°	$\pm 32^\circ$
18000	θ berosilasi pada $\pm 31^\circ$	0 s	-90°	$\pm 31^\circ$

- c) Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Girokopik Pada $\theta = 2^\circ$

Tabel 4.8 Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik *Double Gyroscope* pada $\theta=2^\circ$

RPM	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1 (α_1)	Sudut Gimbal 2 (α_2)
6100	θ berosilasi pada $\pm 14^\circ$	92 s	$\pm 40^\circ$	80°
6700	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	72 s	$\pm 44^\circ$	-82°
6800	θ berosilasi pada $\pm 13^\circ$	60 s	85°	$\pm 36^\circ$
7200	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	67 s	$\pm 45^\circ$	-85°
7400	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	44 s	82°	$\pm 45^\circ$
7600	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	90 s	85°	$\pm 45^\circ$
7700	θ berosilasi pada $\pm 18^\circ$	90 s	-85°	$\pm 42^\circ$
7800	θ berosilasi pada $\pm 16^\circ$	113 s	-85°	$\pm 46^\circ$
8100	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	47 s	$\pm 36^\circ$	86°
8300	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	64 s	85°	$\pm 45^\circ$
8400	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	55 s	$\pm 45^\circ$	86°
8500	θ berosilasi pada $\pm 21^\circ$	90 s	-85°	$\pm 45^\circ$
8900	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	55 s	$\pm 46^\circ$	86°
9000	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	51 s	86°	$\pm 46^\circ$
9100	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	64 s	$\pm 42^\circ$	-87°
9200	θ berosilasi pada $\pm 14^\circ$	60 s	-88°	$\pm 28^\circ$

9300	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	80 s	$\pm 38^\circ$	87°
9400	θ berosilasi pada $\pm 21^\circ$	37 s	$\pm 40^\circ$	87°
9600	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	60 s	$\pm 30^\circ$	88°
9800	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	86 s	$\pm 35^\circ$	88°
19500	θ berosilasi pada $\pm 39^\circ$	0 s	-90°	$\pm 35^\circ$
20000	θ berosilasi pada $\pm 39^\circ$	0 s	-90°	$\pm 35^\circ$
20500	θ berosilasi pada $\pm 42^\circ$	0 s	-90°	$\pm 37^\circ$
21000	θ berosilasi pada $\pm 43^\circ$	0 s	-90°	$\pm 37^\circ$
21500	θ berosilasi pada $\pm 45^\circ$	0 s	-90°	$\pm 38^\circ$
22000	θ berosilasi pada $\pm 47^\circ$	0 s	-90°	$\pm 37^\circ$

d) Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta = 3^\circ$

Tabel 4.9 Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik *Double Gyroscope* pada $\theta=3^\circ$

RPM	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1 (α_1)	Sudut Gimbal 2 (α_2)
6400	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	92 s	$\pm 40^\circ$	-82°
6500	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	88 s	$\pm 40^\circ$	-80°
6600	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	68 s	-97°	$\pm 45^\circ$
6800	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	87 s	82°	$\pm 45^\circ$
7000	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	56 s	-85°	$\pm 40^\circ$

7300	θ bersilasi pada $\pm 17^\circ$	46 s	-84°	$\pm 45^\circ$
7600	θ bersilasi pada $\pm 18^\circ$	72 s	84°	$\pm 45^\circ$
7700	θ bersilasi pada $\pm 17^\circ$	82 s	-85°	$\pm 46^\circ$
7800	θ bersilasi pada $\pm 20^\circ$	80 s	83°	$\pm 46^\circ$
8000	θ bersilasi pada $\pm 20^\circ$	75 s	$\pm 45^\circ$	-85°
8300	θ bersilasi pada $\pm 20^\circ$	125 s	85°	$\pm 42^\circ$
8900	θ bersilasi pada $\pm 20^\circ$	131 s	-82°	$\pm 42^\circ$
9000	θ bersilasi pada $\pm 24^\circ$	75 s	86°	$\pm 46^\circ$
9200	θ bersilasi pada $\pm 23^\circ$	63 s	85°	$\pm 45^\circ$
9300	θ bersilasi pada $\pm 22^\circ$	65 s	$\pm 45^\circ$	87°
9500	θ bersilasi pada $\pm 22^\circ$	97 s	$\pm 43^\circ$	86°
9600	θ bersilasi pada $\pm 22^\circ$	84 s	$\pm 42^\circ$	-87°
9800	θ bersilasi pada $\pm 20^\circ$	100 s	-88°	$\pm 37^\circ$
11000	θ bersilasi pada $\pm 17^\circ$	80 s	89°	$\pm 30^\circ$
21500	θ bersilasi pada $\pm 46^\circ$	0 s	-90°	$\pm 37^\circ$
22000	θ bersilasi pada $\pm 47^\circ$	0 s	-90°	$\pm 38^\circ$
22500	θ bersilasi pada $\pm 48^\circ$	0 s	-90°	$\pm 39^\circ$
23000	θ bersilasi pada $\pm 50^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
23500	θ bersilasi pada $\pm 52^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$

24000	θ berosilasi pada $\pm 53^\circ$	0 s	-90°	$\pm 37^\circ$
25000	θ berosilasi pada $\pm 56^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$

- e) Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta = 4^\circ$

Tabel 4.10 Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik *Double Gyroscope* pada $\theta=4^\circ$

RPM	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1 (α_1)	Sudut Gimbal 2 (α_2)
7100	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	80 s	-84°	$\pm 41^\circ$
7200	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	75 s	84°	$\pm 42^\circ$
7400	θ berosilasi pada $\pm 18^\circ$	84 s	$\pm 45^\circ$	82°
7700	θ berosilasi pada $\pm 15^\circ$	76 s	$\pm 47^\circ$	84°
7800	θ berosilasi pada $\pm 16^\circ$	78 s	$\pm 35^\circ$	-86°
8600	θ berosilasi pada $\pm 21^\circ$	70 s	-86°	$\pm 45^\circ$
8800	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	47 s	86°	$\pm 45^\circ$
8900	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	82 s	-86°	$\pm 45^\circ$
9000	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	47 s	$\pm 45^\circ$	86°
9400	θ berosilasi pada $\pm 23^\circ$	49 s	$\pm 45^\circ$	-88°
9500	θ berosilasi pada $\pm 22^\circ$	65 s	-87°	$\pm 43^\circ$
9600	θ berosilasi pada $\pm 23^\circ$	65 s	86°	$\pm 40^\circ$
10000	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	49 s	$\pm 30^\circ$	88°

10500	θ berosilasi pada $\pm 24^\circ$	56 s	$\pm 41^\circ$	-88°
11000	θ berosilasi pada $\pm 23^\circ$	57 s	89°	$\pm 35^\circ$
11500	θ berosilasi pada $\pm 20^\circ$	60 s	$\pm 30^\circ$	-89°
12000	θ berosilasi pada $\pm 19^\circ$	65 s	-90°	$\pm 28^\circ$
12500	θ berosilasi pada $\pm 17^\circ$	116 s	-90°	$\pm 25^\circ$
24000	θ berosilasi pada $\pm 53^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
24500	θ berosilasi pada $\pm 55^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
25000	θ berosilasi pada $\pm 56^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
25500	θ berosilasi pada $\pm 57^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
26000	θ berosilasi pada $\pm 59^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
26500	θ berosilasi pada $\pm 60^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
27000	θ berosilasi pada $\pm 61^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
27500	θ berosilasi pada $\pm 63^\circ$	0 s	-90°	$\pm 41^\circ$

f) Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik Pada $\theta = 5^\circ$

Tabel 4.11 Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan Giroskopik *Double Gyroscope* pada $\theta=5^\circ$

RPM	Karakteristik Grafik	Waktu Stabilisasi	Sudut Gimbal 1 (α_1)	Sudut Gimbal 2 (α_2)
6000	θ berosilasi pada $\pm 14^\circ$	60 s	-82°	$\pm 43^\circ$
6100	θ berosilasi pada $\pm 14^\circ$	129 s	82°	$\pm 42^\circ$

