



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

**RANCANG BANGUN *SELF BALANCING BIKE*
MENGUNAKAN GIROSKOP TUNGGAL
DENGAN ORIENTASI HORIZONTAL**

**YUNICO RIXY SETYAWAN
NRP. 0211134000092**

**Dosen Pembimbing :
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**



TUGAS AKHIR - TM 141585

**RANCANG BANGUN *SELF BALANCING BIKE*
MENGUNAKAN GIROSKOP TUNGGAL
DENGAN ORIENTASI HORIZONTAL**

**YUNICO RIXY SETYAWAN
NRP. 0211134000092**

**Dosen Pembimbing :
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**



TUGAS AKHIR - TM 141585

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SELF BALANCING BIKE USING SINGLE GYROSCOPE WITH HORIZONTAL ORIENTATION

**YUNICO RIXY SETYAWAN
NRP. 0211134000092**

**Dosen Pembimbing :
Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018**

**RANCANG BANGUN *SELF BALANCING BIKE*
MENGUNAKAN GIROSKOP TUNGGAL DENGAN
ORIENTASI HORIZONTAL**

**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

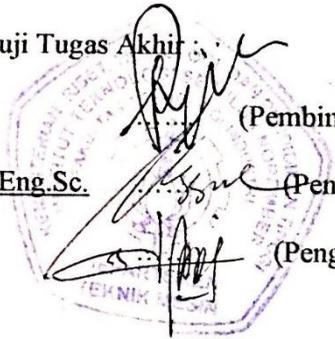
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

YUNICO RIXY SETYAWAN
NRP. 0211134000092

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Arif Wahjudi, ST, MT, PhD.
NIP. 197303222001121001
2. Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, ST, M.Eng.Sc.
NIP. 197805112001121001
3. Latifah Nurahmi, ST, MSc, PhD.
NIP. 1986201712037



(Pembimbing)

(Penguji I)

(Penguji II)

SURABAYA

JULI, 2018

RANCANG BANGUN *SELF BALANCING BIKE* MENGUNAKAN GIROSKOP TUNGGAL DENGAN KONSEP HORIZONTAL

Nama : Yunico Rixy Setyawan
NRP : 0211134000092
Departemen : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Giroskop merupakan suatu perangkat untuk mengukur atau mempertahankan orientasi yang berlandaskan pada prinsip – prinsip momentum sudut. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk merancang self balancing bike menggunakan giroskop tunggal dengan orientasi horizontal. Selain itu, kecepatan sudut giroskop yang dibutuhkan untuk membuat self balancing bike berdiri pada keadaan setimbang serta kecepatan sudut yang dibutuhkan untuk menyetimbangkan dari kemiringan 30° ditentukan berdasarkan perhitungan matematis dan pengujian.

Komponen self balancing bike ini menggunakan motor listrik DC brushless serta piringan yang berfungsi untuk menghasilkan momentum angular guna menyeimbangkan sistem dua roda segaris agar tidak terjatuh. Untuk membuat sistem giroskop pada sistem dua roda segaris berfungsi maka perhitungan momentum angular yang dihasilkan motor dan piringan harus disesuaikan dengan gaya yang dihasilkan ketika sistem dengan dua roda segaris berada pada kondisi miring. Selain itu, peletakan dari giroskop sendiri harus disesuaikan supaya sedekat mungkin dengan pusat massa sistem dua roda segaris supaya momentum yang dihasilkan dapat menyeimbangkan sistem dua roda segaris dengan maksimal.

Pada penelitian ini rancangan self balancing bike menggunakan giroskop tunggal dengan orientasi horizontal yang diperoleh memiliki massa total sebesar 3,865 kg. Giroskop sendiri

memiliki massa sebesar 1,246 kg dengan jari – jari sebesar 20 cm dan inersia sebesar 0,00809 kgm². Sistem self balancing bike menggunakan motor listrik dengan spesifikasi kecepatan sudut sebesar 24.790 dengan voltase 7,4 V (3350 rpm/V) dan electronic speed controller dengan spesifikasi 65 A. Kecepatan sudut motor listrik pada kondisi terbebani giroskop hanya mampu berputar dengan kecepatan sudut sebesar 3000 rpm. Hasil dari pengujian diperoleh bahwa self balancing bike dapat stabil pada posisi setimbang dengan kecepatan sudut 3000 rpm, namun tidak dapat dikenai eksitasi berlebih.

Kata kunci: giroskop, self balancing, sistem dua roda, momentum angular

***DESIGN AND IMPLEMENTATION OF SELF
BALANCING BIKE USING SINGLE GYROSCOPE WITH
HORIZONTAL ORIENTATION***

Name : Yunico Rixy Setyawan
NRP : 0211134000092
Department : Mechanical Engineering
Supervisors : Arif Wahjudi, ST., MT., Ph.D.

Abstract

Gyroscope is a device to measure or maintain orientation based on the principals of angular momentum. This research's purpose is to design self balancing bike using single gyroscope with horizontal orientation. Moreover, gyroscope angular velocity to maintain the self balancing bike at balance condition and to recover its orientation from 30° slope is defined using mathematical calculation and experiment.

Self balancing bike using brushless DC electric motor to generate angular momentum that prevent the two-wheel system from fall. Calculation of angular momentum from electric motor and gyroscope must be adjusted with the moment of two-wheel system when it has slope. Other than that, positioning of the gyroscope must be as close as possible with the center of mass from the system so that its momentum can be maximized.

This research result in design and implementation of self balancing bike using single gyroscope with horizontal orientation with total mass 3,865 kg. Mass of the gyroscope is about 1,246 kg with 20 cm radius and 0,00809 kgm² mass momen of inertia. Self balancing bike system using electric motor with 24.790 rpm angular velocity specification with 7,4V (3350rpm/V) and electronic speed controller with 65 A specification. Angular velocity of the electric motor with gyroscope added is just 3000 rpm because of the torque is not strong enough to cover the mass momen of inertia of the gyroscope. The research result that self balancing bike system can steady at 3000 rpm, but can't get any

excitation or force that can make the system fall from the balance condition.

Keywords : gyroscope, self balancing, two-wheel system, angular momentum

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur saya haturkan kehadiran Allah SWT karena dengan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “RANCANG BANGUN *SELF BALANCING BIKE* MENGGUNAKAN GIROSKOP TUNGKAL DENGAN ORIENTASI HORIZONTAL”. Tugas Akhir ini merupakan persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Atas bantuan berbagai pihak dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Muji Slamet dan Ibu Eny Sujati selaku bapak dan ibu penulis yang senantiasa mendukung penulis serta memberikan doa.
2. Om Bagus, Tante Wida, Pak Poh Artoyo, Bu Poh Rusmiati dan seluruh keluarga besar Kakung Agus yang memberikan arahan kepada penulis.
3. Pak Arif Wahjudi, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir.
4. Pak Dr. Eng. Unggul Wasiwitono, S.T., M. Eng. Sc. dan Bu Latifah Nurahmi, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan dalam revisi Tugas Akhir.
5. Saudari Izzah Azalayah yang senantiasa mendampingi penulis selama pengerjaan tugas akhir serta selalu memberikan dukungan, motivasi serta doa.
6. Dulur – dulur Kontrakan Muslimin, Hamid, Yono, Ujang, Zidny, Gupron Burhan, Usaid, Ipin, Mas Najib, Bang Opik, Umam dan juga seluruh Punggawa PMII Injury Time yang selalu memotivasi serta mendukung penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir.

7. Mas Faisal yang telah membantu penulis dalam pengerjaan giroskop beserta strukturnya dan memberikan masukan dalam Tugas Akhir.
8. Warga Laboratorium Perancangan dan Pengembangan Produk yang senantiasa memberikan masukan penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir.
9. Semua pihak yang telah berperan aktif dalam penulisan Tugas Akhir yang tidak dapat disebutkan satu – persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diperlukan menyempurnakan Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat berguna bagi semua pihak yang membutuhkan.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	iii
<i>Title Page</i>	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR.....	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Penelitian Terdahulu	5
2.2. Dasar Perancangan Teknik.....	8
2.3. Giroskop.....	10
2.4. Momen dan Produk Inersia	11
2.4.1. Momen Massa Inersia	12
2.4.2. Produk Inersia	13
2.5. Momentum Sudut.....	15
2.6. Gerak Giroskopik.....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1. Langkah – Langkah Penelitian.....	23
3.2. Studi Pustaka dan Lapangan	23
3.3. Perumusan Masalah dan Penentuan Tujuan Penelitian.....	24
3.4. Perancangan dan Pembuatan Sistem Dua Roda Segaris.....	24
3.5. Perancangan Giroskop dan Struktur Penyangga Giroskop.....	24
3.6. Perhitungan Momen Giroskopik dan Momen <i>Self Balancing Bike</i>	25

3.7.	Penentuan Spesifikasi Elektronik.....	25
3.8.	Pengujian <i>Self Balancing Bike</i> tanpa Kemiringan Awal	26
3.9.	Pengujian <i>Self Balancing Bike</i> dengan Kemiringan Awal 30°	26
3.10.	Kecepatan Sudut yang Dibutuhkan untuk Menyetimbangkan <i>Self Balancing Bike</i> dari Kemiringan 0° sampai 30°	26
3.11.	Diagram Alir Penelitian	27
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		29
4.1.	Perancangan dan Pembuatan Sistem Dua Roda Segaris	29
4.2.	Perancangan Giroskop dan Struktur Penyangga Giroskop.....	31
4.3.	Persamaan Matematis.....	37
4.4.	Perhitungan Momen Giroskopik dan Momen <i>Self Balancing Bike</i>	40
4.5.	Penentuan Spesifikasi Elektronik.....	43
4.6.	Pengujian <i>Self Balancing Bike</i>	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		49
5.1.	Kesimpulan	49
5.2.	Saran.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....		51
BIODATA PENULIS.....		53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Gaya – gaya yang bekerja pada <i>inverted pendulum</i>	5
Gambar 2.2.	Konsep <i>Gyrocart</i> dan Sistem Nyata <i>Gyrocart</i>	6
Gambar 2.3.	Tampak belakang dan samping gerobak dengan stabilisasi giroskopik	7
Gambar 2.4.	Sistem sepeda dengan penyeimbang giroskop	8
Gambar 2.5.	Giroskop mainan	11
Gambar 2.6.	Benda tegar	12
Gambar 2.7.	Benda simetri	14
Gambar 2.8.	Benda silinder	14
Gambar 2.9.	Sistem koordinat inersia	16
Gambar 2.10.	Posisi awal benda	16
Gambar 2.11.	Presesi, nutasi dan putaran	17
Gambar 2.12.	Vektor – vektor pada giroskop	18
Gambar 2.13.	Efek giroskopis	20
Gambar 2.14.	Giroskop pada cincin gimbal	22
Gambar 3.1.	Diagram alir penelitian	27
Gambar 3.2.	Lanjutan diagram alir penelitian	28
Gambar 4.1.	Sistem dua roda segaris	29
Gambar 4.2.	Siku penghubung	30
Gambar 4.3.	Roda sistem dua roda segaris	30
Gambar 4.4.	Giroskop dan sistem penyangganya	32
Gambar 4.5.	Sistem penghubung giroskop dan sistem penyangganya	32
Gambar 4.6.	<i>Assembly Self Balancing Bike</i>	34
Gambar 4.7.	Hasil pembuatan <i>self balancing bike</i>	34
Gambar 4.8.	Dimensi Giroskop	35
Gambar 4.9.	<i>Free Body Diagram</i> tinjauan dari depan	38
Gambar 4.10.	<i>Free Body Diagram</i> tinjauan dari samping	38

“Halaman ini memang dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Parameter <i>Self Balancing Bike</i>	40
Tabel 4.2. Perhitungan Momen Giroskopik.....	41
Tabel 4.3. Momen <i>Self Balancing Bike</i>	42
Tabel 4.4. Kecepatan sudut yang dibutuhkan	43
Tabel 4.5. Spesifikasi motor listrik.....	44
Tabel 4.6. Spesifikasi <i>Electronic Speed Controller</i>	45

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Giroskop merupakan suatu perangkat untuk mengukur atau mempertahankan orientasi yang berlandaskan pada prinsip – prinsip momentum sudut. Secara mekanis, giroskop berbentuk seperti sebuah roda berputar atau cakram di mana poros bebas untuk mengambil setiap orientasi. Meskipun orientasi ini tidak tetap, perubahannya dapat menanggapi torsi eksternal jauh lebih sedikit dan berlangsung dalam arah yang berbeda jika dibandingkan dengan tanpa momentum sudut, yang berkaitan dengan tingginya tingkat putaran dan momen inersia. Orientasi perangkat tetap sama, terlepas dari gerak platform pemasangan karena pemasangan perangkat pada sebuah gimbal akan meminimalkan torsi eksternal. Pemanfaatan momentum sudut pada giroskop telah tersebar di berbagai perangkat mekanis maupun digital seperti pada sepeda, sepeda motor hingga robot untuk membantu menjaga keseimbangannya. Selain secara mekanis, pemanfaatan giroskop secara digital dapat ditemui pada *solid state disk* serta sensor kemiringan digital.

