



**TUGAS AKHIR - TF181801**

**RANCANG BANGUN DAN EKSPERIMEN *JOINT IMPEDANCE CONTROL* BERBASIS TORSI  
DENGAN KOMPENSASI FRIKSI DAN GRAVITASI  
PADA AKTUATOR SERVO MOTOR UNTUK  
*BIOINSPIRED ROBOT***

Edo Kesuma Putra  
NRP. 0231154000013

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc  
NIP. 19620822 198803 1 001

Murry Raditya, ST, MT.  
NIP. 1988201711055

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK FISIKA  
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2020



TUGAS AKHIR - TF181801

**RANCANG BANGUN DAN EKSPERIMEN  
*JOINT IMPEDANCE CONTROL* BERBASIS  
TORSI DENGAN KOMPENSASI FRIKSI DAN  
GRAVITASI PADA AKTUATOR SERVO  
MOTOR UNTUK *BIOINSPIRED ROBOT***

Edo Kesuma Putra  
NRP. 02311540000013

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc  
NIP. 19620822 198803 1 001

Murry Raditya, ST, MT.  
NIP. 1988201711055

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK FISIKA  
DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2020





**FINAL PROJECT - TF181801**

***DESIGN AND EXPERIMENT OF TORQUE-  
BASED JOINT-IMPEDANCE CONTROL WITH  
FRICTION AND GRAVITY COMPENSATION  
ON SERVO MOTOR ACTUATOR FOR  
BIOINSPIRED ROBOT***

Edo Kesuma Putra  
NRP. 0231154000013

*Advisor Lecturer*  
Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc  
NIP. 19620822 198803 1 001

Murry Raditya, ST, MT.  
NIP. 1988201711055

STUDY PROGRAM OF BACHELOR OF ENGINEERING PHYSICS  
DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY AND SYSTEMS  
ENGINEERING  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA 2020



## PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Edo Kesuma Putra  
NRP : 0231154000013  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Rancang Bangun Dan Eksperimen *Joint Impedance Control* Berbasis Torsi Dengan Kompensasi Friksi Dan Gravitasi Pada Aktuator Servo Motor Untuk *Bioinspired Robot*” adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 20 Januari 2020  
Yang membuat  
pernyataan,



Edo Kesuma Putra  
NRP. 0231154000013



# LEMBAR PENGESAHAN I

## RANCANG BANGUN DAN EKSPERIMEN *JOINT IMPEDANCE CONTROL* BERBASIS TORSI DENGAN KOMPENSASI FRIKSI DAN GRAVITASI PADA AKTUATOR SERVO MOTOR UNTUK *BIOINSPIRED ROBOT*

TUGAS AKHIR

Oleh

Edo Kesuma Putra  
NRP. 0231154000013

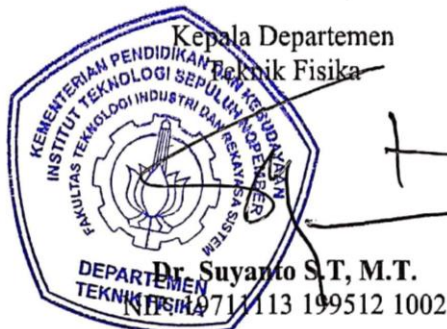
Surabaya, 20 Januari 2020  
Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

**Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc**  
NIP. 19620822 198803 1 001

**Murry Raditya, S.T, M.T**  
NIP. 1988201711055







## LEMBAR PENGESAHAN II

# RANCANG BANGUN DAN EKSPERIMEN *JOINT IMPEDANCE CONTROL* BERBASIS TORSI DENGAN KOMPENSASI FRIKSI DAN GRAVITASI PADA AKTUATOR SERVO MOTOR UNTUK *BIOINSPIRED ROBOT*

### TUGAS AKHIR






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

Oleh:

**EDO KESUMA PUTRA**

NRP. 0231154000013

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito M.Sc.  (Pembimbing I)
2. Murry Raditya, S.T, M.T.  (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Ronny Dwi Noriyati M.Kes.  (Penguji I)
4. Dr. Suyanto S.T, M.T.  (Penguji II)
5. Iwan Cony Setiadi S.T, M.T.  (Penguji III)

**SURABAYA  
JANUARI 2020**



# **RANCANG BANGUN DAN EKSPERIMEN *JOINT-IMPEDANCE CONTROL* BERBASIS TORSI DENGAN KOMPENSASI FRIKSI DAN GRAVITASI PADA AKTUATOR SERVO MOTOR UNTUK *BIOINSPIRED ROBOT***

**Nama Mahasiswa** : Edo Kesuma Putra  
**NRP** : 0231154000013  
**Program Studi** : S1 Teknik Fisika  
**Departemen** : Teknik Fisika  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  
Murry Raditya S.T, M.T.

## **Abstrak**

Salah satu permasalahan utama yang dihadapi oleh robot pada lingkungan yang tidak terstruktur adalah kontak yang tidak terduga yang dapat menyebabkan kerusakan pada robot atau menciderai manusia. Perlu adanya skema *compliant control* pada robot agar terjadi interaksi yang aman dan andal antara robot dengan manusia dan lingkungan. Dalam penelitian tugas akhir ini dilakukan rancang bangun joint impedance control berbasis torsi dan kompensator friksi dan gravitasi untuk meminimalisir disturbansi oleh friksi dan gravitasi. Algoritma ini diterapkan pada sebuah set eksperimen lengan robot dengan satu aktuator dan 1 DoF. Dalam penelitian dilakukan pemodelan sistem dengan model *inverse dynamics*. Eksperimen dilakukan untuk mengidentifikasi parameter fisis dari sistem yaitu parameter momen inersia, friksi, dan gravitasi. Melalui eksperimen dan pemodlan diperoleh model friksi dengan fitness 72.03% dan model gravitasi dengan *fitness* 95.14%. Pengujian *impedance control* menunjukkan performa yang *compliance* dan respon yang sesuai karakteristik massa-pegar-*damper* yang diinginkan.

**Kata kunci:** *impedance control*, kompensasi friksi, kompensasi gravitasi, servo motor



***DESIGN AND EXPERIMENT OF TORQUE-BASED  
JOINT-IMPEDANCE CONTROL WITH FRICTION  
AND GRAVITY COMPENSATION ON SERVO MOTOR  
ACTUATOR FOR BIOINSPIRED ROBOT***

***Student Name*** : Edo Kesuma Putra  
***NRP*** : 02311540000013  
***Study Program*** : S1 Teknik Fisika  
***Department*** : Teknik Fisika  
***Advisor Lecturer*** : Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc.  
Murry Raditya S.T, M.T.