6300	θ bersilasi pada $\pm 15^\circ$	80 s	$\pm 43^\circ$	-83°
6500	θ bersilasi pada $\pm 14^\circ$	110 s	81°	$\pm 45^\circ$
6600	θ bersilasi pada $\pm 15^\circ$	60 s	-84°	$\pm 42^\circ$
6800	θ bersilasi pada $\pm 15^\circ$	49 s	$\pm 41^\circ$	88°
7000	θ bersilasi pada $\pm 17^\circ$	61 s	82°	$\pm 45^\circ$
7200	θ bersilasi pada $\pm 17^\circ$	76 s	$\pm 45^\circ$	82°
7300	θ bersilasi pada $\pm 17^\circ$	83 s	82°	$\pm 46^\circ$
7500	θ bersilasi pada $\pm 18^\circ$	55 s	-85°	$\pm 45^\circ$
7800	θ bersilasi pada $\pm 16^\circ$	90 s	85°	$\pm 44^\circ$
7900	θ bersilasi pada $\pm 16^\circ$	93 s	86°	$\pm 37^\circ$
8400	θ bersilasi pada $\pm 20^\circ$	49 s	85°	$\pm 46^\circ$
8500	θ bersilasi pada $\pm 22^\circ$	43 s	$\pm 45^\circ$	-86°
8600	θ bersilasi pada $\pm 20^\circ$	58 s	86°	$\pm 44^\circ$
8900	θ bersilasi pada $\pm 22^\circ$	49 s	86°	$\pm 44^\circ$
9000	θ bersilasi pada $\pm 22^\circ$	53 s	86°	$\pm 46^\circ$
9200	θ bersilasi pada $\pm 22^\circ$	70 s	-87°	$\pm 45^\circ$
9300	θ bersilasi pada $\pm 23^\circ$	65 s	$\pm 46^\circ$	86°
9400	θ bersilasi pada $\pm 23^\circ$	79 s	$\pm 45^\circ$	86°
9700	θ bersilasi pada $\pm 20^\circ$	70 s	88°	$\pm 37^\circ$

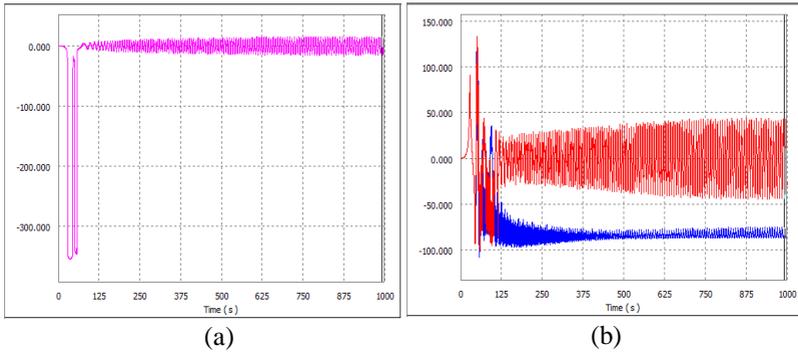
11000	θ beresilasi pada $\pm 11^\circ$	71 s	-90°	$\pm 21^\circ$
25500	θ beresilasi pada $\pm 57^\circ$	0 s	-90°	$\pm 40^\circ$
26000	θ beresilasi pada $\pm 58^\circ$	0 s	-90°	$\pm 41^\circ$
26500	θ beresilasi pada $\pm 60^\circ$	0 s	-90°	$\pm 41^\circ$
27000	θ beresilasi pada $\pm 62^\circ$	0 s	-90°	$\pm 41^\circ$

Berdasarkan tabel data diatas, didapatkan 2 jenis grafik karakteristik stabilitas untuk setiap variasi sudut yang ada yang nantinya akan dianalisa pada penelitian selanjutnya.

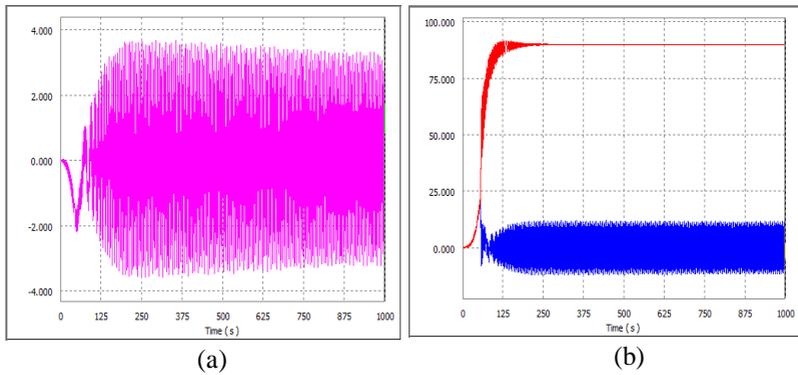
4.2.2 Analisa Grafik Simulasi Karakteristik Stabilitas Sistem Kendaraan *Double Gyroscope*

Grafik karakteristik stabilitas yang dianalisa memiliki keterbatasan berupa kedudukan sudut kendaraan terhadap jalan yang dapat berputar 360 derajat dimana pada kondisi aslinya, kendaraan tidak dapat mengalami kedudukan sudut sebesar itu. Pada pemodelan simulasi dilakukan pengujian bagaimana kendaraan dapat beresilasi pada kedudukan sudut kendaraan 0 derajat. Sehingga, jika dijumpai posisi sudut kendaraan mencapai ± 360 derajat, maka dianggap kendaraan dalam kondisi mendapatkan waktu tunggu untuk stabilitas berikutnya sampai kendaraan beresilasi pada 0 derajat. Adapun grafik karakteristik stabilitas sistem kendaraan double gyroscope untuk setiap variasi sudut kemiringan kendaraan antara lain:

a) Grafik Karakteristik Stabilitas Sistem dengan $\theta=0^\circ$



Gambar 4.8. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=0^\circ$, $\Omega=6500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

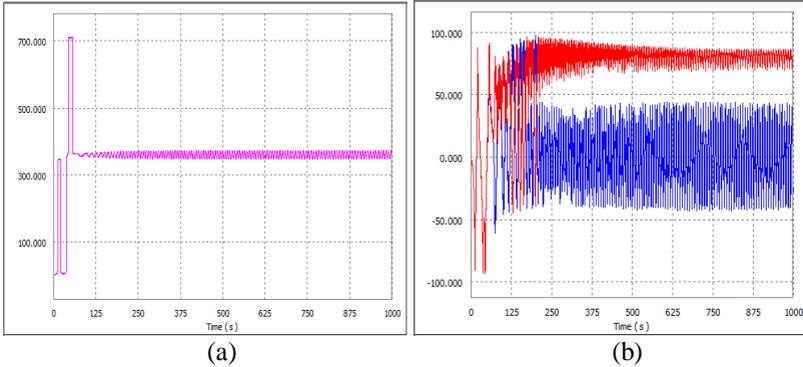


Gambar 4.9. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=0^\circ$, $\Omega=12500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

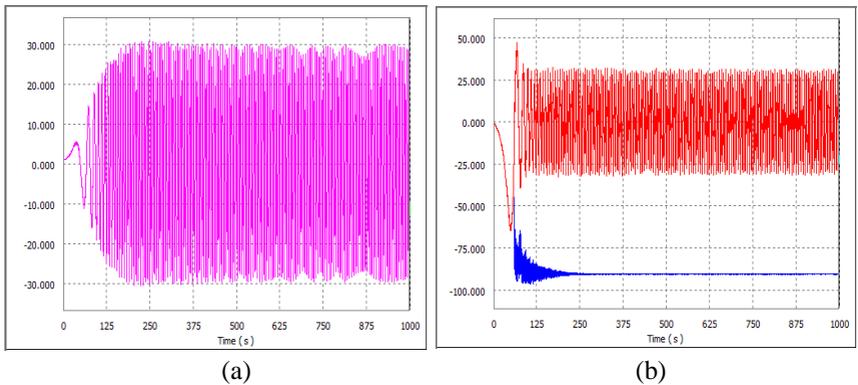
Pada gambar 4.8, ditunjukkan grafik stabilisasi sistem kendaraan dengan kecepatan *flywheel* sebesar 6500 rpm. Dengan *initial condition* θ sebesar 0 derajat, dan sudut gimbal sebesar 0 derajat. Dari grafik yang digambarkan diatas, osilasi semakin membesar terhadap fungsi waktu yakni sebesar 15 derajat dengan waktu stabilnya sebesar 70 detik. Sedangkan pada sudut gimbal ditunjukkan bahwa gimbal 1 memiliki sudut presesi yang berlawanan arah dengan sudut presesi gimbal 2. Pada sudut presesi gimbal 1 yang ditunjukkan pada grafik b dengan garis warna biru menunjukkan gimbal berosilasi sangat kecil pada kisaran -86 derajat, sedangkan pada sudut presesi gimbal 2 yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah, menunjukkan gimbal berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 43 derajat.