Pemanfaatan giroskop pada sepeda telah dilakukan oleh beberapa pengembang serta telah menjadi produk sepeda yang dapat menjaga keseimbangannya sendiri guna membantu anak – anak belajar mengendarai sepeda. Namun penerapan giroskop pada produk yang sudah ada masih kurang maksimal karena posisi giroskop yang vertikal sehingga momentum angular yang dihasilkan tidak dimanfaatkan dengan baik. Selain itu karena giroskop berada pada roda depan sepeda, maka bagian depan sepeda menjadi lebih berat dan sulit untuk dibelokkan. Giroskop pada sepeda ini menjadi komponen primer pengganti roda bantu yang biasanya digunakan pada roda belakang sepeda bahkan lebih

efektif dalam menjaga keseimbangan sepeda karena tidak menghalangi sepeda untuk berbelok dengan miring. Selain sebagai pengganti roda bantu pada sepeda anak – anak, tentunya pemanfaatan giroskop ini masih sangat luas terutama pada alat – alat maupun kendaraan yang membutuhkan keseimbangan.

Setelah dilakukan kajian pustaka diperoleh bahwa giroskop horizontal lebih efektif untuk menyeimbangkan sepeda roda dua serta penempatan giroskop dapat lebih efektif pula apabila semakin dekat dengan *center of gravity* dari sepeda tersebut. Untuk itu diperlukan perancangan giroskop pada sepeda roda dua untuk mengatasi kelemahan – kelemahan pada desain yang sudah ada serta dilakukan penelitian terkait besar momentum angular yang dibutuhkan untuk membuat sepeda roda dua tetap seimbang atau kembali dari keadaan seimbang dari kemiringan hingga 30° . Selain momentum angular ke arah atas yang dihasilkan oleh putaran dari piringan, rotasi ditambahkan ke arah depan ataupun belakang untuk memberikan momentum angular ke arah kanan maupun kiri supaya penyeimbangan sepeda lebih efektif.

Di masa depan *self balancing bike* dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan dalam dunia teknologi. Salah satu pemanfaatan yang dapat dilakukan adalah penggunaan *self balancing bike* sebagai moda transportasi berbasis RC (*Remote Control*) dengan menyematkan motor atau penggerak pada roda sepeda sehingga dapat berjalan dalam keadaan seimbang tanpa dikendarai. Selain itu juga dapat dimanfaatkan untuk terapi pasca stroke yang saat ini masih menggunakan sepeda roda tiga, dengan adanya *self balancing bike* yang memiliki momentum angular cukup kuat, sehingga berat pengendara pun dapat ditopang dengan maksimal sehingga tidak terjatuh.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan *self balancing bike* menggunakan giroskop tunggal dengan orientasi horizontal?
2. Berapakah putaran minimal giroskop supaya rancangan *self balancing bike* dapat berdiri dalam keadaan setimbang?
3. Berapakah putaran yang dibutuhkan giroskop untuk menyetimbangkan rancangan *self balancing bike* dari kemiringan sebesar 30° pada sumbu *rolling*?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang *self balancing bike* menggunakan giroskop tunggal dengan orientasi horizontal.
2. Menentukan putaran minimal giroskop supaya rancangan *self balancing bike* dapat berdiri dalam keadaan setimbang.
3. Menentukan putaran yang dibutuhkan giroskop untuk menyetimbangkan rancangan *self balancing bike* dari kemiringan sebesar 30° pada sumbu *rolling*.

1.4. Batasan Masalah

Agar tujuan dari penulisan tugas akhir ini lebih sistematis, maka diperlukan adanya batasan masalah sebagai berikut:

1. Rancang bangun *self balancing bike* sistem dengan dua roda segaris.
2. Pengujian *self balancing bike* dilakukan pada permukaan yang datar.

3. Gaya – gaya yang bekerja hanya berasal dari sistem *self balancing bike*.
4. Stabilitas *self balancing bike* hanya diamati pada sumbu *rolling*.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dalam penelitian ini adalah:

1. Memberikan pengembangan rancangan *self balancing bike* yang lebih baik secara aspek kekuatan maupun efektivitas.
2. Mengembangkan penelitian tentang kestabilan berbasis giroskop
3. Mengurangi risiko kecelakaan pada kendaraan yang diaplikasikan penyeimbang giroskop

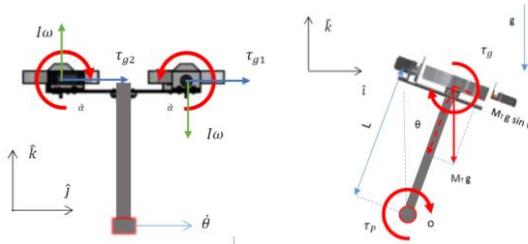
Dapat menjadi dasar ilmu pengetahuan, terutama dalam hal perancangan produk dan *self balancing bike*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terdahulu

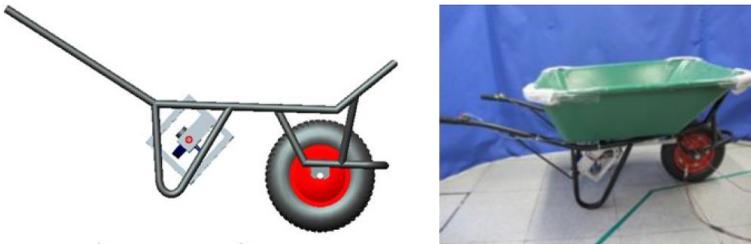
Giroskop mulai dikembangkan pada dunia industri sejak awal abad ke – 20 Masehi untuk menunjang kestabilan *monorail*. Setelah itu, giroskop dikembangkan lagi sebagai kendali satelit dan pesawat luar angkasa. Pada awal tahun 2000 an, giroskop mulai dikembangkan lagi untuk menunjang kestabilan kendaraan terutama kendaraan beroda. Hal ini disebabkan karena pada dasarnya kendaraan roda tidak stabil (Nafi', 2017).

Penelitian terdahulu tentang giroskop yang menjadi rujukan penulis telah dilakukan oleh beberapa orang antara lain tugas akhir milik Nafi' dan Par'iy, serta publikasi milik Min S. Ha, Stephen C. Spry, dan Cheng-Hung Chi. Pada tugas akhir milik Nafi', *self balancing* dilakukan pada *inverted pendulum* dengan *double gyroscope* berorientasi horizontal seperti pada gambar 2.1. Pengendalian pada tugas akhir Nafi' dilakukan pada presesi, sedangkan pada putaran giroskop dibuat konstan. Penggunaan dua buah giroskop menimbulkan momen giroskopik yang lebih besar untuk menyetimbangkan *inverted pendulum*. Perubahan arah momentum sudut dari rotor menghasilkan giroskopik yang akan bekerja menyeimbangkan *inverted pendulum* (Nafi', 2017).



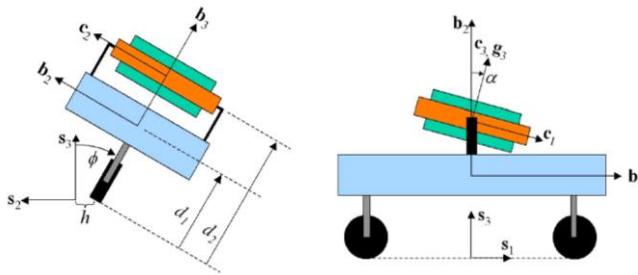
Gambar 2.1. Gaya – gaya yang bekerja pada inverted pendulum (Nafi', 2017)

Tugas akhir milik Par'iy menggunakan model sepeda roda dua dengan variasi kecepatan *flywheel* ketika dikenai simpangan. *Gyroscope* mempunyai dua sifat yang pertama *rigidity in space* yaitu kemampuan giro untuk dapat mempertahankan posisi bidang putar (*position of plane rotation*) bidang horizontal dan vertikal dan arah bidang putar (*direction of plane rotation*) (Par'iy, 2017).



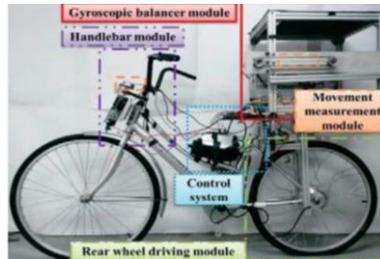
Gambar 2.2. Konsep Gyrocart dan Sistem Nyata Gyrocart (Ha, 2015)

Publikasi Min S. Ha mempresentasikan aplikasi kontrol keseimbangan pada gerobak tangan dengan satu roda yang biasa digunakan orang untuk memindahkan benda atau disebut dengan *Gyrocart*. Penyeimbangan dan kemudi sebagian besar dilakukan oleh tenaga manusia. Untuk membantu tenaga seseorang dalam menyeimbangkan pada arah sisi, efek giroskop digunakan untuk menghasilkan momen penyeimbang pada arah sisi untuk mempertahankan keseimbangan (Ha, 2015). Gimbal terdiri dari giroskop dan motor listrik sebagai penghasil momen giroskopik seperti pada gambar 2.2. Diharapkan *Gyrocart* dapat membantu orang dalam memindahkan barang menggunakan gerobak tangan dengan satu roda.



Gambar 2.3. Tampak belakang dan samping gerobak dengan stabilisasi giroskopik (Spry, 2008)

Publikasi Stephen C. Spry menjelaskan tentang stabilisasi giroskop pada segi konfigurasi, dinamika dan kontrol pada alat seperti pada gambar 2.3. Stabilisasi dinamis pada *monorail* atau mobil dengan dua roda membutuhkan momen yang bekerja pada mobil dari bagian luar di netralkan oleh momen mobil yang dihasilkan giroskop. Giroskop di sini berfungsi sebagai aktuator, bukan sensor, dengan menggunakan gaya presesi yang dihasilkan giroskop. Ketika momen diaplikasikan pada sumbu normal putaran, menyebabkan giroskop untuk melakukan presesi, momen dihasilkan pada sumbu ketiga, ortogonal pada momen dan sumbu putar. Bersamaan dengan kendaraan miring dari vertikal, menyebabkan momen induksi presesi terjadi pada bodi giroskop dan menghasilkan momen reaksi giroskopik yang akan memperbaiki orientasi kendaraan. Ide pokoknya adalah gerakan relatif giroskop terhadap bodi dikendalikan secara aktif untuk menghasilkan momen penyeimbang (Spry, 2008).



Gambar 2.4. Sistem sepeda dengan penyeimbang giroskop (Chi, 2015)

Publikasi Cheng-Hung Chi menjelaskan tentang aplikasi giroskop pada sepeda tanpa penumpang seperti pada gambar 2.4. Giroskop yang digunakan sebanyak satu buah dan dilakukan kontrol pada presisi. Dibandingkan penyeimbang lain, penyeimbang giroskop memiliki beberapa kelebihan, seperti respons sistem yang lebih cepat, rasio massa penyeimbang dan sepeda yang lebih kecil dan momen yang relatif lebih besar. Kemampuan sistem untuk melawan gangguan secara kontinu tidak cukup kuat karena keterbatasan sudut kemiringan dari penyeimbang giroskop (Chi, 2015).

2.2. Dasar Perancangan Teknik

Perancangan adalah bagian dari kegiatan rekayasa yang merupakan usaha intelektual untuk memenuhi tuntutan – tuntutan tertentu dengan cara sebaik mungkin. Pengertian rekayasa adalah penerapan ilmu matematik untuk memanfaatkan benda dan energi dalam alam ini sehingga berguna bagi manusia dalam kegiatan pembuatan bangunan, permesinan, produk, sistem dan proses. Secara konseptual kegiatan perancangan dapat dibedakan menjadi beberapa bagian yakni:

1. Perancangan Produk
2. Perancangan Proses

3. Perancangan Rekayasa (*Engineering Design*)

Ada pula ciri – ciri kegiatan pada perancangan, antara lain:

1. Merupakan kegiatan kreatif yang dilandasi dengan pemahaman baik atas bidang – bidang keilmuan tertentu serta pengetahuan dan pengalaman praktis bidang khusus
2. Merupakan optimasi atas tujuan tertentu dalam berbagai kendala bahkan saling bertentangan
3. Memuat tahapan – tahapan sebagai berikut:

- a. Ide dan kejelasan tugas rancangan konseptual

Ide merupakan cikal bakal kebutuhan manusia akan sesuatu hal perlu dijabarkan secara mendetail mengenai apa yang perlu dan apa yang tidak perlu. Dengan demikian kegiatan ini merupakan kejelasan ide yang sifatnya masih umum tersebut.