***Abstract***

*One of the main concern of robot that operates in unstructured environment is unpredicted contact that could result in damage or injury to personnel, environment, and the robot itself. Compliant control scheme needed so robot can interacts with human and its environment safely and reliably. In this final project, a study conducted to designing and experimenting on torque based joint impedance control with friction and gravity compensation. This algorithm applied on an experiment set consisted of 1 DoF robot arm with one actuator. In this study, the system modeled using inverse dynamics model. Experiments conducted to identify physical parameters which are: moment of inertia, friction and gravity. From the experiment, models obtained for friction with fitness of 72.03% and for gravity with fitness of 95.14%. Impedance control test shown compliant performance that results in response according to its desired virtual mass-spring-damper system that could interact safely and realiably with human and its environment.*

***Keywords:*** *impedance control, friction compensation, gravity compensation, servo motor*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT penulis panjatkan karena atas rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul: “**RANCANG BANGUN DAN EKSPERIMEN *JOINT-IMPEDANCE CONTROL* BERBASIS TORSI DENGAN KOMPENSASI FRIKSI DAN GRAVITASI PADA AKTUATOR SERVO MOTOR UNTUK *BIOINSPIRED ROBOT*”**. Penelitian dan laporan ini dapat terselesaikan dengan dukungan dan peran serta dari berbagai pihak. Untuk itulah dalam kesempatan kali ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Suyanto ST., MT. selaku Kepala Departemen Teknik Fisika FTI – ITS.
2. Bapak Ir. Zulkifli M.Sc selaku Dosen Wali penulis yang telah memberikan nasehat dan bimbingan akademis selama penulis melaksanakan studinya di Teknik Fisika FTI – ITS.
3. Bapak Dr. Ir. Purwadi Agus Darwito, M.Sc. dan Bapak Murry Raditya, ST. MT. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah membimbing, dan memberikan banyak arahan, saran dan juga ilmu serta motivasi kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
4. Bapak dan Ibu Dosen, Tenaga Pendidik dan Seluruh Staf Departemen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama perkuliahan.
5. Keluarga penulis yaitu Ibu, Bapak, dan Saudari penulis yang selalu mendukung dan memberikan semangat dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman UKM Robotika dan Tim Robot ITS khususnya Tim ABU ROBOCON ITS yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis selama pengerjaan Tugas Akhir ini.
7. Teman-teman S1 Teknik Fisika FTI – ITS tahun angkatan 2015 yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.





8. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu

Penulis menyadari bahwa laporan ini masih kurang sempurna. Oleh karena itu, penulis menerima segala masukan berupa saran, kritik, dan segala bentuk teguran demi kesempurnaan laporan ini.

Demikian laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan dengan harapan dapat bermanfaat dalam akademik baik bagi penulis maupun bagi pembaca.

Surabaya, 6 Januari 2020

Penulis



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME .....</b>	<b>v</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN I .....</b>	<b>vii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN II .....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstrak.....</b>	<b>xi</b>
<b><i>Abstract</i> .....</b>	<b>xiii</b>
<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xix</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>xxix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Batasan Masalah .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1 Servomotor .....	5
2.1.1. Motor, Encoder, dan Kontroler.....	6
2.1.2. Sumber Torsi Ideal .....	7
2.2 Model Benda Tegar .....	8
2.2.1. <i>Degree of Freedom (DoF)</i> dari Benda Tegar ....	10
2.3 Model Friksi .....	11
2.4 Kompensasi Gravitasi.....	15
2.5 Impedance Control .....	15
2.6 Development Board STM32f407-Discovery.....	18
<b>BAB III METODOLOGI .....</b>	<b>21</b>
3.1 Studi Literatur.....	21
3.2 Pembuatan Set Eksperimen .....	22
3.2.1. Komponen Mekanik .....	24
3.2.2. Komponen Elektrik.....	28



3.2.3.	Mikrokontroler.....	37
3.3	Identifikasi Parameter.....	40
3.3.1.	Identifikasi Parameter Friksi.....	40
3.3.2.	Identifikasi Torsi Gravitasi.....	41
3.4	Perancangan dan Implementasi Algoritma <i>Impedance Control</i> .....	41
3.5	Pengujian dan Pengambilan Data.....	44
<b>BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>47</b>
4.1	Analisa Data.....	47
4.1.1.	Eksperimen Identifikasi Parameter Friksi.....	47
6.1.1.	Eksperimen Identifikasi Parameter Gravitasi.....	51
6.1.2.	Perancangan Algoritma <i>Impedance Control</i> .....	52
6.1.3.	Eksperimen Pengujian Performa Kompensator Friksi dan gravitasi.....	52
6.1.4.	Eksperimen Pengujian Performa <i>Joint-Impedance Control</i> dengan kompensasi friksi dan gravitasi.....	55
6.1.5.	Eksperimen Interaksi Aktuator dengan Manusia .....	57
6.1.6.	Eksperimen Interaksi Aktuator dengan Lingkungan yang tidak dikenal.....	57
6.1.7.	Evaluasi Model Matematis dengan Komparasi Simulasi dan Eksperimen.....	58
6.2	Pembahasan.....	61
<b>BAB V PENUTUP.....</b>		<b>67</b>
7.1	Kesimpulan.....	67
7.2	Saran.....	67
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>69</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>		<b>85</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	<i>Degree of freedom (DOF)</i> dari benda tegar pada sebuah bidang (a) dan pada sebuah ruang (b) [35]. .....	10
<b>Gambar 2.2</b>	<i>Revolute pair</i> (a) dan <i>prismatic pair</i> (b) [35]. ...	11
<b>Gambar 2.3</b>	Beragam model friksi statis [37].....	13
<b>Gambar 2.4</b>	Kurva Stribeck [37]. .....	14
<b>Gambar 2.5</b>	Dinamika sistem ketika mengalami kontak dengan lingkungan. Posisi $\theta_e$ mewakili posisi dari lingkungan, dan posisi $\theta_a$ mewakili posisi trayektori yang menjadi referensi dan berada di bagian dalam lingkungan kontak agar kontak antara robot dengan lingkungan kontak selalu terjaga. <i>Error</i> posisi adalah selisih antara posisi sesungguhnya ( $\theta$ ) dan referensi ( $\theta_d$ ).....	16
<b>Gambar 2.6</b>	Arsitektur <i>joint impedance control</i> berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi [19]. ....	17
<b>Gambar 2.7</b>	STM32F4DISCOVERY [42] .....	18
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir kegiatan penelitian tugas akhir. ....	22
<b>Gambar 3.2</b>	Set eksperimen <i>joint impedance control</i> berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi. ....	23
<b>Gambar 3.3</b>	Arsitektur sistem dari set eksperimen.....	24
<b>Gambar 3.4</b>	Rancangan komponen mekanik dari set eksperimen yang dibuat pada program komputer Autodesk AutoCAD. ....	25
<b>Gambar 3.5</b>	Proses permesinan komponen lengan pada fabrikasi komponen mekanik.....	26
<b>Gambar 3.6</b>	Komponen mekanik set eksperimen.....	27
<b>Gambar 3.7</b>	Mitsubishi MR-J2S-20A.....	28
<b>Gambar 3.8</b>	DC Power Supply 24V .....	29
<b>Gambar 3.9</b>	Power Line Filter .....	30
<b>Gambar 3.10</b>	Residual Current Circuit Breaker. ....	31
<b>Gambar 3.11</b>	Miniature Circuit Breaker.....	32
<b>Gambar 3.12</b>	Relay dan Kontaktor.....	32
<b>Gambar 3.13</b>	Rangkaian disribusi daya.....	33
<b>Gambar 3.14</b>	Rangkaian saklar dan distribusi daya 24VDC. ...	34