Berbeda dengan grafik sebelumnya, berdasarkan hasil simulasi, kendaraan dengan besar kecepatan putar *flywheel* 12500 rpm tidak membutuhkan waktu stabil untuk mencapai keadaan stabilnya, dan osilasi kendaraan semakin mengecil berdasarkan fungsi waktu yakni sebesar 3 derajat. Pada gambar 4.9 (b) ditunjukkan sudut presesi gimbal 1 dan gimbal 2. Pada grafik, gimbal 1 berosilasi sebesar 11 derajat dan gimbal 2 berosilasi sangat kecil pada kisaran 90 derajat. Sehingga kecepatan putar ini cocok digunakan untuk kecepatan putar awal *flywheel* dengan posisi kendaraan awal tegak.

b) Grafik Karakteristik Stabilitas Sistem dengan $\theta=1^\circ$



Gambar 4.10. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=1^\circ$, $\Omega=5700$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

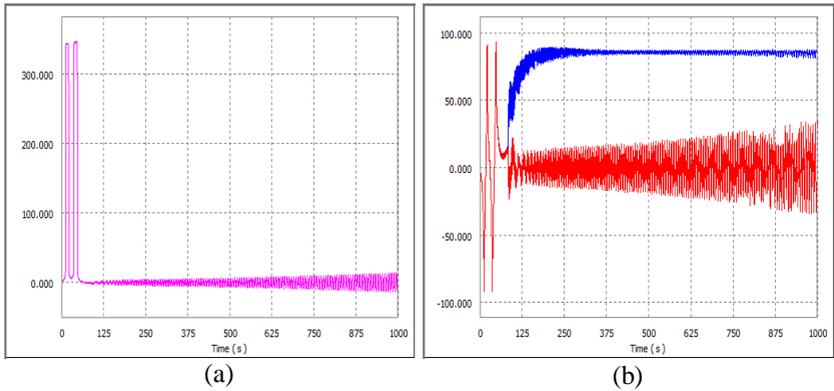


Gambar 4.11. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=1^\circ$, $\Omega=17000$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

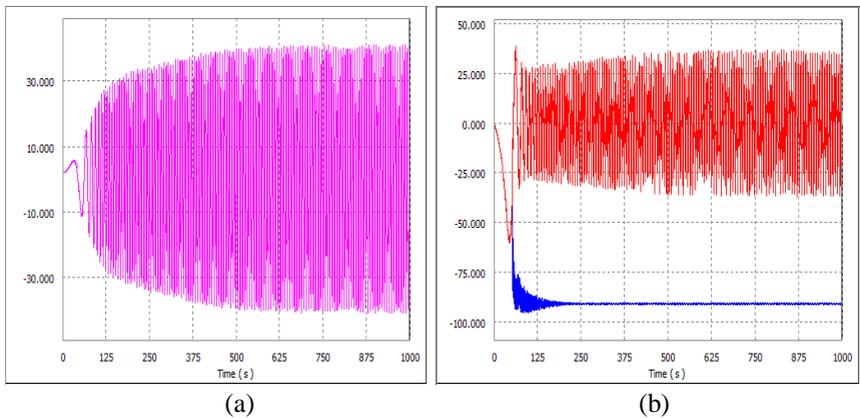
Pada gambar 4.10, ditunjukkan grafik stabilisasi sistem kendaraan dengan kecepatan *flywheel* sebesar 5700 rpm. Dengan *initial condition* θ sebesar 1 derajat, dan sudut gimbal sebesar 0 derajat. Dari grafik yang digambarkan diatas, osilasi semakin membesar terhadap fungsi waktu yakni sebesar 13 derajat dengan waktu stabilnya sebesar 61 detik. Sedangkan pada sudut gimbal ditunjukkan bahwa gimbal 1 memiliki sudut presesi yang berlawanan arah dengan sudut presesi gimbal 2. Pada sudut presesi gimbal 1 yang ditunjukkan pada grafik b dengan garis warna biru menunjukkan gimbal berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 40 derajat, sedangkan pada sudut presesi gimbal 2 yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah, menunjukkan gimbal sangat kecil pada kisaran 80 derajat.

Berbeda dengan grafik sebelumnya, berdasarkan hasil simulasi, kendaraan dengan besar kecepatan putar *flywheel* 17000 rpm tidak membutuhkan waktu stabil untuk mencapai keadaan stabilnya, namun osilasi kendaraan semakin membesar berdasarkan fungsi waktu yakni sebesar 29 derajat. Pada gambar 4.11 (b) ditunjukkan sudut presesi gimbal 1 dan gimbal 2. Pada grafik, gimbal 1 berosilasi sangat kecil pada kisaran -90 derajat dan gimbal 2 berosilasi sebesar 31 derajat. Sehingga kecepatan putar ini cocok digunakan untuk kecepatan putar awal *flywheel* dengan posisi kendaraan awal sebesar 1 derajat kemudian kecepatan *flywheel* dikontrol untuk menghasilkan osilasi kendaraan yang kecil.

c) Grafik Karakteristik Stabilitas Sistem dengan $\theta=2^\circ$



Gambar 4.12. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=2^\circ$, $\Omega=6800$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

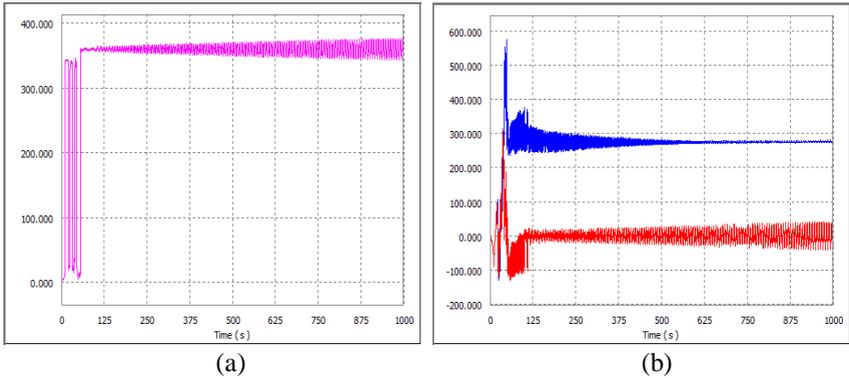


Gambar 4.13. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=2^\circ$, $\Omega=19500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

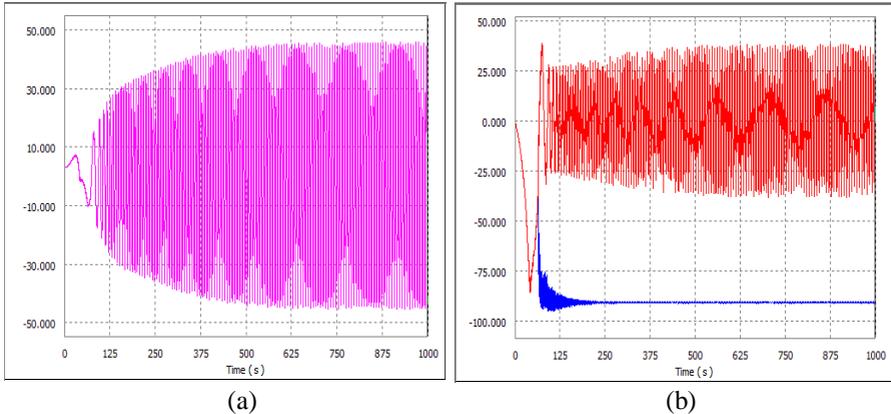
Pada gambar 4.12, ditunjukkan grafik stabilisasi sistem kendaraan dengan kecepatan *flywheel* sebesar 6800 rpm. Dengan *initial condition* θ sebesar 2 derajat, dan sudut gimbal sebesar 0 derajat. Dari grafik yang digambarkan diatas, osilasi semakin membesar terhadap fungsi waktu yakni sebesar 13 derajat dengan waktu stabilnya sebesar 60 detik. Sedangkan pada sudut gimbal ditunjukkan bahwa gimbal 1 memiliki sudut presesi yang berlawanan arah dengan sudut presesi gimbal 2. Pada sudut presesi gimbal 1 yang ditunjukkan pada grafik b dengan garis warna biru menunjukkan gimbal berosilasi sangat kecil pada kisaran 85 derajat, sedangkan pada sudut presesi gimbal 2 yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah, menunjukkan gimbal berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 36 derajat.