- b. Rancangan konseptual

Fungsi keseluruhan yang tergambar dari kejelasan ide selanjutnya dibagi bagi menjadi beberapa sub – sub fungsi untuk melihat bagian – bagian permasalahan secara lebih sederhana. Sub – sub fungsi dijawab dengan suatu solusi yang biasanya lebih dari satu atau ada banyak varian solusi sub fungsi tersebut. Penggabungan atau masing – masing solusi sub fungsi akan menghasilkan banyak sekali solusi utuh yang dinamakan konsep rancangan. Konsep – konsep rancangan ini selanjutnya dinilai dengan kriteria fungsi dan efisiensi untuk dipilih konsep yang terbaik.

- c. Rancangan bentuk dan tata letak

Rancangan bentuk dan tata letak merupakan implementasi dari rancangan konseptual yang dipilih tersebut, meliputi kerangka dan ukuran serta produk yang dihasilkan.

d. Rancangan detail

Rancangan detail merupakan penggabungan antara konsep rancangan dan rancangan bentuk dan tata letak. Pada rancangan detail menerangkan tentang detail dari ukuran – ukuran pada benda atau alat yang akan dibuat.

e. Pembuatan prototipe atau model

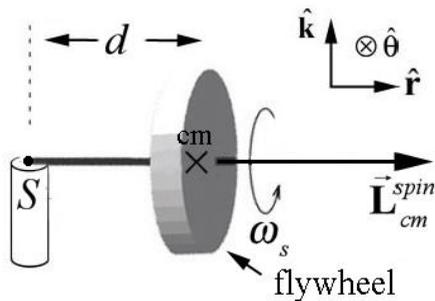
Pembuatan prototipe atau model merupakan aplikasi penerapan umpan balik bagi penyempurnaan model atau produk yang akan dikembangkan di kemudian hari.

f. Pengujian

Urutan tahapan tersebut merupakan kegiatan sistematis terstruktur di mana tahapan yang sedang dibahas selalu berguna untuk memberikan umpan balik bagi perbaikan tahap sebelumnya yang semua tahapan tadi dinilai dengan tolok ukur berdasarkan kriteria fungsi (kriteria teknik) dan kriteria efisiensi (kriteria ekonomi).

2.3. Giroskop

Giroskop adalah alat berupa rotor cakram yang berputar dengan kecepatan tinggi pada sumbunya dan tetap dalam posisinya apabila tidak ada pengaruh kekuatan luar. Giroskop dapat mempertahankan orientasi berlandaskan pada prinsip-prinsip momentum sudut yang diakibatkan oleh putaran poros giroskop. Stabilitas dari giroskop dalam mempertahankan kedudukan akan meningkat jika rotor memiliki momen inersia dan kecepatan putar yang lebih besar. Presesi adalah gerakan memiringkan atau berputar terhadap sumbu giroskop sebagai akibat dari gaya eksternal yang diterapkan. Presesi giroskop akibat pengaruh gaya eksternal misalnya berupa gravitasi (Nafi', 2017).



Gambar 2.5. Giroskop mainan (web.mit.edu)

Giroskop mainan dengan massa m terdiri dari gimbal putar yang terdapat pada rangka bersuspensi membuat sumbu gimbal dapat berada pada segala arah. Salah satu ujung sumbu diletakkan pada tiang dengan panjang d dari pusat massa giroskop. Menentukan koordinat – koordinat kutub sehingga sumbu gimbal giroskop berada pada r – axis dan sumbu vertikal pada z – axis seperti pada gambar 2.8 (web.mit.edu).

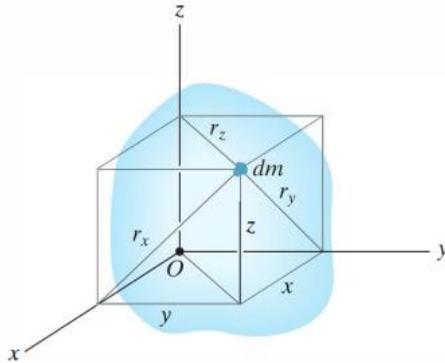
2.4. Momen dan Produk Inersia

Ketika mempelajari kinetika planar suatu benda, dibutuhkan pengertian tentang momen inersia benda tersebut yang dapat dihitung dari sumbu tegak lurus terhadap bidang gerak dan melewati pusat massa benda.

Untuk menganalisis kinetik pergerakan tiga dimensi, terkadang dibutuhkan perhitungan enam jumlah inersia. Hal ini disebut dengan momen dan produk inersia yang menjelaskan tentang distribusi massa untuk benda dengan suatu sistem koordinat yang memiliki orientasi dan titik asal tertentu (Hibbeler, 2010).

2.4.1. Momen Massa Inersia

Meninjau benda tegar pada gambar 2.4. Momen massa inersia untuk elemen diferensial dm suatu benda tentang salah satu dari tiga sumbu koordinat didefinisikan sebagai produk sebuah elemen massa dan kuadrat jarak terpendek dari sumbu terhadap elemen.



Gambar 2.6. Benda tegar (Hibbeler, 2010)

Sebagai contoh, seperti dituliskan pada gambar $r_x = \sqrt{y^2 + z^2}$, sehingga massa momen massa inersia elemen pada sumbu x adalah

$$dl_{xx} = r_x dm = (y^2 + z^2) dm \quad (2.5)$$

Momen massa inersia benda I_{xx} benda dapat ditentukan dengan mengintegrasikan pernyataan sebelumnya pada massa benda seluruhnya. Oleh sebab itu, untuk setiap sumbu dapat kita tuliskan

$$\begin{aligned}
 I_{xx} &= \int_m r_x^2 dm = \int_m (y^2 + z^2) dm \\
 I_{yy} &= \int_m r_y^2 dm = \int_m (x^2 + z^2) dm \\
 I_{zz} &= \int_m r_z^2 dm = \int_m (x^2 + y^2) dm
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Dapat disimpulkan bahwa momen inersia selalu bernilai positif sebab momen massa inersia merupakan jumlah dari produk massa dm yang selalu positif dan kuadrat jarak.

2.4.2. Produk Inersia

Produk inersia untuk elemen diferensial dm terhadap sepasang bidang ortogonal didefinisikan sebagai produk massa elemen dan jarak tegak lurus (atau terpendek) dari bidang elemen. Seperti contoh, jarak x dengan bidang $y - z$ dan jarak y dengan bidang $x - z$. Gambar. Produk inersia dI_{xy} untuk elemen tersebut adalah

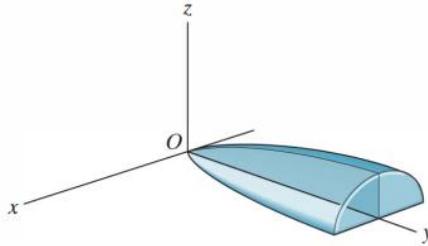
$$dI_{xy} = xy dm \tag{2.7}$$

Perhatikan pula bahwa $dI_{yx} = dI_{xy}$. Dengan mengintegrasikan massa keseluruhan, produk inersia benda terhadap setiap kombinasi bidang dapat dinyatakan sebagai

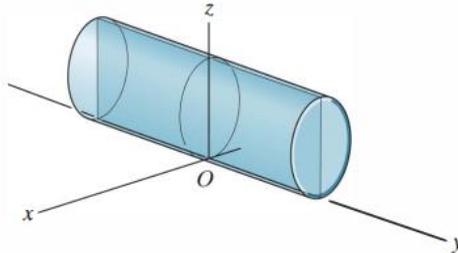
$$\begin{aligned}
 I_{xy} &= I_{yx} = \int_m xy dm \\
 I_{yz} &= I_{zy} = \int_m yz dm \\
 I_{xz} &= I_{zx} = \int_m xz dm
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Berbeda dengan momen inersia yang selalu bernilai positif, produk inersia dapat bernilai positif, negatif maupun nol. Hasilnya bergantung pada tanda aljabar kedua koordinat yang menentukan dan berbeda antara satu dan lainnya. Khususnya, jika

salah satu dari kedua bidang ortogonal merupakan bidang simetri massa, maka produk inersia terhadap bidang – bidang tersebut bernilai nol. Pada kasus demikian, elemen massa akan berpasangan pada setiap sisi bidang simetri. Pada salah satu sisi bidang produk inersia elemen bernilai positif, sedangkan sisi lainnya pada bidang yang sama bernilai negatif, sehingga menghasilkan nilai nol.



Gambar 2.7. Benda simetri (Hibbeler, 2010)



Gambar 2.8. Benda silinder (Hibbeler, 2010)

Contoh kasus ini dapat dilihat pada gambar 2.5 dan 2.6. Pada kasus pertama, gambar 2.5, bidang $y - z$ merupakan bidang simetri, yang menyebabkan $I_{xy} = I_{xz} = 0$. Perhitungan I_{yz} akan menghasilkan nilai positif sebab semua elemen massa terletak hanya pada sumbu positif koordinat y dan z . Untuk benda silinder, dengan sumbu koordinat terletak seperti gambar 2.6, bidang $x - z$ dan $y - z$ keduanya merupakan bidang simetri sehingga $I_{xy} = I_{yz} = I_{zx} = 0$.

2.5. Momentum Sudut

Pada bagian ini akan dikembangkan persamaan yang dibutuhkan untuk menentukan momentum sudut suatu benda kaku terhadap titik yang berubah – ubah. Persamaan tersebut akan memberikan cara untuk mengembangkan kedua prinsip impuls dan momentum serta persamaan rotasi benda kaku. Tentukan benda kaku pada gambar, yang memiliki massa m dan pusat massa G . Koordinat X, Y, Z melambangkan kerangka inersia suatu benda, oleh sebab itu sumbunya tetap atau berubah dengan kecepatan konstan. Momentum sudut yang diukur dari benda ini akan secara relatif ditentukan terhadap titik yang berubah – ubah A . Posisi vektor \mathbf{r}_A dan $\boldsymbol{\rho}_A$ ditarik dari asal koordinat menuju titik A dan dari A menuju partikel benda. Jika massa partikel adalah m_i , momentum sudut terhadap titik A adalah

$$(\mathbf{H}_A)_i = \boldsymbol{\rho}_A \times m_i \mathbf{v}_i \quad (2.9)$$

Di mana \mathbf{v}_i mewakili kecepatan partikel yang diukur dari sistem koordinat X, Y, Z . Jika benda memiliki kecepatan sudut $\boldsymbol{\omega}$ dianggap bahwa \mathbf{v}_i mungkin berkaitan dengan kecepatan A dengan menerapkan persamaan 2.9 sehingga,

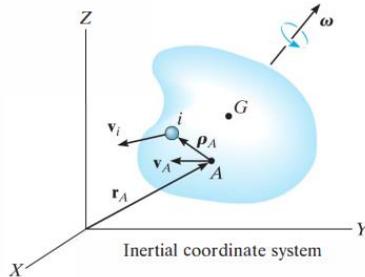
$$\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_A + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_A \quad (2.10)$$

Maka,

$$\begin{aligned} (\mathbf{H}_A)_i &= \boldsymbol{\rho}_A \times m_i (\mathbf{v}_A + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_A) \\ &= (\boldsymbol{\rho}_A m_i) \times \mathbf{v}_A + \boldsymbol{\rho}_A \times (\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\rho}_A) m_i \end{aligned} \quad (2.11)$$

Untuk menambahkan momen seluruh partikel benda membutuhkan sebuah integrasi. Sebab $m_i \rightarrow dm$, kita mendapatkan

$$\mathbf{H}_A = \left(\int_m \rho_A dm \right) \times \mathbf{v}_A + \int_m \rho_A \times (\boldsymbol{\omega} \times \rho_A) dm \quad (2.12)$$

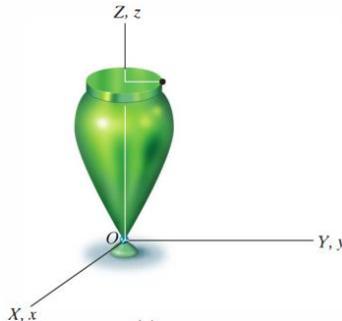


Gambar 2.9. Sistem koordinat inersia (Hibbeler, 2010)

2.6. Gerak Giroskopik

Gerak giroskopik merupakan gerak di mana efek – efek yang ditimbulkan oleh giroskop bekerja. Hal ini akan menyebabkan benda mempertahankan kedudukannya ataupun kembali ke posisi setimbang setelah mengalami ketidakseimbangan setelah mengalami gerak giroskopik dengan putaran tertentu.