<b>Gambar 3.15</b>	Rangkaian <i>input/output</i> [43].	35
<b>Gambar 3.16</b>	Komponen elektrik dari set eksperimen.	36
<b>Gambar 3.17</b>	Skematik rangkaian PC817.	38
<b>Gambar 3.18</b>	Skematik rangkaian 6N137.	38
<b>Gambar 3.19</b>	Skematik rangkaian MCP4725.	39
<b>Gambar 3.20</b>	Desain papan PCB.	39
<b>Gambar 3.21</b>	Rangkaian antarmuka mikrokontroler- <i>servo amplifier</i> .	40
<b>Gambar 3.22</b>	Arsitektur algoritma <i>joint-impedance control</i> berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi.	43
<b>Gambar 4.1</b>	Data eksperimen <i>velocity dependant friction</i> .	47
<b>Gambar 4.2</b>	Perbandingan antar model yang diuji.	49
<b>Gambar 4.3</b>	Perbandingan model prediksi dan data eksperimen.	51
<b>Gambar 4.4</b>	Respon sistem ketika bergerak bebas tanpa kontrol dan kompensator.	53
<b>Gambar 4.5</b>	Respon sistem dengan kompensator friksi saja.	54
<b>Gambar 4.6</b>	Respon sistem dengan kompensator gravitasi saja.	54
<b>Gambar 4.7</b>	Respon aktuator pada percobaan 1. $K_d = 1$ , $D_d = 0$ .	55
<b>Gambar 4.8</b>	Respon aktuator pada percobaan 2. $K_d = 1$ , $D_d = 0.05$ .	56
<b>Gambar 4.9</b>	Respon aktuator pada percobaan 3. $K_d = 1$ , $D_d = 0.1$ .	56
<b>Gambar 4.10</b>	Respon aktuator ketika melakukan interaksi dengan manusia. Bagian pada grafik yang menyimpang dari set-point menunjukkan ketika manusia melakukan interaksi dengan aktuator.	57
<b>Gambar 4.11</b>	Respon aktuator ketika mengalami benturan yang tidak terduga. Spike pada grafik menunjukkan ketika aktuator mengalami benturan.	58
<b>Gambar 4.12</b>	Parmeter dimensi lengan yang digunakan dalam perhitungan momen inersia.	59



**Gambar 4.13** Perbandingan simulasi model matematis dan data eksperimen.....61



## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b>	Parameter fisis untuk perhitungan momen inersia..	42
<b>Tabel 4.1</b>	Perbandingan antar model yang diuji. ....	49
<b>Tabel 4.2</b>	Parameter yang diperoleh melalui <i>curve fitting</i> . ....	50
<b>Tabel 4.3</b>	Hasil eksperimen torsi gravitasi.....	51
<b>Tabel 4.4</b>	Input impedance control pada eksperimen uji performa.....	55
<b>Tabel 4.5</b>	Parameter momen inersia.....	59
<b>Tabel 4.6</b>	Koefisien polinomial fungsi trayektori. ....	61



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Impedance control* memainkan peran yang penting pada ruang kerja yang melibatkan interaksi manusia dengan robot. Prinsip dibaliknya adalah untuk mengontrol impedansi mekanik dari robot dan mengatur gaya interaksi yang terjadi antara robot dan lingkungan dinamisnya. *Impedance control* terinspirasi dari perlakuan manusia ketika melakukan kontak dengan lingkungan yang berbeda. Manusia memiliki kemampuan adaptasi yang tinggi untuk dapat mengubah impedansi otot ketika melakukan kontak dengan lingkungan yang tidak dikenal [1]. *Active impedance control* diajukan oleh Hogan [2][3] yang terinspirasi dari biomekanik gerakan manusia pada ruang bebas dan ruang terbatas dan terdiri atas dua model *impedance control* yaitu *impedance control* berbasis gaya atau torsi, dan *impedance control* berbasis posisi. Bonitz dan Hsia [4] memperkenalkan skema *Internal Force-based Impedance Control* pada robot manipulator yang saling bekerja sama dalam memanipulasi objek, skema ini mengontrol pergerakan dan gaya internal dari objek yang dimanipulasi. Skema *hybrid impedance control* diajukan oleh Anderson dan Spong [5] dengan menggabungkan konsep kontrol gaya/posisi *hybrid* dan *impedance control*. Gonzalez dan Widmann [6] menginvestigasi *hybrid impedance control* yang menggunakan target gaya sebagai variabel perintah. Liu dan Goldenberg [7] mengajukan versi *robust control* dari skema *hybrid impedance control*. Zhu et al [8] mengembangkan skema *hybrid control* berbasis *virtual-decomposition* untuk memperoleh perilaku *impedance control* pada robot industri dengan 6 *joint*. Para peneliti umumnya menerapkan skema *impedance control* pada robot manipulator, contohnya, DLR [9], robot hidrolis Unimate MKII-2000 [10], dan lain-lain, ada pula yang diterapkan pada robot humanoid, contohnya, Atlas [11], Armar-III [12], dan lain-lain.

Interaksi fisik antar robot dan manusia merupakan salah satu topik penelitian di bidang robotika yang paling memotivasi,



menantang, dan ambisius [13]. Robot telah digunakan pada aplikasi yang luas di antaranya: otomasi industri, biomedis dan layanan kesehatan, hingga layanan domestik dan hiburan. Di masa mendatang, akan banyak bermunculan aplikasi dari robotika, seperti pelayanan [14], perawatan dan pendampingan [15], rehabilitasi [16], maupun pada konteks pekerjaan yang lebih tradisional [17], yang pastinya mengharuskan robot untuk berada dekat atau melakukan kontak langsung dengan manusia. Jika di masa lampau robot difokuskan untuk aplikasi yang bersifat kaku, memiliki akurasi tinggi, dan dapat melakukan gerakan cepat, dan untuk dapat mengeksekusi pekerjaan dengan karakteristik tersebut, robot harus beroperasi dalam lingkungan yang statis, terstruktur, dan dirancang khusus, kini, robot dituntut untuk dapat melakukan interaksi dinamis dengan lingkungannya agar dapat melakukan pekerjaan di lingkungan yang tidak pasti yang dapat mengalami perubahan-perubahan secara cepat dan tidak terduga, termasuk pula keharusan untuk berada di dekat manusia ataupun melakukan kontak langsung dengan manusia. Tuntutan ini membuat para peneliti mulai lebih menekankan aspek keselamatan dan keandalan [13].

Aktuator umum digunakan sebagai penggerak utama pada robot. Oleh sebab itu, kontrol aktuator robot menjadi salah satu permasalahan penting. Untuk dapat menangani reaksi terhadap tabrakan, perlu adanya kontrol gaya interaksi (*interaction force*) di samping dari kontrol pergerakan (*motion*) pada aktuator robot. Salah satu metode untuk mengontrol gaya interaksi adalah *hybrid position/force control* yang diusulkan oleh Raibert dan Craig [18]. Namun, pendekatan yang lebih umum dan lebih sukses diterapkan adalah *impedance control* yang diperkenalkan oleh Hogan [2]. Dibandingkan strategi *hybrid position/force control*, *impedance control* memiliki kestabilan dan *robustness* yang lebih baik, dan keunggulan yang paling menarik dari *impedance control* adalah kemampuannya untuk mengeksekusi kontrol posisi *closed loop* pada ruang bebas maupun lingkungan inersial [19]. Meskipun secara inheren skema *impedance control* memiliki sifat *robust* terhadap ketidakpastian dan error dari pemodelan lingkungan [20],

skema *impedance control* akan selalu mengalami gangguan non-linear yang disebabkan oleh disturbansi fisik, seperti gravitasi, gaya coriolis, dan gaya friksi [21].