Berbeda dengan grafik sebelumnya, berdasarkan hasil simulasi, kendaraan dengan besar kecepatan putar *flywheel* 19500 rpm tidak membutuhkan waktu stabil untuk mencapai keadaan stabilnya, namun osilasi kendaraan semakin membesar berdasarkan fungsi waktu yakni sebesar 39 derajat. Pada gambar 4.13 (b) ditunjukkan sudut presesi gimbal 1 dan gimbal 2. Pada grafik, gimbal 1 berosilasi sangat kecil pada kisaran -90 derajat dan gimbal 2 berosilasi sebesar 35 derajat. Sehingga kecepatan putar ini cocok digunakan untuk kecepatan putar awal *flywheel* dengan posisi kendaraan awal sebesar 2 derajat kemudian kecepatan *flywheel* dikontrol untuk menghasilkan osilasi kendaraan yang kecil.

d) Grafik Karakteristik Stabilitas Sistem dengan $\theta=3^\circ$



Gambar 4.14. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=3^\circ$, $\Omega=7000$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

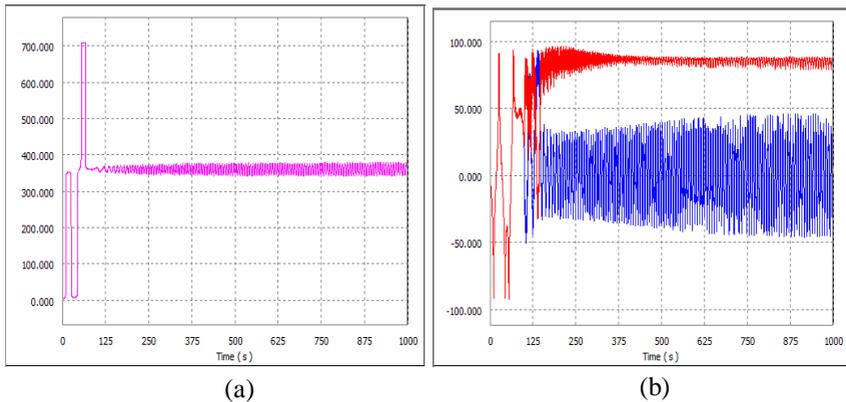


Gambar 4.15. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=3^\circ$, $\Omega=21500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

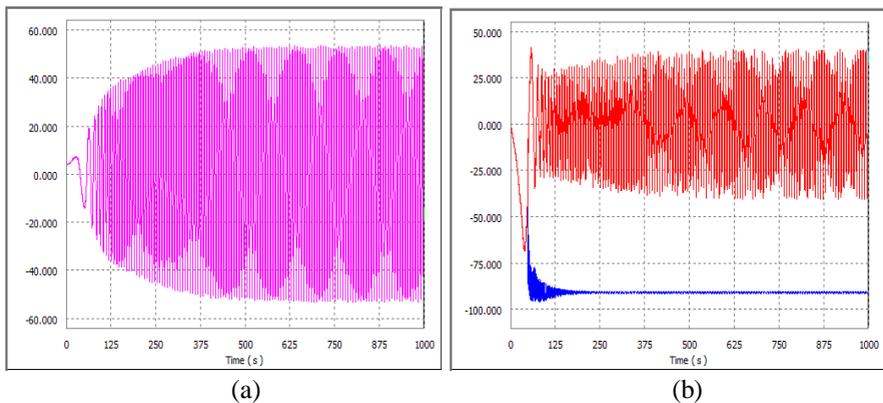
Pada gambar 4.14, ditunjukkan grafik stabilisasi sistem kendaraan dengan kecepatan *flywheel* sebesar 7000 rpm. Dengan *initial condition* θ sebesar 3 derajat, dan sudut gimbal sebesar 0 derajat. Dari grafik yang digambarkan diatas, osilasi semakin membesar terhadap fungsi waktu yakni sebesar 15 derajat dengan waktu stabilnya sebesar 56 detik. Sedangkan pada sudut gimbal ditunjukkan bahwa gimbal 1 memiliki sudut presesi yang berlawanan arah dengan sudut presesi gimbal 2. Pada sudut presesi gimbal 1 yang ditunjukkan pada grafik b dengan garis warna biru menunjukkan gimbal berosilasi sangat kecil pada kisaran -85 derajat, sedangkan pada sudut presesi gimbal 2 yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah, menunjukkan gimbal berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 40 derajat.

Berbeda dengan grafik sebelumnya, berdasarkan hasil simulasi, kendaraan dengan besar kecepatan putar *flywheel* 21500 rpm tidak membutuhkan waktu stabil untuk mencapai keadaan stabilnya, namun osilasi kendaraan semakin membesar berdasarkan fungsi waktu yakni sebesar 46 derajat. Pada gambar 4.15 (b) ditunjukkan sudut presesi gimbal 1 dan gimbal 2. Pada grafik, gimbal 1 berosilasi sangat kecil pada kisaran -90 derajat dan gimbal 2 berosilasi sebesar 34 derajat. Sehingga kecepatan putar ini cocok digunakan untuk kecepatan putar awal *flywheel* dengan posisi kendaraan awal sebesar 3 derajat kemudian kecepatan *flywheel* dikontrol untuk menghasilkan osilasi kendaraan yang kecil.

e) Grafik Karakteristik Stabilitas Sistem dengan $\theta=4^\circ$



Gambar 4.16. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=4^\circ$, $\Omega=7700$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

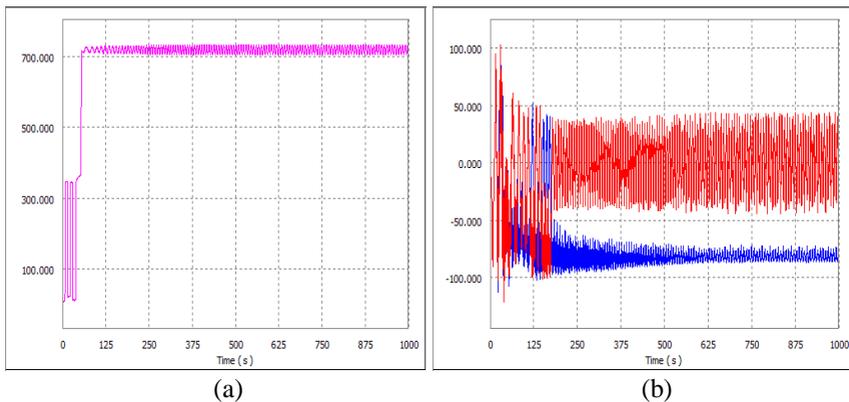


Gambar 4.17. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=4^\circ$, $\Omega=24000$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