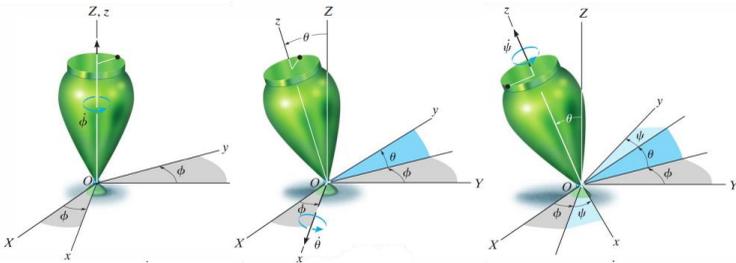
Gerakan struktur akan di analisa menggunakan sudut Euler ϕ, θ, ψ (phi, theta, psi). Posisi struktur dapat ditentukan dengan mempertimbangkan bagian atas struktur seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.10. Posisi awal benda (Hibbeler, 2010)

Posisi akhir struktur dapat ditentukan dengan mengikuti tiga langkah berikut seperti pada gambar 2.11:

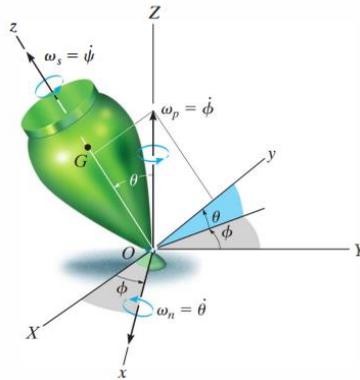
1. Putar bagian atas struktur pada sumbu Z pada sudut ϕ ($0 \leq \phi < 2\pi$).
2. Putar bagian atas struktur pada sumbu x pada sudut θ ($0 \leq \theta \leq \pi$).
3. Putar bagian atas struktur pada sumbu z pada sudut ψ ($0 \leq \psi < 2\pi$) untuk mendapatkan posisi akhir.



Gambar 2.11. Presesi, nutasi dan putaran (Hibbeler, 2010)

Rangkaian dari ketiga sudut ϕ, θ, ψ harus tetap dipertahankan, karena rotasi yang terbatas bukanlah vektor, Gambar 2.11. Meskipun ini adalah kasus, diferensial rotasi $d\phi, d\theta$ dan $d\psi$ adalah vektor, dengan demikian kecepatan sudut ω struktur dapat dinyatakan dalam turunan waktu dari sudut Euler. Komponen kecepatan sudut ϕ, θ dan ψ masing – masing dikenal sebagai presesi, nutasi dan putaran.

Arah positif ditunjukkan pada Gambar 2.11. Terlihat bahwa vektor – vektor tidak saling tegak lurus satu sama lain. Namun, kecepatan sudut ω dari struktur bagian atas masih dapat diungkapkan dari segi ketiga komponen tersebut.



Gambar 2.12. Vektor – vektor pada giroskop (Hibbeler, 2010)

Karena struktur bagian atas simetri berkenaan dengan sumbu z atau sumbu putaran, maka tidak perlu menyematkan sumbu x, y, z pada bagian atas struktur karena sifat inersia bagian atas struktur akan tetap konstan berkenaan dengan kerangka selama gerakan terjadi. Oleh karena itu $\boldsymbol{\Omega} = \boldsymbol{\omega}_p \mathbf{i} + \boldsymbol{\omega}_n$, gambar. Karenanya, kecepatan sudut dari struktur adalah

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\omega} &= \omega_x \mathbf{i} + \omega_y \mathbf{j} + \omega_z \mathbf{k} \\ &= \dot{\theta} \mathbf{i} + (\dot{\phi} \sin \theta) \mathbf{j} + (\dot{\phi} \cos \theta + \psi) \mathbf{k}\end{aligned}\quad (2.13)$$

Dan kecepatan sudut dari sumbu x adalah

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Omega} &= \Omega_x \mathbf{i} + \Omega_y \mathbf{j} + \Omega_z \mathbf{k} \\ &= \dot{\theta} \mathbf{i} + (\dot{\phi} \sin \theta) \mathbf{j} + (\dot{\phi} \cos \theta) \mathbf{k}\end{aligned}\quad (2.14)$$

Dengan memiliki sumbu x, y, z yang merepresentasikan sumbu utama dari inersia untuk bagian atas struktur, maka momen inersia dapat dijabarkan sebagai $I_{xx} = I_{yy} = I_{zz}$. Karena $\boldsymbol{\Omega} \neq \boldsymbol{\omega}$, persamaan 2.12 digunakan untuk menetapkan persamaan rotasi

dari gerakan. Dengan mendistribusikan persamaan – persamaan tersebut ke setiap komponen kecepatan sudut dapat didefinisikan dengan persamaan 2.13 dan 2.14, turunan waktu yang sesuai dan komponen dari persamaan momen inersia.

$$\begin{aligned}\sum M_x &= I(\ddot{\theta} - \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta) + I_z \dot{\theta} \sin \theta (\dot{\phi} \cos \theta + \dot{\psi}) \\ \sum M_y &= I(\ddot{\phi} \sin \theta + 2\dot{\phi}\dot{\theta} \cos \theta) + I_z \dot{\theta} (\dot{\phi} \cos \theta + \dot{\psi}) \\ \sum M_z &= I(\ddot{\psi} + \ddot{\phi} \cos \theta - \dot{\phi}\dot{\theta} \sin \theta)\end{aligned}\quad (2.15)$$

Setiap penjumlahan momen hanya dapat berfungsi pada titik tetap O atau pusat massa dari struktur. Karena persamaan merepresentasikan sepasang persamaan turunan linier dua derajat, pada umumnya bentuk tertutup dari penyelesaian persamaan bisa diperoleh. Sebagai gantinya sudut Euler ϕ, θ, ψ bisa diperoleh secara grafik sebagai fungsi waktu menggunakan analisa numerik dan teknik komputerisasi.

Pada kasus tertentu, penyederhanaan 2.15 memungkinkan. Umumnya disebut presesi tetap, hal ini terjadi jika sudut nutasi θ , presesi ϕ , dan rotasi ψ tetap konstan. Persamaan 2.15 kemudian disederhanakan menjadi

$$\begin{aligned}\sum M_x &= -I\dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta + I_z \dot{\phi} \sin \theta (\dot{\phi} \cos \theta + \dot{\psi}) \\ \sum M_y &= 0 \\ \sum M_z &= 0\end{aligned}\quad (2.16)$$

Persamaan 2.12 dapat disederhanakan lebih lanjut dengan memperhatikan bahwa, dari persamaan 2.9, $\omega_z = \dot{\phi} \cos \theta + \dot{\psi}$, sehingga

$$\sum M_x = -I\dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta + I_z \dot{\phi} (\sin \theta) \omega_z$$

atau

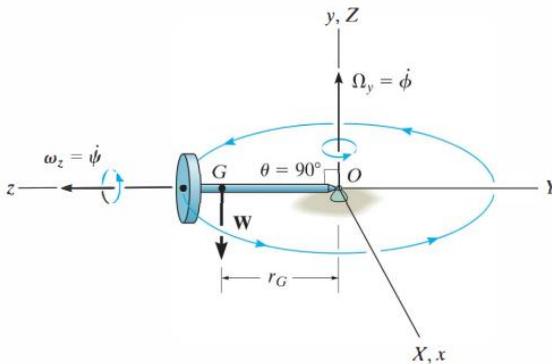
$$\Sigma M_x = \dot{\phi} \sin \theta (I_z \omega_z - I \dot{\phi} \cos \theta) \quad (2.17)$$

Hal ini menarik untuk diperhatikan apa yang mempengaruhi putaran $\dot{\psi}$ pada momen terhadap sumbu x . Untuk membuktikan, anggap bahwa rotor putar pada gambar 2.8. Pada $\theta = 90^\circ$, pada kasus ini persamaan 2.12 berkurang menjadi

$$\Sigma M_x = I_z \dot{\phi} \dot{\psi}$$

atau

$$\Sigma M_x = I_z \Omega_y \omega_z \quad (2.18)$$



Gambar 2.13. Efek giroskopis (Hibbeler, 2010)

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa Ω_y dan ω_z bergerak bersama terhadap sumbu positif masing – masing dan oleh sebab itu saling tegak lurus. Umumnya, rotor diduga akan jatuh akibat pengaruh gravitasi. Namun, hal ini bukanlah penyebabnya, pada produk $I_z \Omega_y \omega_z$ merupakan pilihan yang tepat

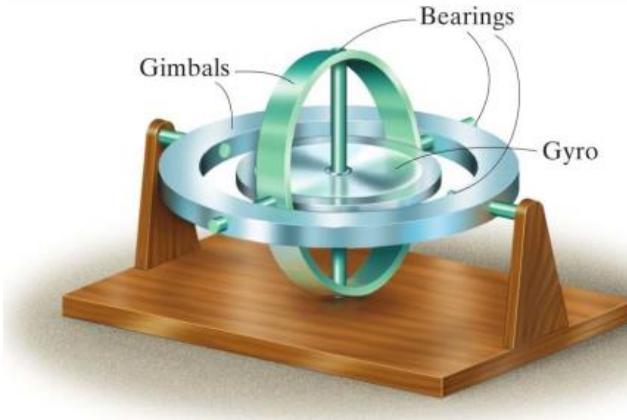
untuk mengimbangi momen $\sum M_x = W_{rG}$ dimana berat rotor bernilai 0. Fenomena tidak biasa pergerakan benda kaku ini disebut sebagai Efek Giroskopis.

Barangkali demonstrasi yang lebih menarik dari efek giroskopis datang dari mempelajari pergerakan giroskop yang sering disebut sebagai giro. Giro merupakan rotor yang berputar pada laju sangat tinggi terhadap sumbu simetrinya. Laju putaran ini merupakan laju yang jauh lebih besar dibandingkan laju presesi putaran terhadap sumbu vertikal. Oleh sebab itu, rotor giro seperti pada gambar, $\omega_z \gg \Omega_y$ dan besarnya momentum angular terhadap titik adalah 0. Seperti ditetapkan pada equation, berkurang dari bentuk $\mathbf{H}_O = I_z \omega_z$. Sebab kedua besaran dan arah dari \mathbf{H}_O konstan seperti dilihat pada x, y, z menghasilkan

$$\sum \mathbf{M}_x = \boldsymbol{\Omega}_x \times \mathbf{H}_x$$

Menggunakan kaidah tangan kanan yang diaplikasikan pada produk silang, dapat disimpulkan bahwa $\boldsymbol{\Omega}_y$ selalu mengayunkan \mathbf{H}_O (atau $\boldsymbol{\omega}_z$) menuju arah dari $\sum \mathbf{M}_x$. Akibatnya perubahan arah momentum sudut giro, $d\mathbf{H}_O$, sebanding dengan impuls sudut yang disebabkan oleh berat giro terhadap O . $d\mathbf{H}_O = \sum \mathbf{M}_x dt$ equation. Begitu pula, sebab $\mathbf{H}_O = I_z \omega_z$ dan $\sum \mathbf{M}_x, \boldsymbol{\Omega}_y$, dan \mathbf{H}_O saling tegak lurus, persamaan 2.17 berkurang menjadi persamaan 2.16.

Ketika sebuah giro dipasang pada cincin gimbal, gambar 2.13, ia menjadi bebas dari momen eksternal yang diberikan pada basisnya. Sehingga pada teorinya, momentum sudutnya \mathbf{H} tidak akan pernah berpresesi, namun mempertahankan orientasi tetapnya terhadap sumbu putaran ketika basisnya diputar. Giroskop jenis ini disebut sebagai giro bebas dan digunakan sebagai girokompas ketika sumbu putaran giro mengarah ke utara.