*Compliant control* menjadi inti dari robot yang diinginkan untuk dapat bertindak secara aman ketika berinteraksi dengan lingkungan yang tidak terstruktur dan juga tidak dikenali secara menyeluruh. Salah satu permasalahan utama yang dihadapi oleh robot pada lingkungan yang tidak dikenali adalah tabrakan yang tidak terduga yang dapat mengakibatkan kerusakan pada robot, lingkungan, atau objek yang sedang ditangani oleh robot. Solusi dari permasalahan ini adalah perilaku dari robot yang dapat menyesuaikan diri terhadap lingkungannya agar dapat menangani kontak dengan lingkungan yang memiliki potensi bahaya secara aman dan *robust* dengan menerapkan skema *impedance control*. Untuk memperoleh performa kontrol posisi dan impedansi mekanik yang baik, kompensator gravitasi menjadi kebutuhan yang sangat diperlukan. Selain kompensator gravitasi, diperlukan pula metode untuk memberikan kompensasi torsi tambahan untuk mengompensasi defisiensi yang disebabkan oleh transmisi dari aktuator yang menggunakan *gearbox*.

Berdasarkan latar belakang tersebut, dalam penelitian tugas akhir ini dilakukan perancangan algoritma *impedance control* dengan skema *joint-impedance control* berbasis torsi sebagaimana yang dibahas oleh Hayder [1] dan Liu [19]. Untuk menangani disturbansi yang disebabkan oleh efek non-linear dari friksi dan gravitasi, dilakukan pemodelan serta identifikasi parameter fisis untuk menghasilkan kompensator friksi dan gravitasi dengan mengacu pada metode-metode yang pernah diterapkan dalam penelitian terdahulu [11], [19], [23].

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan, maka rumusan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah:

- a. Bagaimana cara memperoleh interaksi yang aman dan andal antara robot dengan manusia dan lingkungan?

- b. Bagaimana cara mengurangi efek negatif yang disebabkan oleh friksi dari transmisi *gearbox* pada servomotor terhadap kontrol aktuator robot?
- c. Bagaimana cara mengeliminasi efek dari gravitasi terhadap kontrol pergerakan aktuator robot?

### 1.3 Tujuan

Tujuan utama dari rancang bangun dan eksperimen ini adalah untuk memberikan solusi pada rumusan masalah yaitu:

- a. Merancang dan menerapkan sistem kontrol *compliant* pada robot dengan skema *impedance control* berbasis torsi untuk memperoleh interaksi yang aman dan andal antara robot dengan manusia dan lingkungan .
- b. Memodelkan dan mengidentifikasi parameter friksi pada sistem dan menerapkan kompensator friksi pada *impedance control* untuk mengurangi efek negatif friksi terhadap kontrol aktuator robot.
- c. Merancang dan menerapkan kompensator gravitasi dengan menghitung secara akurat nilai torsi dari komponen gravitasi untuk mengeliminasi efek dari gravitasi terhadap kontrol pergerakan aktuator robot.

### 1.4 Batasan Masalah

Perlu adanya beberapa batasan masalah yang ditentukan agar pembahasan tidak meluas dan menyimpang dari tujuan penelitian tugas akhir ini. Adapun batasan masalah dari penelitian tugas akhir yang dikerjakan ini adalah sebagai berikut:

- a. Skema *impedance control* yang digunakan adalah *joint-impedance control* berbasis torsi.
- b. Aktuator yang digunakan diperlakukan sebagai sumber torsi ideal sehingga *loop* kontrol torsi yang berada di dalam *servo amplifier* tidak dibahas dalam penelitian.
- c. Parameter friksi dari sistem diasumsikan bernilai konstan.
- d. Disturbansi fisik selain friksi dan gravitasi yang beraksi pada sistem diabaikan.
- e. Sistem diasumsikan sebagai benda tegar.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Servomotor**

Servomotor adalah sejenis aktuator yang memungkinkan kontrol presisi atas posisi, kecepatan, dan akselerasi sudut atau linear. Servomotor terdiri atas motor listrik yang dipasang sensor untuk mendapatkan *feedback* posisi. Servomotor membutuhkan kontroler yang berupa modul khusus canggih yang dirancang secara spesifik untuk digunakan hanya pada servomotor yang sesuai. Servomotor bukanlah jenis dari motor, melainkan merupakan istilah yang kerap digunakan untuk merujuk motor yang digunakan pada sistem kontrol *closed-loop*. Aplikasi dari servomotor meliputi robotika, mesin CNC, dan otomasi manufaktur.

Servomotor menggunakan kontrol *closed-loop servomechanism* dengan *feedback* posisi untuk mengontrol pergerakan dan posisi akhirnya. Masukan dari kontrol adalah sinyal yang mewakili perintah posisi dari *shaft* motor. Motor dipasangkan semacam *encoder* untuk memberikan *feedback* posisi dan kecepatan. Pada skema yang paling sederhana, hanya posisi yang diukur. Nilai posisi yang terukur kemudian dibandingkan dengan nilai perintah posisi yang berasal dari kontroler eksternal. Jika keluaran posisi berbeda dari yang dibutuhkan, maka sinyal error akan dihasilkan yang akan menyebabkan motor berputar sebanyak yang dibutuhkan agar *shaft* mencapai posisi yang sesuai. Seiring tercapainya posisi, sinyal error akan berkurang hingga mencapai nol dan motor akan berhenti.

Servo yang lebih canggih menggunakan *rotary encoder* optik untuk mengukur posisi dan kecepatan *shaft* motor [24] dan *variable-speed drive* digunakan untuk mengontrol kecepatan motor [25]. Ketika dikombinasikan dengan algoritma kontrol PID, memungkinkan servomotor untuk dapat mencapai posisi sesuai yang diperintahkan dengan cepat dan lebih presisi, dengan *overshoot* yang lebih kecil.

Servomotor umumnya digunakan sebagai alternatif dengan performa tinggi dari *stepper* motor. *Stepper* motor memiliki kemampuan bawaan untuk mengontrol posisi, karena memiliki keluaran step. Hal itu menjadikan *stepper* motor dapat menggunakan kontrol posisi *open-loop*, tanpa membutuhkan *feedback encoder*, karena sinyal yang digunakan untuk menggerakannya menentukan berapa banyak step dari pergerakan putarnya. Tidak adanya *feedback* pada motor *stepper* membatasi performanya, karena *stepper* motor hanya dapat menggerakkan beban yang berada dalam kapasitasnya, jika tidak maka akan ada step yang terlewat ketika *stepper* motor berada di bawah beban yang besar yang dapat menyebabkan terjadinya *error* pemosisian dan sistem harus dinyalakan ulang atau dikalibrasi ulang. *Encoder* dan kontroler pada servomotor menambah biaya, namun dapat mengoptimasi performa dari keseluruhan sistem (kecepatan, daya, dan akurasi) dibanding hanya motor biasa. Pada sistem yang besar, yang mana motor menjadi komponen dengan proporsi biaya yang besar, servomotor memiliki keunggulan.

### **2.1.1. Motor, Encoder, dan Kontroler**

Servomotor modern menggunakan *rotary encoder*, absolut maupun yang inkremental. Encoder absolut dapat menentukan posisi ketika daya baru dinyalakan, namun lebih rumit dan mahal. Encoder inkremental lebih sederhana, murah, dan bekerja lebih cepat. Sistem inkremental sering menggabungkan kemampuannya untuk mengukur interval rotasi dengan sensor posisi-nol untuk menentukan posisi saat sistem pertama dinyalakan.

Jenis motor yang digunakan bukan sesuatu yang kritis pada servomotor dan beragam jenis digunakan. Yang paling sederhana menggunakan motor DC magnet permanen, karena kesederhanaannya dan biayanya yang murah. Servomotor industri kecil umumnya menggunakan motor *brushless*. Untuk aplikasi industri yang besar, motor induksi AC kerap digunakan. Untuk performa terbaik dengan ukuran yang kecil, digunakan motor AC *brushless* dengan medan magnet permanen.