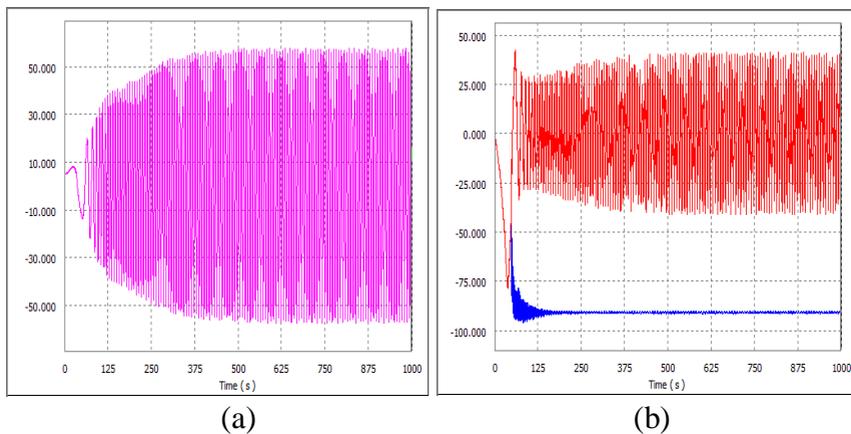
Pada gambar 4.16, ditunjukkan grafik stabilisasi sistem kendaraan dengan kecepatan *flywheel* sebesar 7700 rpm. Dengan *initial condition* θ sebesar 4 derajat, dan sudut gimbal sebesar 0 derajat. Dari grafik yang digambarkan diatas, osilasi semakin membesar terhadap fungsi waktu yakni sebesar 6 derajat dengan waktu stabilnya sebesar 60 detik. Sedangkan pada sudut gimbal ditunjukkan bahwa gimbal 1 memiliki sudut presesi yang berlawanan arah dengan sudut presesi gimbal 2. Pada sudut presesi gimbal 1 yang ditunjukkan pada grafik b dengan garis warna biru menunjukkan gimbal berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 17 derajat, sedangkan pada sudut presesi gimbal 2 yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah, menunjukkan gimbal sangat kecil pada kisaran 87 derajat.

Berbeda dengan grafik sebelumnya, berdasarkan hasil simulasi, kendaraan dengan besar kecepatan putar *flywheel* 24000 rpm tidak membutuhkan waktu stabil untuk mencapai keadaan stabilnya, namun osilasi kendaraan semakin membesar berdasarkan fungsi waktu yakni sebesar 53 derajat. Pada gambar 4.13 (b) ditunjukkan sudut presesi gimbal 1 dan gimbal 2. Pada grafik, gimbal 1 berosilasi sangat kecil pada kisaran -90 derajat dan gimbal 2 berosilasi sebesar 40 derajat. Sehingga kecepatan putar ini cocok digunakan untuk kecepatan putar awal *flywheel* dengan posisi kendaraan awal sebesar 4 derajat kemudian kecepatan *flywheel* dikontrol untuk menghasilkan osilasi kendaraan yang kecil.

f) Grafik Karakteristik Stabilitas Sistem dengan $\theta=5^\circ$



Gambar 4.18. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=5^\circ$, $\Omega=6000$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2



Gambar 4.19. Grafik Karakteristik Stabilisasi Sistem Kendaraan dengan $\theta=5^\circ$, $\Omega=25500$ rpm (a) Sudut Kemiringan Kendaraan θ , (b) Sudut Gimbal α_1 dan α_2

Pada gambar 4.18, ditunjukkan grafik stabilisasi sistem kendaraan dengan kecepatan *flywheel* sebesar 7000 rpm. Dengan *initial condition* θ sebesar 5 derajat, dan sudut gimbal sebesar 0 derajat. Dari grafik yang digambarkan diatas, osilasi semakin membesar terhadap fungsi waktu yakni sebesar 13 derajat dengan waktu stabilnya sebesar 56 detik. Sedangkan pada sudut gimbal ditunjukkan bahwa gimbal 1 memiliki sudut presesi yang berlawanan arah dengan sudut presesi gimbal 2. Pada sudut presesi gimbal 1 yang ditunjukkan pada grafik b dengan garis warna biru menunjukkan gimbal berosilasi sangat kecil pada kisaran -82 derajat, sedangkan pada sudut presesi gimbal 2 yang ditunjukkan dengan garis berwarna merah, menunjukkan gimbal berosilasi pada sumbu 0 derajat gimbal sebesar 43 derajat.

Berbeda dengan grafik sebelumnya, berdasarkan hasil simulasi, kendaraan dengan besar kecepatan putar *flywheel* 25500 rpm tidak membutuhkan waktu stabil untuk mencapai keadaan stabilnya, namun osilasi kendaraan semakin membesar berdasarkan fungsi waktu yakni sebesar 57 derajat. Pada gambar 4.15 (b) ditunjukkan sudut presesi gimbal 1 dan gimbal 2. Pada grafik, gimbal 1 berosilasi sangat kecil pada kisaran -90 derajat dan gimbal 2 berosilasi sebesar 40 derajat. Sehingga kecepatan putar ini cocok digunakan untuk kecepatan putar awal *flywheel* dengan posisi kendaraan awal sebesar 5 derajat kemudian kecepatan *flywheel* dikontrol untuk menghasilkan osilasi kendaraan yang kecil.

4.3 Pengujian *Prototype* Sistem Kendaraan

4.3.1 Perancangan *Prototype* Alat

Perancangan model kendaraan yang sudah dilakukan di *Inventor*, direalisasikan menjadi sebuah *prototype* kendaraan dengan sistem stabilisasi giroskopik. Adapun spesifikasi dari kendaraan yang akan dieksperimenkan antara lain:

PART	BAHAN	MASSA
Body Kendaraan	PMMA, Aluminium Sheet	1835 gr
Gimbal	Aluminium Sheet	309 gr
Flywheel	PMMA, Baut dan Mur	996 gr
Motor DC	-	196 gr



Gambar 4.20. Prototipe Sistem Kendaraan Roda Dua (a) Sebelum Pemasangan *Flywheel* (b) Sesudah Pemasangan *Flywheel*

4.3.2 Instalasi Pemasangan Alat Uji

Pengujian dilakukan dengan merancang sistem kendaraan giroskopik menjadi sebuah *prototype* yang nantinya dilakukan uji kondisi sesuai variasi sudut kemiringan kendaraan untuk memperoleh besar waktu stabilisasi yang dimiliki sistem.

Setelah *prototype* jadi, maka pengambilan data dilakukan. Input yang diberikan yakni kondisi sudut kemiringan kendaraan awal dan output yang akan dihasilkan yakni waktu stabilisasi dan kecepatan sudut *flywheel* yang dibutuhkan saat kendaraan dalam posisi tegaknya. Pengambilan data waktu stabilisasi dilakukan

dengan menghitung waktu tunggu kendaraan menggunakan *stopwatch*, saat putara motor mulai stabil, barulah *flywheel* yang sudah diberi tanda ditembakkan tachometer inframerah untuk mengetahui putaran *flywheel* pada kendaraan.



Gambar 4.21. Instalasi Pengujian Stabilisasi *Prototype* Kendaraan Roda Dua

4.3.3 Analisa Data Pengujian *Prototype* Sistem Kendaraan

Pada gambar 4.22 ditunjukkan pengujian yang dilakukan pada *prototype* sistem kendaraan untuk memberikan input berupa kemiringan sudut mulai dari 0 derajat, sampai dengan 5 derajat.



Gambar 4.22. Instalasi Pengambilan Sudut Awal Kemiringan Kendaraan

Dari gambar diatas dilakukan pengambilan data waktu stabilisasi dan kecepatan putaran *flywheel* untuk setiap variasinya. Adapun data yang didapat dalam pengujian ini antara lain:

- $\theta = 0^\circ$

Percobaan	Waktu Stabilisasi	RPM
1	28	2192
2	19	2186
3	19	2243
Rata-Rata	22	2207

- $\theta = 1^\circ$

Percobaan	Waktu Stabilisasi	RPM
1	23	2442
2	29	2820
3	23	2183
Rata-Rata	28.3	2483,67

- $\theta = 2^\circ$

Percobaan	Waktu Stabilisasi	RPM
1	14	2432
2	18	2393
3	24	2338
Rata-Rata	18.67	2387.67

- $\theta = 3^\circ$

Percobaan	Waktu Stabilisasi	RPM
1	22	2592
2	18	2853
3	21	2462
Rata-Rata	20.3	2635.67

- $\theta = 4^\circ$

Percobaan	Waktu Stabilisasi	RPM
1	46	4024
2	52	3023

3	58	3014
Rata-Rata	52	3353.67

- $\theta = 5^\circ$

Percobaan	Waktu Stabilisasi	RPM
1	55	2890
2	48	2918
3	46	3446
Rata-Rata	49.67	3084.67