Gambar 2.14. Giroskop pada cincin gimbals (Hibbeler, 2010)

Pada kenyataannya, mekanisme gimbals tidak pernah sepenuhnya bebas dari gesekan, sehingga alat seperti itu hanya berguna untuk navigasi lokal kapal dan pesawat terbang. Efek giroskopis juga berguna sebagai sarana penyeimbang kedua gerakan memutar kapal di laut dan lintasan rudal serta proyektil. Selanjutnya, efek ini penting dalam desain poros dan *bearing* untuk rotor yang digunakan untuk presisi paksa.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Langkah – Langkah Penelitian

Rancang bangun *self balancing bike* menggunakan giroskop tunggal dengan orientasi horizontal dilakukan dengan beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Studi pustaka dan lapangan
2. Perumusan masalah dan penentuan tujuan masalah
3. Perancangan dan pembuatan sistem dua roda segaris
4. Perancangan giroskop dan struktur penyangga giroskop
5. Perhitungan momen giroskopik dan momen *self balancing bike*
6. Penentuan spesifikasi elektronik
7. Pengujian *self balancing bike* tanpa kemiringan awal
8. Pengujian *self balancing bike* dengan kemiringan awal 30°
9. Kecepatan sudut yang dibutuhkan untuk menyetimbangkan *self balancing bike* dari kemiringan 0° sampai 30°

3.2. Studi Pustaka dan Lapangan

Studi pustaka mengenai perancangan sistem dua roda segaris dan giroskop melalui literatur tertulis maupun melalui penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Studi mengenai perancangan sistem dua roda segaris dilakukan dengan mempelajari dasar – dasar perancangan dan desain, kemudian dilanjutkan dengan mempelajari proses – proses permesinan serta bahan – bahan yang dibutuhkan dalam perakitan. Studi mengenai giroskop meliputi jenis orientasi, struktur, inersia, dinamika hingga aplikasi giroskop baik sebagai alat untuk penelitian maupun yang telah dipasarkan sebagai alat bantu moda transportasi modern.

3.3. Perumusan Masalah dan Penentuan Tujuan Penelitian

Perumusan masalah dan penentuan tujuan masalah dilakukan setelah melakukan studi pustaka dan lapangan untuk menentukan masalah apa yang akan dicari solusinya pada penelitian ini serta tujuan dari pemecahan masalah tersebut. Hal ini penting agar penelitian lebih terarah dan menghasilkan luaran yang jelas.

3.4. Perancangan dan Pembuatan Sistem Dua Roda Segaris

Perancangan sistem dua roda segaris dilakukan dengan mempertimbangkan struktur utama sepeda dengan dua buah roda. Perancangan juga meliputi bahan yang mudah ditemukan di pasaran serta dapat dirancang menjadi suatu sistem dua roda segaris. Sistem yang dibuat harus kuat untuk menahan beban dari giroskop beserta struktur giroskop, selain itu juga harus memiliki titik berat serendah mungkin sehingga dapat memaksimalkan momen giroskopik yang dihasilkan oleh giroskop. Keseimbangan antara bagian kanan dan kiri giroskop (*rolling*) harus diperhatikan sehingga pada saat pengambilan data tidak terjadi permasalahan.

3.5. Perancangan Giroskop dan Struktur Penyangga Giroskop

Perancangan giroskop, struktur penyangga giroskop dilakukan dengan melakukan perhitungan momen sistem dua roda segaris pada saat mengalami kemiringan sampai dengan 30° . Nilai yang diperoleh dari sistem dua roda segaris kemudian digunakan untuk merancang giroskop dengan mempertimbangkan inersia, massa serta diameter giroskop. Struktur penyangga giroskop dirancang dengan mempertimbangkan momen yang akan dihasilkan pada saat giroskop berputar pada kecepatan tinggi serta gaya – gaya pada *self balancing* bike yang mana struktur penyangga giroskop harus kuat menahan gaya serta momen yang

terjadi. Perancangan sendiri akan digambar dengan menggunakan bantuan *software Solidworks 2017* untuk mengilustrasikan rancangan *self balancing bike*.

3.6. Perhitungan Momen Girokopik dan Momen *Self Balancing Bike*

Perhitungan Momen Girokopik dilakukan dengan beberapa kondisi karena putaran dari girokop sendiri akan dikontrol secara *real time*. Perhitungan yang pertama adalah perhitungan momen yang dibutuhkan untuk menstabilkan girokop pada posisi setimbang. Perhitungan selanjutnya adalah perhitungan momen yang dibutuhkan untuk menyetimbangkan girokop dari kemiringan tertentu sampai dengan sebesar 30° . Data yang diperoleh akan digunakan untuk mengontrol putaran girokop pada kondisi – kondisi yang telah ditentukan. Momen *self balancing bike* dihitung dengan menggunakan rumus pada tinjauan pustaka dan ditentukan pula putaran yang dibutuhkan untuk menghasilkan momen tersebut.

3.7. Penentuan Spesifikasi Elektronik

Penentuan spesifikasi elektronik antara lain adalah penentuan motor listrik serta *electronic speed controller* yang digunakan. Motor listrik yang digunakan harus memiliki kecepatan sudut yang dapat mengakomodir kebutuhan *self balancing bike*. *Electronic speed controller* yang digunakan juga harus sesuai dengan motor listrik sehingga momen maupun kecepatan sudut motor listrik dapat maksimal. Selain itu diperlukan pula sumber daya atau baterai untuk menyuplai motor listrik dan *electronic speed controller*.

3.8. Pengujian *Self Balancing Bike* tanpa Kemiringan Awal

Percobaan pertama dilakukan dengan menguji stabilitas *self balancing bike* tanpa pemberian kemiringan awal atau eksitasi pada sudut *rolling*. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mendapatkan kecepatan sudut yang dibutuhkan oleh giroskop untuk menstabilkan *self balancing bike*. Kecepatan sudut giroskop yang digunakan berdasarkan hasil dari perhitungan yang dilakukan sebelumnya, apabila kecepatan sudut yang diberikan masih belum bisa menstabilkan *self balancing bike* maka akan dilakukan pengulangan dengan penambahan kecepatan sudut sebesar 100 rpm sampai *self balancing bike* stabil.

3.9. Pengujian *Self Balancing Bike* dengan Kemiringan Awal 30°

Percobaan kedua dilakukan dengan menguji apakah giroskop dapat menyetimbangkan *self balancing bike* dari kemiringan atau eksitasi sebesar 30° pada sudut *rolling*. Tujuan dari percobaan ini adalah untuk mendapatkan kecepatan sudut yang dibutuhkan oleh giroskop untuk menyetimbangkan *self balancing bike* dari kemiringan sebesar 30°. Kecepatan sudut giroskop yang digunakan berdasarkan hasil dari perhitungan yang dilakukan sebelumnya, apabila kecepatan sudut yang diberikan masih belum bisa menyetimbangkan *self balancing bike* maka akan dilakukan pengulangan dengan penambahan kecepatan sudut sebesar 100 rpm sampai *self balancing bike* setimbang.

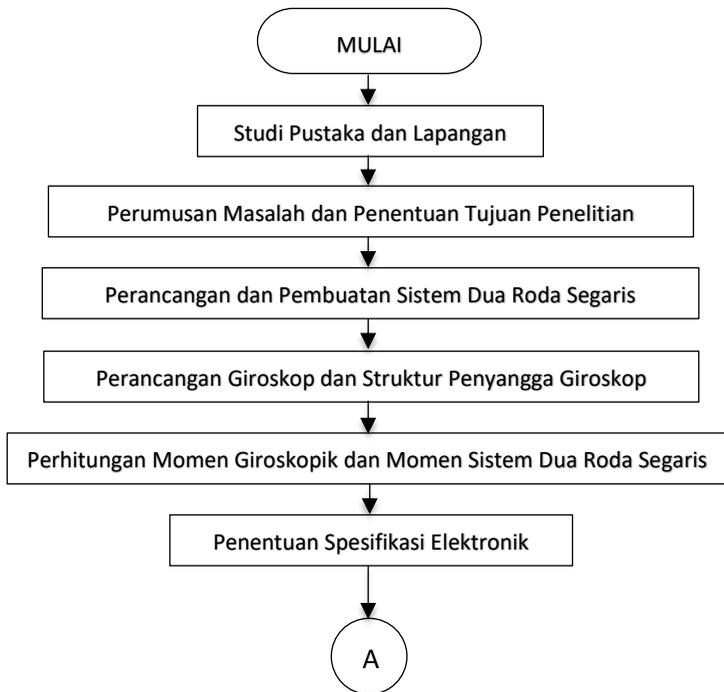
3.10. Kecepatan Sudut yang Dibutuhkan untuk Menyetimbangkan *Self Balancing Bike* dari Kemiringan 0° sampai 30°

Percobaan yang dilakukan akan menghasilkan data berupa rpm. Data pertama adalah rpm yang dibutuhkan oleh giroskop untuk menstabilkan *self balancing bike*. Data kedua adalah rpm yang dibutuhkan oleh giroskop untuk menyetimbangkan *self*

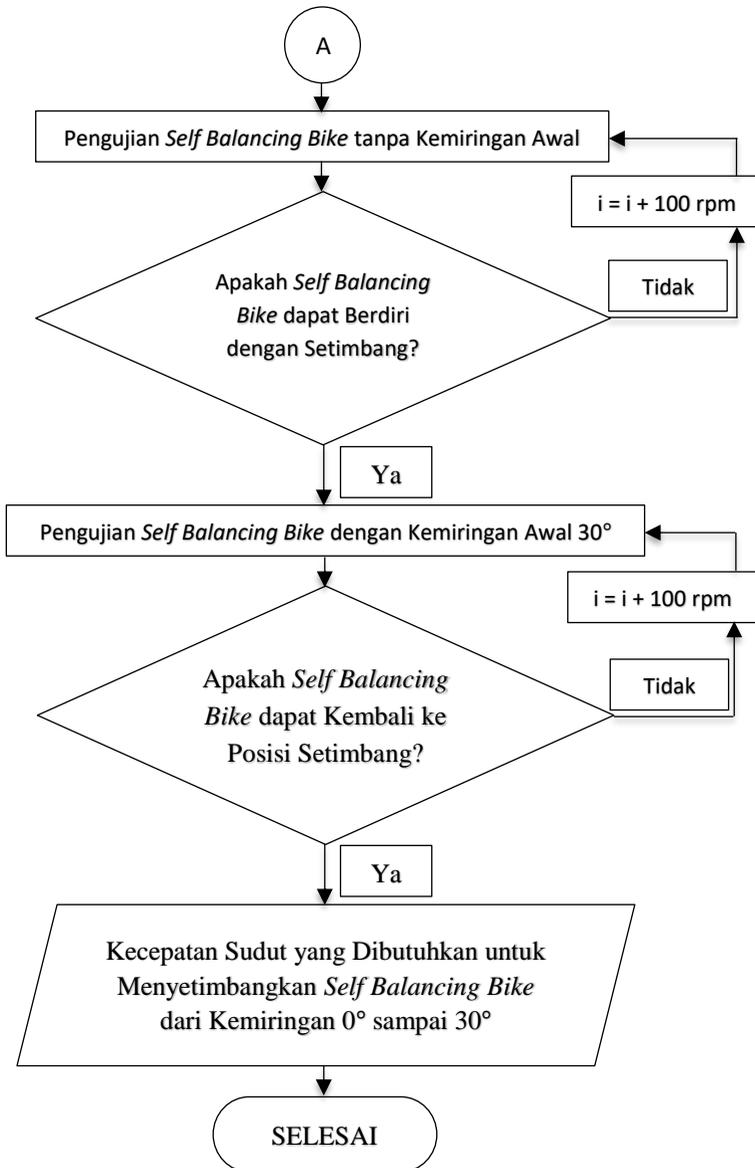
balancing bike dari kemiringan atau eksitasi sebesar 30° pada sudut *rolling*.