Modul penggerak servomotor merupakan komponen standar industri. Perancangannya merupakan turunan dari elektronika daya, umumnya berbasis MOSFET tiga fasa atau H-Bridge IGBT. Modul standar ini menerima masukan sebuah direksi tunggal dan jumlah pulsa (jarak rotasi). Kontroler juga dapat memiliki fitur pengawasan temperatur berlebih, torsi berlebih, dan deteksi *stall*. Karena tipe *encoder*, rasio gir, dan dinamika sistem secara keseluruhan merupakan spesifik terhadap suatu aplikasi, sangat sulit untuk memproduksi kontroler yang dapat bersifat universal. Oleh sebab itu, sebagian besar servomotor dirancang untuk bekerja sepaket dengan modul kontroler dari pabrikan yang sama.

### 2.1.2. Sumber Torsi Ideal

Sumber torsi ideal adalah suatu sistem yang mewakili sumber energi mekanik yang menghasilkan torsi yang proporsional dengan besarnya nilai *input*. Sumber ini dikatakan ideal karena diasumsikan cukup kuat untuk menjaga nilai torsi tertentu terlepas dari kecepatan sudut pada terminal sumber. Servomotor yang diperlakukan sebagai sumber torsi ideal menerima sinyal analog yang menjadi *input* bagi *servo amplifier* pada mode kontrol torsi. Dengan *internal torque control loop* pada *servo amplifier*, servo dapat menghasilkan torsi yang besarnya proporsional dengan sinyal *input* dengan nilai *input* maksimal akan menghasilkan torsi sebesar *rating* torsi dari motor servo. Torsi yang dihasilkan oleh sumber torsi ideal dapat dinyatakan sebagai persamaan berikut:

$$\tau_o = v_i \cdot \frac{\tau_r}{v_{max}} \quad (2.1)$$

Dengan:

$\tau_o$  = keluaran torsi (Nm).

$v_i$  = masukan sinyal tegangan (V).

$\tau_r$  = rated torque (Nm).

$v_{max}$  = sinyal tegangan maksimal (V).

## 2.2 Model Benda Tegar

Benda tegar adalah benda padat dengan deformasi sebesar nol atau sangat kecil hingga dapat diabaikan. Jarak antara dua titik mana pun pada benda tegar bernilai konstan dan tidak dipengaruhi oleh gaya eksternal yang diberikan pada benda tersebut. Benda tegar dianggap sebagai distribusi massa yang kontinyu.

Secara umum, ketika benda tegar bergerak, baik posisi maupun orientasinya berubah terhadap waktu. Dalam artian kinematika, perubahan ini disebut sebagai translasi dan rotasi. Sehingga, besaran kinetik, dan kenematik dari benda tegar seperti posisi, kecepatan, percepatan, momentum, impuls, dan energi kinetik terdiri atas dua komponen yaitu linear dan sudut [26]. Terdapat beberapa cara untuk mendeskripsikan secara numerik orientasi dari benda tegar, di antaranya adalah himpunan tiga sudut Euler, quaternion, atau arah matriks cosinus. Semua metode ini pada dasarnya mendefinisikan orientasi dari sistem koordinat [26].

Kelajuan sudut merupakan nilai vektor yang mendeskripsikan kecepatan sudut pada saat terjadinya perubahan orientasi dari benda tegar dan poros di mana ia berotasi pada saat itu. Setiap titik pada benda tegar mengalami kelajuan sudut yang sama pada setiap saat. Ketika terjadi gerakan rotasi murni, seluruh titik pada benda kecuali yang terdapat pada poros rotasi akan mengalami perubahan posisi.

Proses untuk menurunkan model dinamis melibatkan analisa matematis dan bergantung pada sejumlah hukum dan asas dari mekanika klasik. Terdapat dua pendekatan yang umum dilakukan untuk tujuan ini. Yang pertama adalah pendekatan berbasis energi yang dikenal sebagai formulasi Euler-Lagrange, yang diturunkan dari asas kerja virtual. Formulasi ini memiliki sifat yang menarik untuk analisa sistem kontrol *feedback*, seperti simetri miring dan batas eksplisit pada matriks inersia dan juga kelinearan pada parameter inersia. Metode ini cocok untuk mengembangkan strategi kontrol berbasis pada energi dan asas kepasifan[27][28]. Alternatif dari pendekatan Euler-Lagrange adalah formulasi Newton Euler. Metode yang terakhir ini merupakan formulasi rekursif dari dinamika benda tegar dan lebih sesuai untuk kalkulasi

numerik. Formulasi Newton-Euler cocok untuk kalkulasi invers dinamika secara *real time* dan sangat cocok untuk implementasi sistem kontrol berbasis model. Deskripsi lengkap mengenai kedua pendekatan ini dibahas di [29]. Dengan metode yang diturunkan oleh M. W. Walker dan D. E. Orin [30] dari metode rekursif Newton-Euler, penyelesaian masalah *direct dynamic* rumit dapat diubah menjadi penyelesaian masalah *inverse dynamic* yang lebih sederhana dengan kondisi *state* yang telah ditentukan. Model dinamik dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = \tau_m - \tau_f + \tau_e \quad (2.2)$$

Dengan:

- $M(\theta)$  = momen inersia (Kg m<sup>2</sup>).
- $C(\theta, \dot{\theta})$  = efek sentrifugal dan coriolis (Nm).
- $g(\theta)$  = vektor gravitasi (Nm).
- $\tau_m$  = torsi aktuator (Nm).
- $\tau_f$  = torsi friksi (Nm).
- $\tau_e$  = torsi eksternal (Nm).
- $\theta$  = posisi sudut *joint* (rad).

Syarat untuk dapat menerapkan persamaan Newton-Euler pada dinamika sistem adalah diketahuinya parameter inersia yang relevan. Terdapat tiga cara utama untuk memperoleh parameter inersia, yaitu komputasi langsung, kalibrasi eksperimental [31][32] dan identifikasi sistem [33]. Namun, secara teoritis, tidak ada metode yang bisa mendapatkan model dengan presisi yang absolut, komputasi matematis dan simulasi adalah metode yang lebih mudah, lebih efisien, lebih dapat diuji, dan lebih dapat digeneralisasi dibandingkan metode-metode lainnya. Oleh sebab itu, model komputasi matematis sebisa mungkin harus dikerjakan dan digunakan pertama kali [34]. Dengan mengasumsikan material bersifat isotropik dan seragam, momen inersia dari lengan dapat dihitung dengan persamaan berikut

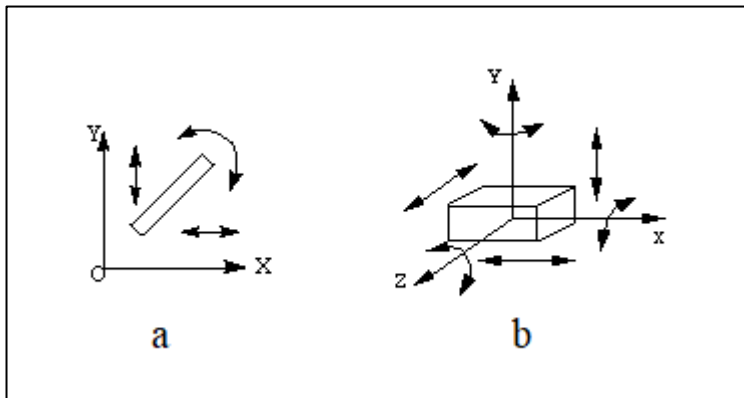


$$M = \frac{1}{12}mL^2 + md^2 \quad (2.3)$$

Di mana  $M$  ( $\text{Kg m}^2$ ) adalah momen inersia lengan,  $m$  ( $\text{Kg}$ ) adalah massa lengan,  $L$  ( $\text{m}$ ) adalah panjang lengan, dan  $d$  ( $\text{m}$ ) adalah jarak dari titik pusat massa atau *centroid* dengan sumbu putar lengan.