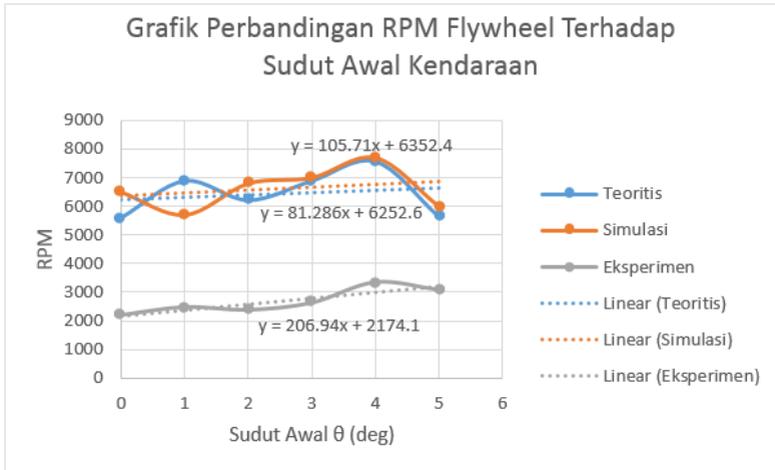
4.4 Perbandingan Hasil Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen

Dari data yang diperoleh dari hasil teoritis, simulasi, dan eksperimen yang dilakukan, diperoleh hasil perbandingan data yakni input (kecepatan putar *flywheel*) dan output (waktu stabilisasi dan osilasi kendaraan). Adapun perbandingan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

4.4.1. Perbandingan Kecepatan Putar *Flywheel* Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen

Tabel 4.12 Tabel Perbandingan Kecepatan Putaran *Flywheel* Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen

Sudut Awal	Kecepatan Putar <i>Flywheel</i> (RPM)		
	Teoritis	Simulasi	Eksperimen
0	0	6500	2207
1	6875	5700	2483
2	6207	6800	2387
3	6875	7000	2635
4	7544	7700	3353
5	5634	6000	3084



Gambar 4.23. Grafik Perbandingan Kecepatan Putar *Flywheel* Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen

Pada grafik diatas ditunjukkan perbandingan kecepatan putar *flywheel* yang digunakan terhadap variasi sudut kemiringan awal agar kendaraan stabil berdasarkan teoritis, simulasi, dan eksperimen. Garis warna biru menunjukkan nilai kecepatan putar *flywheel* terhadap sudut kemiringan awal kendaraan berdasarkan hasil teoritis, garis oranye berdasarkan simulasi dan garis abu-abu berdasarkan eksperimen. Jika dilihat dari gambar 4.23, grafik eksperimen berada paling bawah diantara grafik teoritis dan grafik simulasi, sementara grafik simulasi berada paling atas dan hampir berhimpitan dengan grafik teoritis. Hal ini menunjukkan bahwa besar putaran *flywheel* yang dibutuhkan berdasarkan simulasi memiliki nilai paling besar dibandingkan dengan teoritis. Berdasarkan grafik perbandingan di atas, untuk sudut kemiringan awal 0 derajat, teoritis tidak mampu menunjukkan adanya perubahan stabilisasi sehingga berapapun rpm yang dimasukkan, akan mengakibatkan sudut kendaraan terhadap waktu tidak berubah dan tetap pada titik nol. Berbeda dengan simulasi dan eksperimen, besar putaran yang dibutuhkan *flywheel* pada simulasi

lebih besar yakni 6500, sedangkan eksperimen hanya 2207 rpm. Pada kemiringan awal 1 derajat, putaran berdasarkan teoritis paling besar yakni 68755 rpm, kemudian simulasi sebesar 5700 rpm dan eksperimen sebesar 2483 rpm. Pada sudut awal kendaraan 2 derajat simulasi memiliki kecepatan putar 6800 rpm tidak terlalu berbeda jauh dengan teoritis yakni 6207, sedangkan eksperimen menunjukkan nilai putaran yang digunakan sebesar 2387 rpm. Pada sudut awal kendaraan 3, 4, dan 5, nilai putaran simulasi kembali menjadi yang paling besar namun berbeda tipis dengan hasil teoritis yakni berturut-turut 7000, 7700, dan 6000 rpm sedangkan teoritis sebesar 6875, 7544, 5634 rpm. Berdasarkan eksperimen nilai putaran yang diperoleh untuk sudut awal kendaraan yang sama yakni sebesar 2635, 3353, dan 3084 secara berturut-turut.

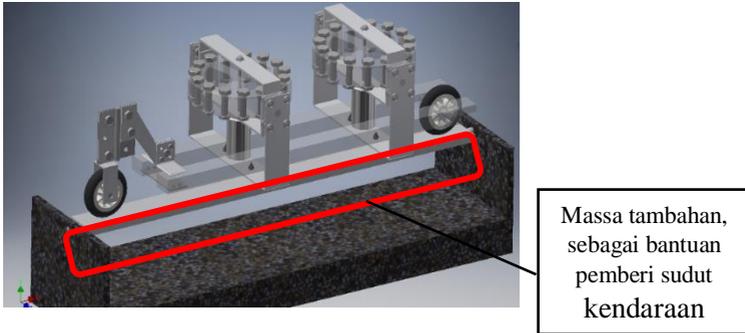
Berdasarkan teori tentang stabilisasi giroskopik, kendaraan akan stabil apabila torsi yang dihasilkan kendaraan karena gaya berat *body* kendaraan dinetralkan oleh gaya presesi gimbal. Gaya presesi dihasilkan oleh sudut gimbal karena momentum angular *flywheel* berubah arah karena adanya gaya gangguan berupa torsi kendaraan. Momentum angular *flywheel* berbanding lurus dengan besar momen inersia dan besar kecepatan sudut *flywheel*. Pada penelitian ini momen inersia *flywheel* konstan untuk setiap variasi sudut kemiringan kendaraan yang diinputkan, sehingga kecepatan sudut *flywheel* yang dibutuhkan kendaraan untuk stabil meningkat seiring dengan peningkatan sudut kemiringan kendaraan. Semakin besar sudut kemiringan kendaraan, maka semakin besar torsi kendaraan yang dihasilkan. Sehingga untuk melawan torsi kendaraan tersebut dibutuhkan gaya presesi yang besar dimana berarti meningkatkan momentum angular *flywheel* dengan cara memperbesar kecepatan putar *flywheel*. Jika dilihat berdasarkan *trendline* yang dimiliki tiap grafik, dari ketiganya memiliki *trendline* yang sama yakni semakin meningkat sesuai dengan naiknya posisi sudut awal kendaraan.

Jika dilihat berdasarkan nilai yang diperoleh dari tiap pengujian, terdapat perbedaan hasil yang besar, khususnya pada

hasil eksperimen yang dilakukan. Hal ini dikarenakan, spesifikasi motor yang digunakan saat diberi beban sebesar 996 gram, hanya memiliki putaran maksimum sebesar 5000 rpm saja. Sehingga saat dilakukan pengujian kendaraan hanya mampu stabil dan berosilasi paling lama hanya 13 detik saja. Hal ini berbeda dengan yang dilakukan pada simulasi simulink dan simulasi dinamis, dimana kendaraan dapat berosilasi dan stabil hingga detik akhir simulasi yakni 1000 detik. Selain itu beberapa aspek lainnya yang mempengaruhi hasil pada eksperimen. Pada eksperimen, adanya massa tambahan diluar perencanaan seperti massa dari hasil pengelasan, kabel motor dan juga dikarenakan kurangnya ketepatan simetris *prototype*, mempengaruhi letak titik pusat massa yang bergeser. Adapun konstruksi saat pembuatan *prototype* yang kurang *rigid* pada bagian pegangan gimpal mengakibatkan adanya getaran internal yang mempengaruhi sistem stabilisasi dari seluruh kendaraan. Sehingga osilasi yang terjadi pada eksperimen besar dan stabilitas yang terjadi hanya dalam waktu singkat.