3.11. Diagram Alir Penelitian

Untuk menjelaskan langkah – langkah penelitian agar lebih sistematis dan mudah dipahami, maka dibuat diagram alir penelitian yang mana menjelaskan tentang langkah – langkah yang harus dilakukan pada penelitian seperti pada gambar 3.1 di bawah ini.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian



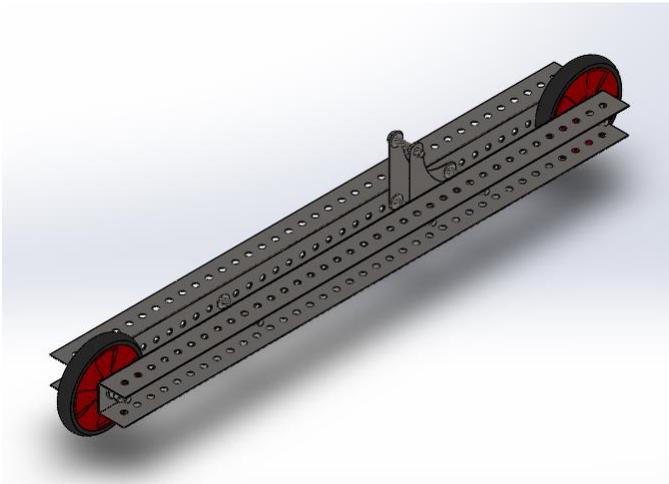
Gambar 3.2. Lanjutan diagram alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

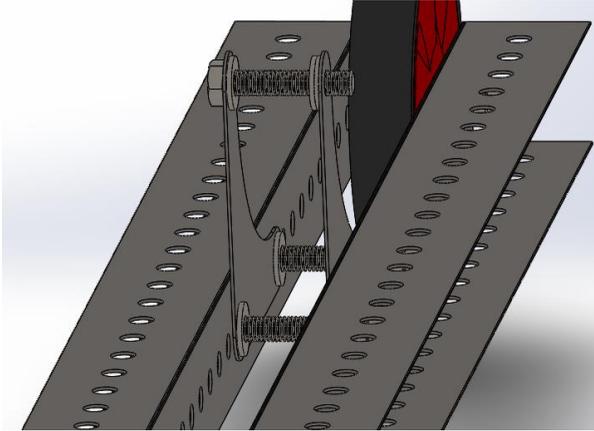
4.1. Perancangan dan Pembuatan Sistem Dua Roda Segaris

Rancang bangun sistem dua roda segaris dilakukan menggunakan bantuan *software SolidWorks 2017*. Sebelum melakukan perancangan diperlukan perancangan dasar terkait dimensi dari sistem dua roda segaris kemudian dilakukan survei bahan – bahan yang tersedia di pasaran untuk merealisasikan rancangan yang telah dibuat. Berikut adalah rancangan sistem dengan dua roda segaris menggunakan bantuan *software Solidworks 2017* dan menggunakan bahan – bahan yang tersedia di pasaran:



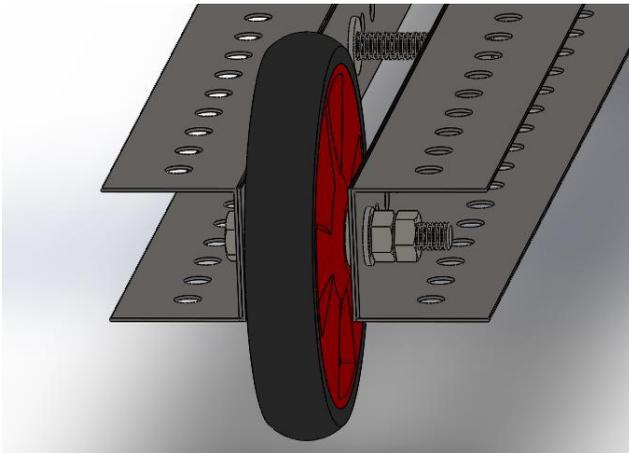
Gambar 4.1. Sistem dua roda segaris

Gambar 4.1 merupakan gambar keseluruhan sistem dua roda segaris tanpa giroskop. Pada bagian tengah terdapat siku penghubung yang merupakan penghubung antara sistem dua roda segaris dan struktur penyangga giroskop.



Gambar 4.2. Siku penghubung

Gambar 4.2 merupakan siku penghubung yang menghubungkan antara sistem dua roda segaris dengan struktur penyangga giroskop. Pada struktur penyangga giroskop nantinya akan terdapat dua buah lubang yang akan dikunci menggunakan dua buah baut panjang.



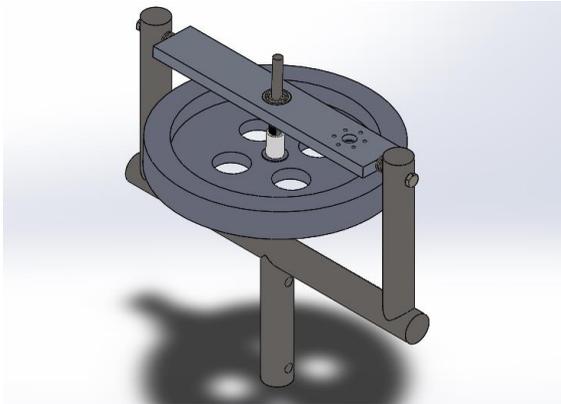
Gambar 4.3. Roda sistem dua roda segaris

Sistem dua roda segaris yang dibuat menggunakan besi siku berlubang dengan tiap sisi memiliki 2 lapis untuk membuat struktur lebih kuat supaya tidak mudah terjadi *bending*. Pada bagian tengah terdapat siku sebagai penghubung dengan penyangga giroskop serta pada bagian roda menggunakan roda bantu sepeda anak – anak seperti pada gambar 4.3. Semua bagian pada sistem dua roda segaris ini dihubungkan menggunakan baut dan mur.

Kendala pada rancang bangun sistem dua roda segaris ini adalah penyesuaian antara desain dengan bahan – bahan yang ada di pasaran untuk mempermudah perakitan. Selain itu diperlukan tambahan – tambahan sehingga sistem dua roda segaris yang dihasilkan dapat memiliki kekuatan yang tinggi, titik massa yang rendah serta menahan getaran dari putaran giroskop.

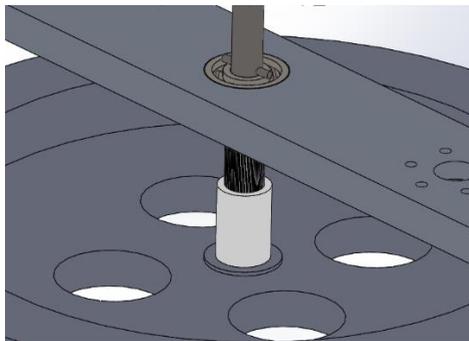
4.2. Perancangan Giroskop dan Struktur Penyangga Giroskop

Rancang bangun giroskop dilakukan dengan mempertimbangkan dimensi serta material yang akan digunakan. Giroskop yang dibuat menggunakan material aluminium karena memiliki massa jenis rendah dibandingkan besi sehingga dapat menghasilkan dimensi yang lebih besar dengan massa yang sama. Dimensi yang lebih besar dapat menghasilkan nilai inersia lebih besar dan dapat meningkatkan momen giroskopik dari *self balancing bike*. Sistem penyangga giroskop menggunakan silinder berlubang berbahan besi untuk mengurangi massa dari struktur *self balancing bike*. Berikut adalah rancangan giroskop dan struktur penyangganya:



Gambar 4.4. Giroskop dan sistem penyangganya

Pada sistem penyangga giroskop terdapat batang aluminium sebagai tempat giroskop menggantung. Selain itu, pada batang aluminium terdapat *bearing* dan terhubung pada poros giroskop, lubang untuk memasang motor listrik serta pasak untuk menahan giroskop supaya tidak terjatuh. Poros giroskop sendiri terbuat dari bahan baja dengan diameter 8 mm. Poros giroskop memiliki panjang 15 cm yang mana juga terdapat *pulley* yang nantinya dihubungkan dengan *pulley* pada motor listrik menggunakan *belt*.



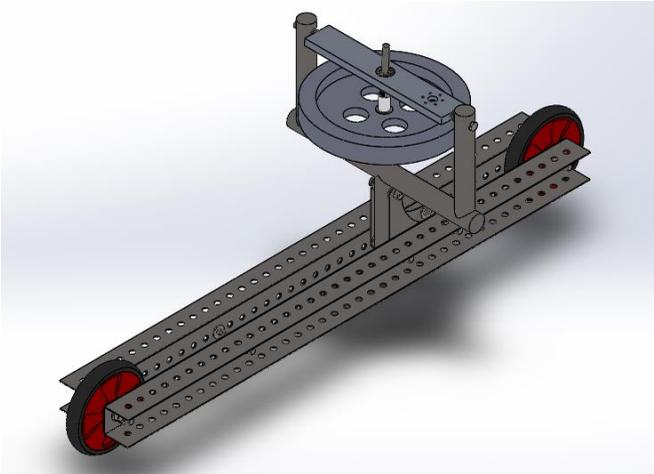
Gambar 4.5. Sistem penghubung giroskop dan sistem penyangganya

Kendala pertama dari perancangan giroskop adalah proses permesinan yang harus menggunakan bubut, *drill* hingga CNC. Proses permesinan ini memerlukan waktu yang lama karena harus memperhatikan keseimbangan dari giroskop itu sendiri. Giroskop yang tidak seimbang akan menyebabkan getaran jika diputar dan akan menyebabkan *self balancing bike* tidak berfungsi.

Kendala kedua dari perancangan giroskop adalah pemasangan poros giroskop, di mana poros yang dipasang harus benar – benar tepat pada pusat giroskop serta tidak miring. Pengunci antara poros giroskop dan giroskop juga harus kuat untuk menahan putaran giroskop yang mencapai ribuan rpm.

Perbedaan material antara giroskop, poros dan penguncinya pun menjadi kendala. Giroskop menggunakan material aluminium yang mana lebih lunak daripada poros dan pengunci yang menggunakan material besi. Hal ini menyebabkan giroskop tidak *reliable* dalam jangka waktu lama. Bahkan hanya dengan beberapa kali percobaan, pengunci giroskop kembali kendur dan tentunya akan sangat sulit untuk dibenahi. Pengunci yang kendur ini menyebabkan getaran yang sangat tinggi ketika giroskop berada pada kemiringan tertentu. Semakin besar sudut kemiringan dan rpm giroskop, getaran pun akan semakin tinggi.

Kendala ketiga adalah ketidakseimbangan antara bagian atas pelat dan bagian bawah pelat yang menyebabkan terhambatnya presesi pada *self balancing bike*. Pada bagian bawah pelat menopang giroskop yang memiliki massa lebih dari 1 kg serta poros yang cukup panjang. Sedangkan pada bagian atas pelat hanya terdapat motor listrik yang hanya memiliki berat 300 gram. Hal ini menyebabkan kecepatan sudut presesi melambat karena juga harus mengangkat ketidakseimbangan dari bagian bawah dan atas pelat. Secara ideal, bagian atas dan bawah pelat seharusnya seimbang untuk menghasilkan presesi yang lancar.

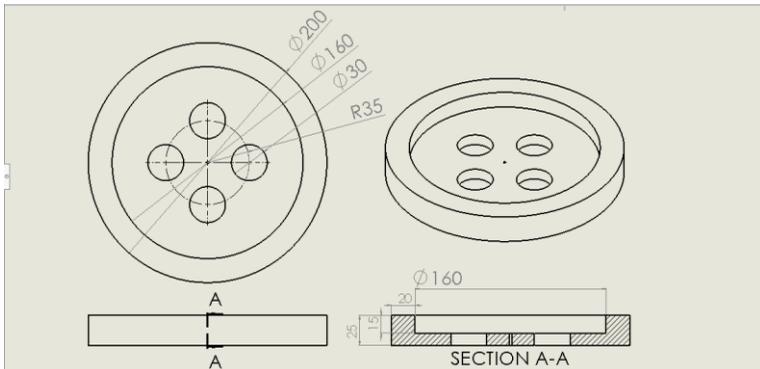


Gambar 4.6. *Assembly Self Balancing Bike*

Setelah dilakukan perancangan pada SolidWork 2017 maka rancangan tersebut direalisasikan dengan menggunakan bahan – bahan yang telah ditentukan. *Self balancing bike* pada kondisi sebenarnya seperti pada gambar 4.7.



Gambar 4.7. Hasil pembuatan *self balancing bike*



Gambar 4.8. Dimensi Giroskop

Giroskop memiliki momen inersia yang nantinya akan berguna untuk menghasilkan momen giroskopik. Gambar 4.8 merupakan adalah dimensi giroskop serta menjadi dasar perhitungan momen inersia giroskop.