### 2.2.1. Degree of Freedom (DoF) dari Benda Tegar

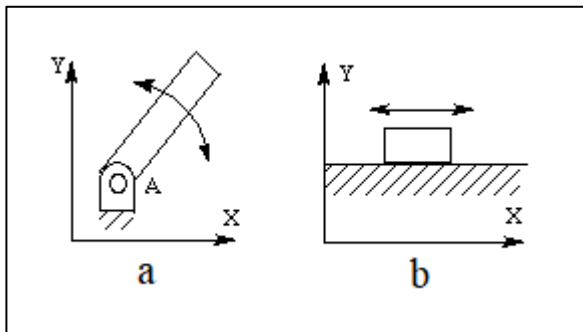
*Degree of freedom (DOF)* dari sebuah benda tegar didefinisikan sebagai banyaknya pergerakan independen yang dimiliki olehnya. Untuk menentukan jumlah DOF dari suatu benda, perlu diketahui ada berapa banyak cara benda tersebut dapat digerakkan [35]. Gambar 2.1 menunjukkan DOF sebuah benda tegar pada bidang dan ruang.



**Gambar 2.1** Degree of freedom (DOF) dari benda tegar pada sebuah bidang (a) dan pada sebuah ruang (b) [35].

Pada bidang 2 dimensi, suatu benda tegar memiliki 3 DOF. Benda dapat melakukan gerakan translasi pada sumbu  $x$  dan sumbu  $y$ , dan melakukan gerakan rotasi pada *centroid*-nya. Suatu benda tegar yang dapat bergerak bebas dalam ruang 3 dimensi memiliki 6 DOF: tiga gerakan translasi pada sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  dan tiga gerakan rotasi terhadap sumbu  $x$ ,  $y$ , dan  $z$  [35].

Dua atau lebih benda tegar dalam ruang secara kolektif disebut sebagai sebuah sistem benda tegar. Gerakan dari tiap-tiap benda tegar independen ini dapat dibatasi dengan batasan kinematika. Batasan kinematika adalah batasan antara benda tegar yang berakibat pada pengurangan dari *degree of freedom* dari sistem benda tegar. Terdapat dua jenis batasan kinematika yang dapat dimiliki oleh sistem benda tegar pada sebuah bidang yaitu pasangan putar (*revolute pair*) dan pasangan prismatic (*prismatic pair*). Benda tegar pada bidang memiliki tiga gerakan independen – dua translasi dan satu rotasi – sehingga menambahkan sebuah pasangan putar atau pasangan prismatic antara dua benda tegar akan menghilangkan 2 DOF. Gambar 2.2 menunjukkan pasangan putar dan pasangan prismatic[35].



**Gambar 2.2** *Revolute pair* (a) dan *prismatic pair* (b) [35].

### 2.3 Model Friksi

Friksi adalah komponen yang tidak diinginkan pada sistem gerak elektro-mekanis yang dikontrol. Performa pergerakan robot sangat dipengaruhi oleh friksi. Efek dari friksi pada sistem robotika bergantung pada banyak faktor seperti pelumasan, temperatur, sifat dari permukaan material, perpindahan, dan kecepatan relatif dari aktuator [36].

Untuk mendapatkan akurasi maksimum dari robot, friksi harus dapat dibuat sekecil mungkin. Namun, pada beberapa kasus di mana transmisi tambahan diperlukan seperti dengan penggunaan

*gearbox*, pengaruh dari friksi akan semakin parah dan berakibat pada sistem yang menjadi sangat non-linear dan menyebabkan *steady state error* dan performa yang buruk.

Friksi merupakan gaya reaksi tangensial antara dua permukaan yang mengalami kontak. Friksi adalah fenomena yang sangat kompleks, terdiri atas kombinasi beberapa fenomena fisis. Pemodelan friksi seringkali dilakukan secara empiris. Friksi pada *servomechanism* dapat menyebabkan limit osilasi yang dikenal sebagai *stick-slip*, dan *error* regulasi/pelacakan. Metode klasik yang digunakan dalam memodelkan friksi adalah model dengan kecepatan konstan atau dikenal sebagai model statis. Model tersebut di antaranya adalah:

- ***Coulomb friction***

Gaya friksi yang bernilai proporsional terhadap gaya normal. Dapat dinyatakan dengan persamaan:  $F = F_c \operatorname{sgn}(v)$ ,  $F_c = \mu F_N$ . Fenomena ini pertama kali diteliti oleh L. da Vinci (1519), ditemukan kembali oleh Amontons (1699) dan dikembangkan lebih lanjut oleh Coulomb (1785).

- ***Static friction/stiction***

Pertama kali diperkenalkan oleh Morin (1833). *Stiction* adalah gaya yang dibutuhkan untuk membuat benda yang diam menjadi bergerak, besarnya dapat lebih besar dari gaya friksi Coulomb.

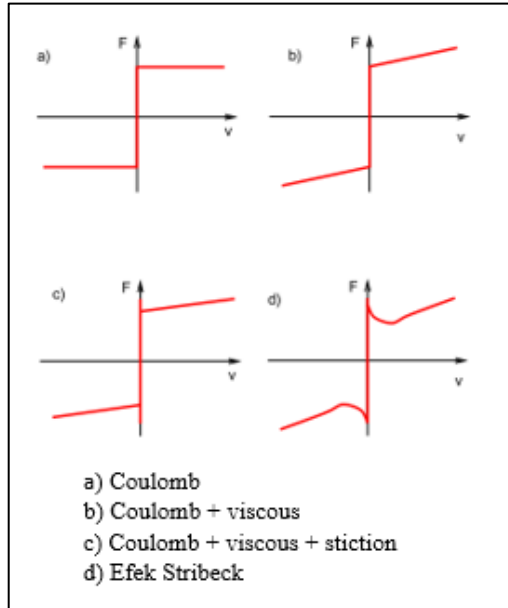
- ***Viscous friction***

Gaya friksi yang bergantung pada kecepatan. Reynolds (1886) memperkenalkan fenomena friksi yang dipengaruhi oleh viskositas pelumas, fenomena ini dapat dinyatakan dengan persamaan  $F = F_v v$ .

- ***Negative viscous friction***

Diperkenalkan oleh Stribeck, fenomena ini dikenal juga sebagai efek Stribeck. Konsep ini menunjukkan bahwa friksi pada permukaan yang dilumasi oleh fluida merupakan fungsi

non-linear dari beban kontak, viskositas dan kecepatan *entrainment* dari pelumas.