Sama halnya dengan perbedaan besar putaran yang ada pada simulasi dinamis dan teoritis. Secara teoritis, hanya digambarkan keadaan pusat massa komponen secara 2D saja, sedangkan pada simulasi, sistem digambarkan secara 3D dan memiliki komponen bantuan yang ditunjukkan pada gambar 4.24 yang digunakan untuk menggambarkan sudut osilasi kendaraan. Adanya komponen bantuan tersebut mengakibatkan massa yang ikut disimulasikan sebagai satu sistem bertambah sehingga mempengaruhi besarnya putaran *flywheel* yang dibutuhkan.

Secara garis besar, semakin besar sudut kemiringan awal yang diberikan pada kendaraan, semakin besar pula putaran *flywheel* yang dibutuhkan untuk melawan torsi yang dihasilkan oleh kendaraan. Namun putaran yang digunakan haruslah sesuai, dikarenakan, jika putaran *flywheel* yang digunakan terlalu besar, maka akan menghasilkan osilasi kendaraan yang besar pula.



Gambar 4.24. Ilustrasi penambahan massa bantuan pada simulasi dinamis

4.4.2. Hasil Waktu Stabilisasi Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen

Tabel 4.13 Tabel Waktu Stabilisasi Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen

Sudut Awal	Teoritis		Simulasi		Eksperimen	
	RPM	Waktu Stabilisasi (s)	RPM	Waktu Stabilisasi (s)	RPM	Waktu Stabilisasi (s)
0	0	0	6500	63	2207	22
1	6875	34	5700	61	2483	28
2	6207	49	6800	60	2387	19
3	6875	35	7000	56	2635	20
4	7544	34	7700	76	3353	52
5	5634	56	6000	60	3084	50

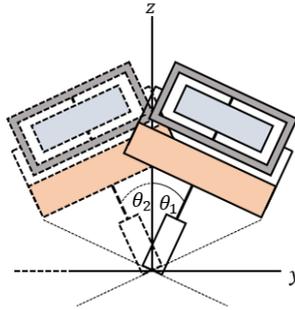
Pada tabel 4.13 ditunjukkan hasil waktu stabilisasi kendaraan terhadap variasi sudut kemiringan awal berdasarkan teoritis, simulasi, dan eksperimen. Jika dilihat berdasarkan tabel, nilai waktu stabil simulasi memiliki nilai yang paling besar dibandingkan dengan perolehan waktu stabil berdasarkan teoritis. Pada tabel, untuk sudut kemiringan awal 0 derajat, teoritis tidak

mampu menunjukkan adanya perubahan stabilisasi sehingga berapapun rpm yang dimasukkan, akan mengakibatkan sudut kendaraan terhadap waktu tidak berubah dan tetap pada titik nol. Berbeda dengan simulasi, kendaraan mencapai keadaan stabilnya berdasarkan simulasi yakni 63 detik. Pada kemiringan awal 1 derajat, waktu stabilisasi berdasarkan simulasi paling besar yakni 61 detik dan kemudian teoritis sebesar 34 detik. Pada sudut awal kendaraan 2 derajat simulasi memiliki waktu stabilisasi terlama yakni 60 detik dibandingkan dengan teoritis sebesar 49 detik. Pada sudut awal kendaraan 3, 4, dan 5, nilai putaran simulasi kembali menjadi yang paling besar namun dengan perbedaan yang relatif tidak terlalu mencolok yakni berturut-turut 56, 76, dan 60 detik , sedangkan teoritis sebesar 35, 34, 56 detik.

4.4.3. Hasil Osilasi Sudut Kendaraan Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen

Tabel 4.14 Tabel Osilasi Sudut Kendaraan Teoritis, Simulasi, dan Eksperimen

Sudut Awal	Teoritis		Simulasi		Eksperimen	
	RPM	Osilasi Kendaraan (derajat)	RPM	Osilasi Kendaraan (derajat)	RPM	Osilasi Kendaraan (derajat)
0	0	0	6500	± 15	2207	± 14
1	6875	± 4	5700	± 13	2483	± 13
2	6207	± 4	6800	± 13	2387	± 13
3	6875	± 8	7000	± 15	2635	± 14
4	7544	± 8	7700	± 15	3353	± 15
5	5634	± 16	6000	± 14	3084	± 15

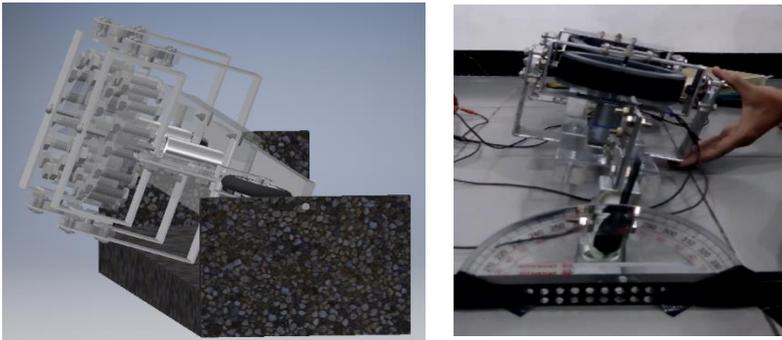


Gambar 4.25. Ilustrasi Gerak Osilasi Sudut Kendaraan

Pada tabel 4.14 ditunjukkan hasil osilasi kendaraan yang dihasilkan terhadap variasi sudut kemiringan awal berdasarkan teoritis, simulasi, dan eksperimen. Jika dilihat berdasarkan tabel, osilasi kendaraan stabil yang terjadi paling besar yakni berdasarkan simulasi, sementara berdasarkan teoritis kendaraan berosilasi paling kecil. Pada tabel, untuk sudut kemiringan awal 0 derajat, teoritis tidak mampu menunjukkan adanya perubahan stabilisasi sehingga berapapun rpm yang dimasukkan, akan mengakibatkan sudut kendaraan terhadap waktu tidak berubah dan tetap pada titik nol. Berbeda dengan simulasi, osilasi kendaraan yang dihasilkan saat kendaraan stabil pada simulasi lebih besar yakni 15 derajat. Pada kemiringan awal 1 derajat, osilasi kendaraan berdasarkan teoritis hanya 4 derajat, kemudian simulasi memiliki osilasi kendaraan yakni 13 derajat. Pada sudut awal kendaraan 2 derajat, osilasi kendaraan yang terjadi pada sistem yakni sama dengan sebelumnya. Berbeda pada sudut kendaraan awal 3, 4, dan 5 derajat, osilasi kendaraan meningkat, namun berbeda dengan simulasi yang mengalami penurunan osilasi diakhir variasi. Berdasarkan teoritis, osilasi kendaraan yang terjadi yakni 8, 8, dan 16 derajat. Sedangkan pada simulasi osilasi kendaraan yang terjadi yakni 15, 15, dan 14 derajat.

Sama halnya dengan perbedaan yang terjadi pada grafik teoritis dengan eksperimen. Pada eksperimen, adanya massa

tambahan diluar perencanaan seperti massa dari hasil pengelasan, kabel motor dan juga dikarenakan kurangnya ketepatan simetris *prototype*, mempengaruhi letak titik pusat massa yang bergeser. Adapun konstruksi saat pembuatan *prototype* yang kurang *rigid* pada bagian pegangan gimbals mengakibatkan adanya getaran internal yang mempengaruhi sistem stabilisasi dari seluruh kendaraan. Sehingga osilasi yang terjadi pada eksperimen besar dan stabilitas yang terjadi hanya dalam waktu singkat. Selain itu berbeda keadaan seperti pada simulasi dan teoritis dimana kendaraan diasumsikan dapat berputar sampai 360 derajat, sedangkan pada eksperimen yang diuji, sudut maksimal kemiringan kendaraan yang bisa dilakukan yakni 25 derajat saja. Hal ini juga mempengaruhi hasil yang kurang sesuai dengan teoritis yang ada.



Gambar 4.26. Ilustrasi batasan kemiringan kendaraan pada simulasi dan eksperimen

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini, penulisan tugas akhir bertujuan untuk menjelaskan hasil akhir penelitian yang dilakukan secara teoritis, simulasi dan eksperimen dan juga saran yang akan menjadi masukan untuk penelitian selanjutnya.