- I. $I_{\text{pelat bawah}} = I_{\text{piringan}} + 4I_{\text{lubang}}$
- II. $I_{\text{cincin atas}}$
- III. $I_{\text{total}} = I_{\text{pelat bawah}} + I_{\text{cincin atas}}$

$$\begin{aligned} \text{Massa jenis bahan Aluminium 1060} &= 2700 \text{ kg/m}^3 \\ &= 0,0027 \text{ g/mm}^3 \end{aligned}$$

I. Piringan

$$D = 200 \text{ mm}$$

$$h = 10 \text{ mm}$$

$$V = \pi x r^2 x t$$

$$= \frac{22}{7} x (100 \text{ mm})^2 x 10 \text{ mm}$$

$$= 314.159,2654 \text{ mm}^3$$

$$I_{\text{piringan}} = \frac{1}{2} x M x R^2$$

$$I_{piringan} = \frac{1}{2} x (\rho x V) x R^2$$

$$I_{piringan}$$

$$= \frac{1}{2} x \left(0,0027 \frac{g}{mm^3} x 314.159,2654 mm^3 \right) x (100 mm)^2$$

$$I_{piringan} = 4.241.150,082 gmm^2$$

Lubang

$$D = 30 mm$$

$$V = \pi x r^2 x t$$

$$h = 10 mm$$

$$= \frac{22}{7} x (15 mm)^2 x 10 mm$$

$$d = 35 mm$$

$$= 7.068,58 mm^3$$

$$I_{lubang} = \left(\frac{1}{2} x M x R^2 \right) + (M x d^2)$$

$$I_{lubang} = \left(\frac{1}{2} x (\rho x V) x R^2 \right) + ((\rho x V) x d^2)$$

$$I_{lubang}$$

$$= \left(\frac{1}{2} x \left(0,0027 \frac{g}{mm^3} x 7.068,58 mm^3 \right) x (15 mm)^2 \right)$$

$$+ \left(\left(0,0027 \frac{g}{mm^3} x 7.068,58 mm^3 \right) x (35 mm)^2 \right)$$

$$I_{lubang} = 25.526,41058 gmm^2$$

$$I_{pelat bawah} = I_{piringan} + 4I_{lubang}$$

$$I_{pelat bawah} = 4.241.150,082 gmm^2$$

$$+ 4(25.526,41058 gmm^2)$$

$$I_{pelat bawah} = 4.343.255,724 gmm^2$$

II. Cincin

$$D = 200 mm \quad V = (\pi x R^2 x h) - (\pi x r^2 x h)$$

$$d = 160 mm \quad = \pi x h (R^2 - r^2)$$

$$\begin{aligned}
 h = 15 \text{ mm} &= \frac{22}{7} \times 15 \text{ mm} \times ((100 \text{ mm})^2 - (80 \text{ mm})^2) \\
 &= 169.646 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

$$I_{cincin} = \frac{1}{2} \times M \times (R^2 + r^2)$$

$$I_{cincin} = \frac{1}{2} \times (\rho \times V) \times (R^2 + r^2)$$

$$\begin{aligned}
 I_{cincin} &= \frac{1}{2} \times \left(0,0027 \frac{\text{g}}{\text{mm}^3} \times 169.646 \text{ mm}^3 \right) \times ((100 \text{ mm})^2 \\
 &\quad + (80 \text{ mm})^2)
 \end{aligned}$$

$$I_{cincin} = 3.755.962,513 \text{ gmm}^2$$

$$\text{III. } I_{total} = I_{pelat \text{ bawah}} + I_{cincin}$$

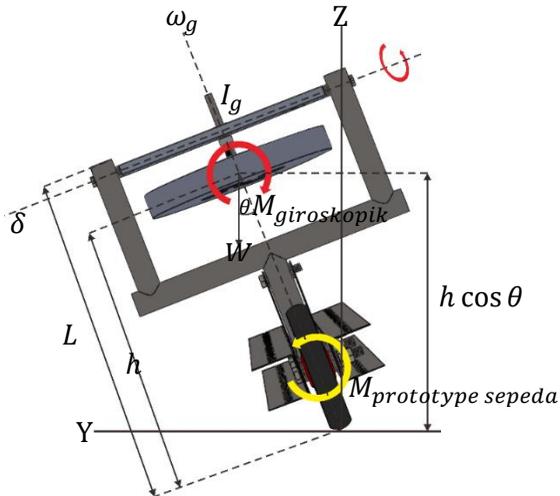
$$I_{total} = 4.343.255,724 \text{ gmm}^2 + 3.755.962,513 \text{ gmm}^2$$

$$I_{total} = 8.099.218,237 \text{ gmm}^2$$

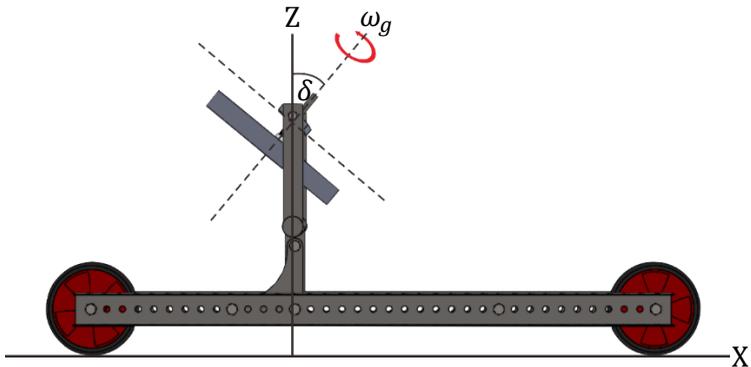
$$I_{total} = 0,00809 \text{ kgm}^2$$

4.3. Persamaan Matematis

Model kendaraan roda dua dengan sistem stabilisasi giroskopik ini terdiri dari 3 body penyusun, yakni *body* kendaraan, *body* gimbale, dan *body flywheel*. Ketiga *body* ini kemudian disusun menjadi satu system, dimana *flywheel* dan gimbale sebagai sistem stabilitas dari *body* kendaraan dengan memanfaatkan efek giroskopik yang dihasilkan oleh putaran *flywheel*. Model FBD dari sistem stabilisasi giroskopik kendaraan roda dua dapat dilihat pada gambar 4.8 dan 4.9 sebagai berikut:



Gambar 4.9. Free Body Diagram tinjauan dari depan



Gambar 4.10. Free Body Diagram tinjauan dari samping

Dari gambar di atas, notasi b dan g menyatakan *body* kendaraan dan giroskop secara berturut-turut. Notasi F , I , dan h berturut-turut menyatakan gaya berat, momen inersia, dan tinggi 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 , δ , ω dimana θ menyatakan sudut kemiringan kendaraan, δ menyatakan sudut gimbal, ω menyatakan kecepatan putar giroskop.

Sistem kendaraan dengan stabilitas giroskopik, maka butuh persamaan model dari kendaraan tersebut. Dinamika non linear diperoleh dari persamaan momen, dan nantinya bisa diubah ke dalam bentuk *transfer function* sebagai proses linearisasi. Maka persamaannya sebagai berikut:

$$\sum M = I_b \ddot{\theta} \quad (4.1)$$

$$I_g \omega_g \dot{\delta} \cos \delta - W h \sin \theta = I_b \ddot{\theta} \quad (4.2)$$

$$W = m_{total} g \quad (4.3)$$

Jadi persamaannya menjadi:

$$I_g \omega_g \dot{\delta} \cos \delta - m_{total} g h \sin \theta = I_b \ddot{\theta} \quad (4.4)$$

Jika $\delta = \theta = 0$, maka $\cos \delta = 1$ dan $\sin \theta = \theta$ sehingga linearisasi persamaan model kendaraan:

$$I_g \omega_g \dot{\delta} - m_{total} g h \theta = I_b \ddot{\theta} \quad (4.5)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{I_g \omega_g}{I_b} \dot{\delta} - \frac{m_{total} g h}{I_b} \theta \quad (4.6)$$

$$\ddot{\theta} + \frac{m_{total} g h}{I_b} \theta = \frac{I_g \dot{\delta}}{I_b} \quad (4.7)$$

Persamaan (4.7) dijadikan *transfer function* dengan Transformasi Laplace sebagai berikut:

$$s^2 \theta + \frac{m_{total} g h}{I_b} \theta = \frac{I_g s \alpha}{I_b} s \delta \quad (4.8)$$

$$\theta \left(s^2 + \frac{m_{total} g h}{I_b} \right) = \frac{I_g s \alpha}{I_b} s \delta \quad (4.9)$$

Dengan m_{total} adalah massa total *self balancing bike*, g adalah percepatan gravitasi, h adalah tinggi pusat massa, I_b adalah inersia *self balancing bike* dan I_g adalah inersia giroskop.

4.4. Perhitungan Momen Giroskopik dan Momen *Self Balancing Bike*

Perhitungan momen giroskopik memperhitungkan putaran serta presesi dari *self balancing bike*, sedangkan momen *self balancing bike* memperhitungkan massa serta kemiringan dari *self balancing bike* tersebut. Pada percobaan kali ini presesi dari *self balancing bike* dibiarkan natural sehingga nilai dari presesi ditentukan dengan pengamatan langsung.

Tabel 4.1. Parameter Self Balancing Bike

Parameter	Nilai	Satuan
Massa giroskop	1,246	<i>kg</i>
Jari - jari giroskop	0,2	<i>m</i>
Inersia giroskop	0,00809	<i>kgm²</i>
Massa total	3,865	<i>kg</i>
Gravitasi	9,81	<i>m/s²</i>

Parameter pada tabel 4.1 menunjukkan nilai – nilai yang dibutuhkan untuk menentukan momen *self balancing bike* dan momen giroskopik. Berikut adalah contoh perhitungan dari momen giroskopik.

$$\Sigma M_x = I_g \Omega_y \omega_g$$

$$\Sigma M_x = 0,008099 \text{ kgm}^2 \times 0,52 \text{ rad/s} \times 104,76 \text{ rad/s}$$

$$\Sigma M_x = 0,44 \text{ Nm}$$

Dengan I_g adalah momen inersia giroskop, Ω_y adalah kecepatan sudut presesi dan ω_g adalah kecepatan sudut putaran giroskop.

Tabel 4.2. Perhitungan Momen Giroskopik

Inersia (kgm^2)	Spin (rpm)	Spin (rad/s)	Presesi (rpm)	Presesi (rad/s)	Momen Giroskopik (Nm)
0,008099	1000	104,76	5	0,52	0,44
0,008099	2000	209,52	5	0,52	0,89
0,008099	3000	314,29	5	0,52	1,33
0,008099	4000	419,05	5	0,52	1,78
0,008099	5000	523,81	5	0,52	2,22
0,008099	6000	628,57	5	0,52	2,67
0,008099	7000	733,33	5	0,52	3,11
0,008099	8000	838,10	5	0,52	3,56
0,008099	9000	942,86	5	0,52	4,00
0,008099	10000	1047,62	5	0,52	4,44
0,008099	11000	1152,38	5	0,52	4,89
0,008099	12000	1257,14	5	0,52	5,33
0,008099	13000	1361,90	5	0,52	5,78
0,008099	14000	1466,67	5	0,52	6,22
0,008099	15000	1571,43	5	0,52	6,67
0,008099	16000	1676,19	5	0,52	7,11
0,008099	17000	1780,95	5	0,52	7,56
0,008099	18000	1885,71	5	0,52	8,00
0,008099	19000	1990,48	5	0,52	8,44
0,008099	20000	2095,24	5	0,52	8,89

Momen giroskopik yang dihasilkan seperti pada tabel 4.2 merupakan momen yang membuat *selfbalancing bike* dapat berdiri

dengan sendirinya, namun *self balancing bike* sendiri memiliki momen yang dihasilkan ketika sepeda memiliki kemiringan tertentu dari titik setimbangnya.

Analisa gaya dan momen pada gambar 4.8 merupakan pandangan dari bagian depan *self balancing bike*. Ketika *self balancing bike* berada pada kemiringan tertentu, maka terdapat momen sebesar $w \sin \theta$ dikalikan dengan h yaitu tinggi pusat massa *self balancing bike*. Sedangkan momen tersebut akan dilawan oleh momen giroskopik dengan besar tertentu tergantung pada kecepatan sudut giroskop. Berikut adalah contoh perhitungan dari momen *self balancing bike*.

$$\sum M_x = m \cdot g \cdot \sin \theta \cdot h$$

$$\sum M_x = 3,865 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s} \times \sin 5^\circ \times 0,25 \text{ m}$$

$$\sum M_x = 0,83 \text{ Nm}$$

Dengan m adalah massa, g adalah percepatan gravitasi, $\sin \theta$ adalah sinus sudut dan h adalah tinggi pusat massa.

Tabel 4.3. Momen Self Balancing Bike

Massa (kg)	Gravitasi (m/s ²)	Sudut (θ)	Sinus Sudut	h (h)	Momen Sistem Dua Roda Segaris (Nm)
3,865	9,81	5	0,087	0,25	0,83
3,865	9,81	10	0,174	0,25	1,65
3,865	9,81	15	0,259	0,25	2,45
3,865	9,81	20	0,342	0,25	3,24
3,865	9,81	25	0,423	0,25	4,01
3,865	9,81	30	0,500	0,25	4,74

Berdasarkan perhitungan momen giroskopik dan momen *self balancing bike* dapat ditentukan kecepatan sudut yang dibutuhkan giroskop untuk menyetimbangkan *self balancing bike* dari sudut – sudut tertentu. Sebagai contoh untuk menyetimbangkan *self balancing bike* dari kemiringan 5° dibutuhkan momen sebesar 0,83 Nm, maka momen giroskopik harus lebih besar yakni dengan kecepatan sudut 2000 rpm yang menghasilkan momen sebesar 0,89 Nm. Sehingga untuk menyetimbangkan *self balancing bike* pada sudut seperti pada tabel 4.3 dibutuhkan kecepatan sudut sebagai berikut.