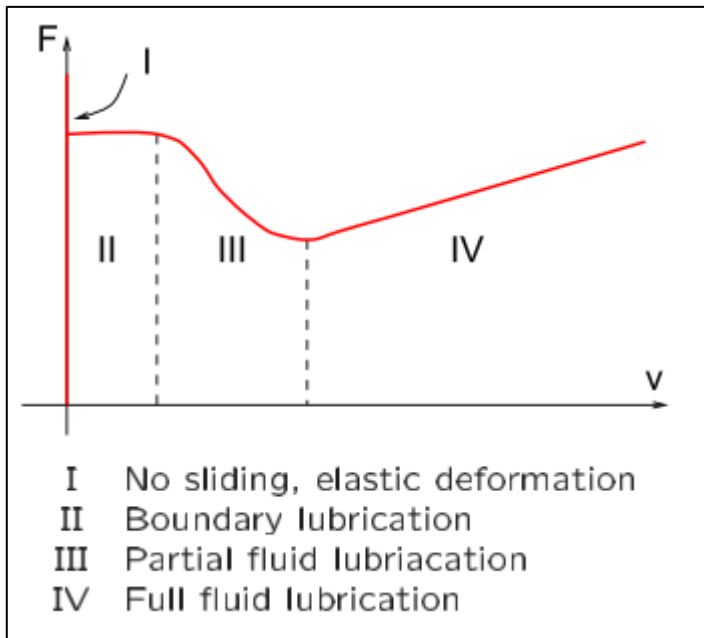


**Gambar 2.3** Beragam model friksi statis [37].

Model kurva Stribeck dapat dinyatakan oleh persamaan 2.4 berikut [19] [23]:

$$\tau_f(\dot{\theta}) = \alpha_1 \cdot \exp(-\alpha_2 \cdot \dot{\theta}) + \alpha_3 \cdot \dot{\theta} + \alpha_4 \quad (2.4)$$

Dengan motivasi untuk mengembangkan representasi yang akurat dari friksi pada sistem, banyak peneliti kontrol yang mengembangkan beragam model analitis, metode estimasi untuk mengidentifikasi efek friksi, dan metode adaptif dan *robust* untuk mengompensasi atau membuang efek friksi. C. Makkar (2005) membuat model friksi yang kontinu dan dapat diturunkan yang menangkap sejumlah aspek esensial dari friksi tanpa melibatkan fungsi diskontinyu atau kontinyu sebagian [38].



**Gambar 2.4** Kurva Stribeck [37].

Komponen friksi diasumsikan memiliki bentuk berikut:

$$\tau_f(\dot{\theta}) = \gamma_1(\tanh(\gamma_2\dot{\theta}) - \tanh(\gamma_3\dot{\theta})) + \gamma_4 \tan(\gamma_5\dot{\theta}) + \gamma_6\dot{\theta} \quad (2.5)$$

dengan  $\gamma_i \in \mathbb{R} \forall i = 1, 2, \dots, 6$  adalah koefisien bernilai positif yang tidak diketahui. model friksi pada (2.5) memiliki sifat sebagai berikut:

- Model friksi simetris pada titik origin.
- Koefisien *static friction* dapat diaproksimasi oleh  $\gamma_1 + \gamma_4$ .
- $\tanh(\gamma_2\dot{\theta}) - \tanh(\gamma_3\dot{\theta})$  mewakili efek Stribeck dimana koefisien friksi berkurang berkurang seiring peningkatan

kecepatan slip mulai dari koefisien *static friction* di dekat titik origin.

- Disipasi *viscous* diwakili oleh  $\gamma_6 \dot{\theta}$ .
- Koefisien friksi Coulomb dimodelkan oleh  $\gamma_4 \tan(\gamma_5 \theta)$ .

## 2.4 Kompensasi Gravitasi

Komponen gravitasi dari sistem merupakan gradien dari energi potensial yang terdapat pada sistem [39]. Gaya gravitasi pada sistem dapat dinyatakan dalam persamaan:

$$g(\theta) = \frac{\partial V(\theta)}{\partial \theta} \quad (2.6)$$

Dengan  $V(\theta)$  adalah energi potensial dari gravitasi yang mempengaruhi sistem dan  $\theta$  adalah sudut vektor. Vektor gravitasi  $g(\theta)$  hanya mengandung fungsi trigonometri dari nilai  $\theta$ , dengan itu  $g(\theta)$  merupakan himpunan terbatas. Oleh sebab itu, efek gravitasi pada sistem dapat dinyatakan dalam model matematis pada (2.7).

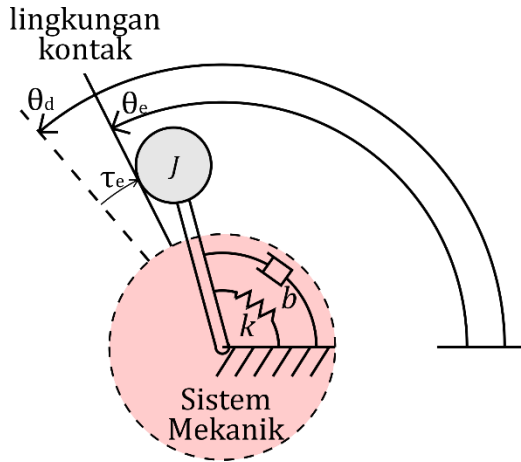
$$g(\theta) = \alpha \sin \theta \quad (2.7)$$

Metode yang digunakan untuk menambahkan kompensasi gravitasi pada kontroler dapat berupa metode berbasis model seperti yang dibahas pada penelitian [21] dan [22] ataupun metode yang tidak berbasis model seperti metode iterasi yang dibahas pada penelitian [40][41].

## 2.5 Impedance Control

Impedansi mekanik dapat didefinisikan sebagai perbandingan dari keluaran gaya dengan masukan kecepatan. *Impedance control* melibatkan regulasi dan stabilisasi pergerakan robot dengan membuat hubungan matematis antara gaya interaksi dan trayektori robot. Filter impedansi massa-pegas-*damper* umumnya digunakan untuk mendapatkan interaksi yang aman. *Impedance control* terinspirasi dari perlakuan manusia ketika mengalami kontak dengan lingkungan yang berbeda [2]. Manusia memiliki sistem

kontrol yang sangat efektif dengan aktuator biologis yang canggih sehingga dapat memanipulasi impedansi dari otot (e.g., kekakuan) untuk menyesuaikan dengan gaya interaksi.



**Gambar 2.5** Dinamika sistem ketika mengalami kontak dengan lingkungan. Posisi  $\theta_e$  mewakili posisi dari lingkungan, dan posisi  $\theta_d$  mewakili posisi trayektori yang menjadi referensi dan berada di bagian dalam lingkungan kontak agar kontak antara robot dengan lingkungan kontak selalu terjaga. *Error* posisi adalah selisih antara posisi sesungguhnya ( $\theta$ ) dan referensi ( $\theta_d$ ).