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini baik yang dilakukan secara teoritis, simulasi, maupun eksperimen, dapat ditarik kesimpulan antara lain:

1. Dengan menggunakan metode lagrange diperoleh sebuah perumusan dinamika dan kinematika sistem mekanisme *double-gyroscope* yang penyelesaiannya dilakukan menggunakan Matlab Simulink. Hasil yang diperoleh yakni kecepatan putar *flywheel* tertinggi yakni 7544 rpm pada sudut awal kendaraan 4 derajat, sedangkan yang terendah terjadi pada sudut kendaraan 0 derajat dengan kecepatan putar *flywheel* sebesar 5600 rpm.
2. Pemodelan sistem mekanisme *double-gyroscope* dilakukan secara 3D dengan menggunakan Autodesk Inventor yang kemudian dilakukan simulasi dinamis pada software yang sama. Hasil yang diperoleh yakni kecepatan putar *flywheel* tertinggi yakni 7700 rpm pada sudut awal kendaraan 4 derajat, sedangkan yang terkecil pada sudut awal kendaraan 1 derajat dengan kecepatan putar *flywheel* 5700 rpm.
3. Perancangan *prototype* yang dihasilkan memiliki dimensi 634mm x 212mm x 178 mm dengan massa kendaraan 1.835 kg, massa gibal 0.309 kg, dan massa *flywheel* 0.996 kg. Hasil yang diperoleh dari uji eksperimen *prototype* tersebut yakni kecepatan putar tertinggi yakni

3353 rpm pada sudut awal kendaraan 4 derajat sedangkan yang terendah pada 0 derajat dengan kecepatan putar *flywheel* 2207 rpm.

4. Hasil perbandingan pengujian yang dilakukan berdasarkan teori, simulasi dan eksperimen antara lain:
 - Diperoleh perumusan dinamika dan kinematika dari sistem mekanisme *double-gyroscope* dengan vertikal giroskop pada kendaraan roda dua yang divalidasi terhadap simulasi dinamis dengan beda hasil 17% dan eksperimen dengan beda hasil 64%.
 - Pada sistem mekanisme *double-gyroscope* dengan vertikal giroskop, berdasarkan trendline dari ketiga grafik teoritis, simulasi, dan eksperimen, semakin besar sudut awal kemiringan kendaraan yang diberikan pada sistem, maka semakin besar pula nilai putaran *flywheel* yang digunakan.

Sehingga dari kesimpulan diatas, hasil yang diperoleh pada pengujian teoritis dan pengujian simulasi mengalami adanya perbedaan yang kecil. Meski keduanya menggunakan Lagrange untuk memperoleh persamaan geraknya, perbedaan hasil yang terjadi pada Matlab dan Inventor dikarenakan adanya perbedaan penggambaran sistem secara persamaan dengan 3D, dimana pada Inventor terdapat part bantuan yang mempengaruhi persamaan sistem. Sama halnya dengan perbedaan hasil oleh matlab dengan eksperimen. Perbedaan hasil yang sangat jauh ini dikarenakan kurangnya rigiditas, kesimetrisan, perubahan titik pusat massa, dan getaran berlebih akibat ketidaktepatan dalam menggabungkan setiap komponen prototipe kendaraan.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, masih terdapat adanya kekurangan baik dalam hal penyusunan laporan maupun kegiatan penelitian. Adapun saran dan masukan yang dapat dituliskan agar membantu penelitian berikutnya antara lain:

1. Dalam menggambarkan sistem kendaraan secara 3D, dimensi dan properties dari komponen harus diperhatikan untuk mendapatkan massa dan dimensi yang sesuai daat dilakukan *assembly* antar komponen.
2. Pembuatan *prototype* kendaraan untuk sistem kendaraan *double-gyroscope* dilakukan pemasangan *flywheel* 1 dan *flywheel* 2 menggunakan kopling fleksibel dengan memastikan titik pusat massa *flywheel* 1 dengan *flywheel* 2 sama untuk menghindari adanya perbedaan torsi yang dihasilkan *flywheel* 1 dan *flywheel* 2 untuk menstabilkan kendaraan.
3. Untuk model sistem kendaraan seperti yang dilakukan pada penelitian ini, lebar *body* kendaraan disesuaikan dengan pegangan gimbale untuk menghindari adanya momen puntir yang diakibatkan oleh plat tipis yang dibaut pada sisi bawah *body* dan mengakibatkan getaran yang mempengaruhi besarnya osilasi kendaraan yang terjadi dan meningkatnya putaran *flywheel* yang digunakan.
4. Dalam pembuatan *prototype*, massa maupun dimensi komponen saat pembuatan dan penyusunan dipastikan simetris sisi kanan dan kirinya untuk memperlama keadaan stabil kendaraan dan mengurangi kegagalan kendaraan berosilasi.
5. Material yang digunakan sebagai pegangan gimbale seharusnya ialah material yang *rigid* seperti *steel* atau akrilik untuk mengurangi adanya getaran-getaran yang tidak perlu saat motor memutar *flywheel* pada kecepatan tinggi dan memperbesar osilasi kendaraan.

5.3 Inovasi yang Dapat Dilakukan

Penelitian ini memiliki kekurangan berupa osilasi kendaraan yang sulit untuk mencapai stabilisasi pada sudut 0 derajat dan waktu stabilisasi yang lama, sehingga untuk menyempurnakan penelitian kendaraan giroskopik dengan *double-gyroscope* dapat

dilakukan penambahan sistem kontrol dengan memasang *motor servo* pada gimbal untuk mengatur besar sudut gimbal yang dibutuhkan terhadap sudut kemiringan kendaraan sesuai dengan data yang telah diperoleh pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Hibbeler, R., 2010. *Engineering Mechanics: Dynamics*. 12th ed. USA: Pearson Prentice Hall.
- Hung, J. Y., 2000. *Gyroscopic Stabilization of a Stationary Unmanned Bicycle*, USA: Auburn University.
- Hutahaean, R. Y., 2006. *Mekanisme dan Dinamika Mesin (Edisi Revisi)*. Revisi ed. Yogyakarta: CV. ANDI OFFSET.
- Polri, K., 2016. *korlantas.polri.go.id*. [Online]
Available at: <http://korlantas.polri.go.id/statistik-2/>
[Accessed 6 Januari 2017].
- Spry, S. C., 2008. *Gyroscopic Stabilization of Unstable Vehicles: Configurations, Dynamics, and Control*, USA: University of Michigan .
- Townsend, N. C., 2011. Gyrostabilizer Vehicular Technology. *ASME*, 64(Applied Mechanics Reviews).
- WHO, 2015. *Global Status Report On Road Safety 2015*, Switzerland: WHO Press.
- Yetkin, H., 2014. Gyroscopic Stabilization of an Unmanned Bicycle. *American Control Conference*, pp. 4549-4554.

BIODATA PENULIS



Wayan Eka Putri Ksamawati dilahirkan di Surabaya, 12 Februari 1996 merupakan anak yang terlahir dari orangtua bernama Made Putra Astawa dan Kadek Delmi. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN Sumput 1 (2001-2007). Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN 2 Krian pada tahun 2007-2010, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 1 Krian pada tahun 2010-2013. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi Staff BSO Event Besar di Himpunan Teknik Mesin ITS sekaligus menjadi Sekretaris Departemen Hubungan Masyarakat di TPKH-ITS pada periode Bendahara BSO Event Besar di Himpunan Teknik Mesin ITS pada periode 2015-2016. Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan *Indonesian Energy Marathon Challenge 2014* sebagai anggota konsumsi dalam kegiatan lomba tersebut. Selain aktif berorganisasi, penulis juga aktif magang di perusahaan sektor pembangkitan energi yakni PT. Indonesia Power PLTA Wadaslintang.

Selama hidup penulis berpegang teguh pada prinsip “*Orang yang mengatakan matahari mendatangkan kebahagiaan adalah orang yang tidak pernah menari di tengah hujan*” yang selalu menjadikan penulis untuk tetap memandang segala kondisi pasti ada baiknya dan ada jalan untuk bahagia. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email way.ksamawati@gmail.com