Tabel 4.4. Kecepatan sudut yang dibutuhkan

Spin (rpm)	Sudut (θ)	Momen Giroskopik (Nm)	Momen Sistem Dua Roda Segaris (Nm)
2000	5	0,89	0,83
4000	10	1,78	1,65
6000	15	2,67	2,45
8000	20	3,56	3,24
10000	25	4,44	4,01
11000	30	4,89	4,74

4.5. Penentuan Spesifikasi Elektronik

Variabel tetap yang tidak dapat divariasikan di antaranya adalah massa, percepatan gravitasi, momen inersia serta presesi giroskop. Sedangkan kecepatan putar giroskop merupakan variabel kontrol yang nilainya divariasikan pada penelitian ini. Motor listrik yang digunakan harus dapat mengakomodir kecepatan putar yang dibutuhkan giroskop untuk menghasilkan momen sampai 4,74 Nm yang mana merupakan nilai momen *self balancing bike* pada kemiringan 30° .

Secara teori, berdasarkan perhitungan pada tabel 4.2, kecepatan putar giroskop yang dibutuhkan adalah sebesar 11000 rpm. Momen tersebut mencukupi untuk melawan momen *self balancing bike* pada sudut 30° dengan catatan *controller* memberikan kecepatan maksimum pada motor DC *brushless*. Motor DC *brushless* yang digunakan harus mampu memutar giroskop seberat 1246 gram dengan momen inersia sebesar $0,00809 \text{ kg.m}^2$. kendala pada penentuan spesifikasi motor DC *brushless* pada penelitian ini adalah tidak terdapat spesifikasi untuk momen di pasaran, sehingga penulis memperkirakan motor DC *brushless* berdasarkan diameter dan daya motor. Motor DC *brushless* yang digunakan memiliki spesifikasi seperti pada tabel 4.5 dan menggunakan *electronic speed controller* dengan spesifikasi seperti pada tabel 4.6.

Tabel 4.5. Spesifikasi motor listrik

Z5 Competition Brushless Motor MOD Edition	
Series	9,5T
Item No.	53648
KV (RPM/V)	3350
Weight (g)	170
Resistance (Ri)(mOhm)	15,3
Peak Watts	298
Max Efficiency	92%
Voltage Input	3,7 V - 7,4V LiPo
Rotor Diameter	12,5 mm

Tabel 4.6. Spesifikasi Electronic Speed Controller

Item No.	45619
Dimension (LxWxH)	34,5 x 33 xx 15,5 mm
Weight	42g
Rated Current	65A
Instantaneous Current	400A
Resistance	0,0006 Ohm
Battery	2S Li - Po, 4-6 NiMH
B.E.C	6V 2A Linear
Motor Limit	6,5T and higher
Fan Interface	Y
Sportman	Y
Battery/Motor Plug	DC3A DB3F
Applicable Models	1:10 & 1:12
	on-road & off-road

Berdasarkan data pada tabel 4.10, dapat disimpulkan bahwa motor listrik memiliki spesifikasi 3350 rpm/V di mana voltase baterai yang digunakan adalah 7,4 V sehingga motor listrik mampu berputar dengan kecepatan maksimum sebesar 24.790 rpm. Daya dari motor DC *brushless* berasal dari baterai dengan spesifikasi voltase 6 V dan kapasitas 4500 mAh untuk menghasilkan putaran yang dapat bertahan lama. Secara ideal daya yang dibutuhkan adalah sebesar 7,4V 25 – 50c dan dapat diakomodir menggunakan baterai *lithium polymer*. Namun karena keterbatasan biaya, baterai *lithium polymer* berkapasitas 1800 mAh hanya bisa bertahan selama beberapa menit saja dan akan sulit untuk dilakukan pengambilan data.

Kendala dari spesifikasi elektronik di sini adalah terkait kecepatan sudut yang dihasilkan. Nilai kecepatan sudut tidak dapat ditampilkan secara *real time* karena pengambilan data kecepatan

sudut menggunakan *tachometer* infra merah. Selain itu *controller* yang digunakan adalah *remote* yang mana juga tidak dapat menentukan kecepatan sudut yang dihasilkan.

4.6. Pengujian Self Balancing Bike

Pengujian *self balancing bike* tanpa kemiringan awal dilakukan dengan memosisikan *self balancing bike* pada kondisi setimbang. Kemudian motor listrik diputar menggunakan *controller* dengan cara menarik *throttle*. Kecepatan sudut pada giroskop dilihat melalui *tachometer* infra merah yang ditembakkan pada bagian giroskop yang telah diberi tanda. Apabila pada kecepatan sudut yang telah ditentukan giroskop tetap terjatuh, maka kecepatan sudut ditambah.

Percobaan ini pada awalnya mengalami kesulitan karena tidak dapat menentukan kecepatan sudut secara *real time*. Selanjutnya giroskop diputar dengan *throttle* maksimum pada *controller* dan hasilnya *self balancing bike* dapat berdiri dengan kecepatan sudut 3000 rpm. Hal ini sangat mengherankan karena seharusnya motor listrik dapat berputar maksimum pada 20.000 rpm lebih. Permasalahan ini dikarenakan torsi dari motor listrik DC *brushless* tidak begitu mumpuni sehingga terjadi reduksi yang sangat tinggi.

Melihat data pada tabel 4.4, kecepatan sudut 3000 rpm hanya dapat menyetimbangkan *self balancing bike* dari kemiringan 5° . Pada saat diberikan eksitasi sedikit, *self balancing bike* masih dapat kembali ke posisi setimbang. Namun begitu eksitasi ditambah hingga lebih dari 5° , *self balancing bike* tidak dapat kembali ke posisi setimbang. Terdapat beberapa permasalahan pada perancangan dan pembuatan *self balancing bike* dan menyebabkan pengujian tidak dapat berjalan dengan baik.

Permasalahan yang pertama adalah konstruksi dari sistem dua roda segaris yang tidak cukup kuat sehingga pada saat giroskop

berada pada kecepatan sudut tinggi, struktur mengalami getaran. Namun jika struktur diperkuat juga akan menambah massa dari *self balancing bike*.

Permasalahan kedua adalah pengunci antara giroskop dan poros. Pengunci antara giroskop dan poros tidak dapat bertahan lama karena perbedaan material antara giroskop dan poros. Sehingga ketika terjadi getaran maka material giroskop yang terbuat dari aluminium akan mengalami tekanan dan menyebabkan pengunci menjadi longgar. Sedangkan material poros yang terbuat dari besi, relatif lebih kuat dibandingkan pengunci maupun giroskop itu sendiri.

Permasalahan ketiga adalah panjang poros giroskop. Panjang poros giroskop menyebabkan terjadinya getaran meskipun giroskop sudah seimbang. Hal ini dikarenakan diameter poros terlalu kecil sehingga tidak mampu meredam getaran dari giroskop dengan massa lebih dari 1 kg pada kecepatan sudut tinggi. Poros yang panjang dan diameter yang kecil menyebabkan ketidakstabilan pada *self balancing bike*.

Permasalahan keempat adalah ketidakseimbangan beban antara bagian atas dan bagian bawah pelat penyangga. Giroskop pada bagian bawah pelat penyangga memiliki massa lebih dari 1,2 kg termasuk poros serta *pulley*. Sedangkan bagian atas pelat hanya terdapat motor listrik dengan massa 170 g dan *electronic speed controller* dengan massa 42 g. Hal ini menyebabkan presesi pada giroskop terhambat sehingga hanya mampu melakukan presesi sekitar 5 rpm. Padahal presesi merupakan faktor utama yang membuat *self balancing bike* kembali ke posisi setimbang dari kemiringan tertentu.

“Halaman ini memang dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian di atas, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Rancangan *self balancing bike* menggunakan giroskop tunggal dengan orientasi horizontal yang diperoleh memiliki massa total sebesar 3,865 kg. Giroskop sendiri memiliki massa sebesar 1,246 kg dengan jari – jari sebesar 20 cm dan inersia sebesar 0,00809 kgm². Sistem *self balancing bike* menggunakan motor listrik dengan spesifikasi kecepatan sudut sebesar 24.790 dengan voltase 7,4 V (3350 rpm/V) dan *electronic speed controller* dengan spesifikasi 65 A. Kecepatan sudut motor listrik pada kondisi terbebani giroskop hanya mampu berputar dengan kecepatan sudut sebesar 3000 rpm. Pada *self balancing bike* ini, kecepatan sudut dari presesi dibiarkan natural sedangkan kecepatan sudut putar diatur menggunakan motor listrik.
2. Sistem dua roda segaris dibuat dengan menggunakan besi siku berlubang dan roda bantu sepeda anak – anak. Proses permesinan giroskop menggunakan mesin CNC dengan ketelitian tinggi untuk menghasilkan giroskop yang seimbang. Poros giroskop menggunakan besi berdiameter 8 mm. Rangka giroskop menggunakan besi berlubang dan terdapat pelat aluminium sebagai penyangga giroskop.
3. *Self balancing bike* dapat stabil pada posisi setimbang dengan kecepatan sudut 3000 rpm, namun tidak dapat dikenai eksitasi berlebih.

5.2. Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan:

1. Perancangan *self balancing bike* seimbang antara bagian atas dan bagian bawah pelat penyangga sehingga presesi tidak terhambat.
2. Giroskop dan poros menggunakan material yang sama sehingga pengunci antara giroskop dan poros tidak mudah koyak akibat getaran pada saat berputar pada kecepatan sudut tinggi.
3. Poros pada giroskop lebih besar sehingga mampu meredam getaran pada saat giroskop berputar pada kecepatan sudut tinggi.
4. Motor listrik yang digunakan memiliki torsi yang kuat sehingga tidak banyak terpengaruh oleh beban dari giroskop serta mampu merespons perubahan kecepatan sudut yang dibutuhkan.
5. Diperlukan penyeimbangan antara bagian kanan dan kiri *self balancing bike* sehingga tidak mempengaruhi momen giroskopik.

DAFTAR PUSTAKA

Chi, C.H. dan Chou, J.J. 2015 "*Riderless bicycle with gyroscopic balancer controlled by FSMC and AFSMC*," 7th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), Brno, 2015, pp. 150-157.

Ha, M.S. dan Jung, S. 2015 "*Balancing control application using gyroscopic effect to a hand-carried one-wheel cart*," IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Busan, 2015, pp. 1778-1782.

Hibbeler, R.C. 2010. "*Engineering Mechanics Dynamics*," 12th Edition, Upper Saddle River, New Jersey, United States.

Hikmawan, M.W. 2017. "Perancangan Tempat Duduk untuk Sepeda *Pasca Stroke*." Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Nafi', M.Y. 2017. "Rancang Bangun *Self – Balancing* pada *Inverted Pendulum* menggunakan *Control Moment Gyroscope* dan Sistem Kendali PID." Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Par'iy, M. 2017. "Analisa Kestabilan Model Sepeda Roda Dua Akibat Gerak *Gyroscope* dengan Variasi Kecepatan Putar *Flywheel* ketika Dikenai Simpangan". Surabaya. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Spry, S. C. Girard, A. R.. 2008. "*Gyroscopic Stabilization of Unstable Vehicles : Configurations, Dynamics, and Control*,".

web.mit.edu/8.01t/www/materials/modules/chapter22.pdf

“Halaman ini memang dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Nama penulis Yunico Rixy Setyawan dilahirkan di Blitar, tanggal 14 Juni 1995 dari bapak yang bernama Muji Slamet dan ibu bernama Eny Sujiati. Saat ini penulis tinggal di Jalan Turi Gang 2 No.4, Kelurahan Turi, Kecamatan Sukorejo, Kota Blitar, Provinsi Jawa Timur. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN Sukorejo 1 Blitar pada tahun 2007, pendidikan di SMPN 1 Blitar pada tahun 2010, pendidikan di SMAN 1 Blitar pada tahun 2013 dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang.

Pada bulan Juli 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Rancang Bangun *Self Balancing Bike* menggunakan Giroskop Tunggal dengan Orientasi Horizontal**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi penulis melalui *email* : yunicorixys@gmail.com