Hubungan antara *joint torque* dan *joint position* yang dibentuk oleh *impedance control* dapat dinyatakan sebagai sistem massa-pegas-damper virtual berikut:

$$J\Delta\ddot{\theta} + b\Delta\dot{\theta} + k\Delta\theta = \tau_d \quad (2.8)$$

$$\Delta\theta = \theta_d - \theta$$

Di mana  $J$ ,  $b$ ,  $k$ , dan  $\theta_d$  berturut-turut adalah inersia, redaman, dan kekakuan virtual yang diinginkan dari sistem, dan posisi tujuan yang menjadi referensi. Untuk memperoleh performa

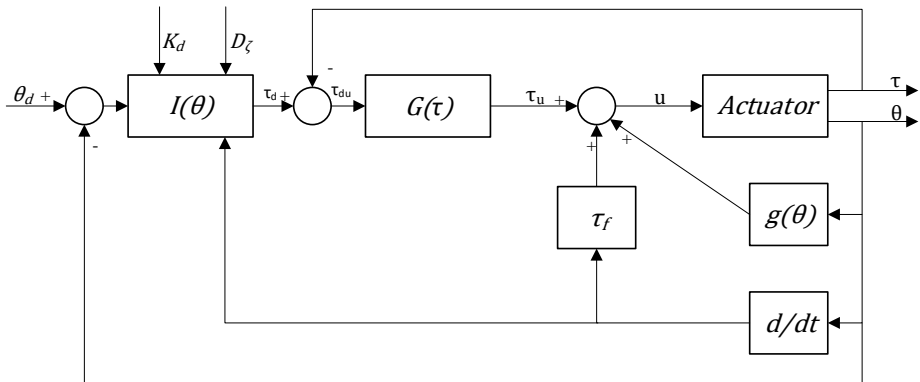
*compliant control*, inersia virtual dapat diabaikan dan (2.8) dapat disederhanakan menjadi:

$$\tau_d = K_d(\theta_d - \theta) + D_d\dot{\theta} \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) adalah model dari *impedance control*, menunjukkan perhitungan torsi yang diinginkan untuk meraih relasi impedansi mekanik yang diinginkan dari sistem.  $K_d$  dan  $D_d$  adalah koefisien kekakuan dan redaman virtual yang diinginkan dari sistem. Nilai  $D_d$  diperoleh melalui perhitungan dari nilai nisbah redaman ( $D_\zeta$ ) yang diinginkan melalui persamaan berikut:

$$D_d = 2\sqrt{K_d M} D_\zeta \quad (2.10)$$

Skema kontrol dari *joint impedance control* berbasis torsi dengan kompensasi non-linear friksi dan gravitasi dijelaskan oleh diagram blok sistem kontrol berikut:



**Gambar 2.6** Arsitektur *joint impedance control* berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi [19].



Kontrol torsi PD dapat ditambahkan bersama dengan *feed-forward* torsi dari hasil perhitungan hubungan impedansi mekanik yang dilakukan oleh *joint impedance control*. Input kontrol torsi ( $u$ ) kemudian ditentukan sebagai:

$$G(\tau_{du}) = k_t \cdot (\tau_{du} - g(\theta)) - k_s \dot{\tau}_{du} \quad (2.11)$$

$$\tau_{du} = \tau_{du} - \tau \quad (2.12)$$

$$u = \tau_d - k_t \cdot (\tau_d - \tau - g(\theta)) - k_s(\tau_{du} - \dot{\tau}) + g(\theta) + \tau_f \quad (2.13)$$

Pada persamaan (2.13),  $k_t$  dan  $k_s$  merupakan *gain* P dan D dari kontroler torsi ( $G(\tau)$ ).

## 2.6 Development Board STM32f407-Discovery



**Gambar 2.7** STM32F4DISCOVERY [42]

STM32F4-Dsiccovery merupakan *development board* mikrokontroler yang dikeluarkan oleh STMicroelectronics. STM32f4DISCOVERY memungkinkan pengguna untuk mengembangkan aplikasi yang berbasis *chip* mikrokontroler

STM32F407VG yang merupakan mikrokontroler dengan performa tinggi dengan inti ARM<sup>®</sup> Cortex<sup>®</sup> -M4 32 bit. Termasuk pula di dalamnya segala komponen yang dibutuhkan untuk dapat memulai mengembangkan aplikasi dengan mudah dan cepat.

Berbasis pada STM32F407VG, pada *board* ini telah terdapat perangkat *debug* ST-LINK/V2, LED, *pushbutton*, dll. Pengembangan perangkat dengan STM32f4DISCOVERY juga difasilitasi dengan paket *software* pengembangan terpadu serta *library* dan contoh program yang komprehensif.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

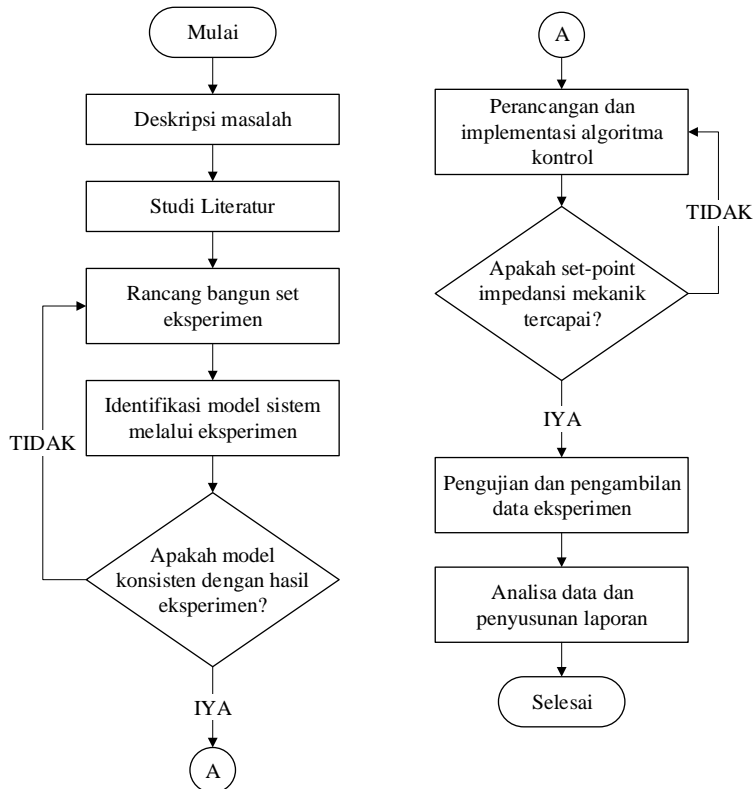
## **BAB III METODOLOGI**

Bab ini berisi langkah-langkah dari pengerjaan penelitian tugas akhir rancang bangun dan eksperimen *joint impedance control* berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi pada aktuator servomotor untuk *bioinspired robot*. Gambar 3.1 merupakan diagram alir pengerjaan penelitian tugas akhir secara keseluruhan.

Penelitian ini dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu tahap pembuatan set eksperimen, tahap eksperimen identifikasi parameter, dan tahap rancang bangun algoritma kontrol. Pada tahap pembuatan set eksperimen, dilakukan perancangan dan pembuatan komponen mekanik dan elektronik dari set eksperimen yang digunakan dalam penelitian. Pada tahap eksperimen identifikasi parameter, dilakukan eksperimen untuk memperoleh parameter-parameter fisis dari set eksperimen yang digunakan dalam penelitian. Pada tahap rancang bangun algoritma kontrol, dilakukan perancangan dan penerapan algoritma kontrol pada sistem aktuator servomotor yang mana algoritma diterapkan pada mikrokontroler. Algoritma dirancang berdasarkan parameter fisis yang diperoleh melalui eksperimen dan kemudian dilakukan evaluasi terhadap performa aktuator setelah diberikan algoritma *impedance control* dengan kompensasi friksi dan gravitasi.

### **3.1 Studi Literatur**

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan pemahaman terhadap aspek-aspek penelitian yang dilakukan dengan pengkajian terhadap literatur-literatur serta penelitian-penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian yang dilakukan. Literatur yang digunakan bersumber dari jurnal-jurnal, buku, dan tesis yang terkait dengan topik penelitian ini. Studi literatur ditujukan untuk membantu proses perancangan dan pembuatan set eksperimen, perumusan model dinamik sistem, penentuan metode dalam eksperimen identifikasi parameter sistem, perancangan dan pengujian algoritma kontrol pada sistem.



**Gambar 3.1** Diagram alir kegiatan penelitian tugas akhir.

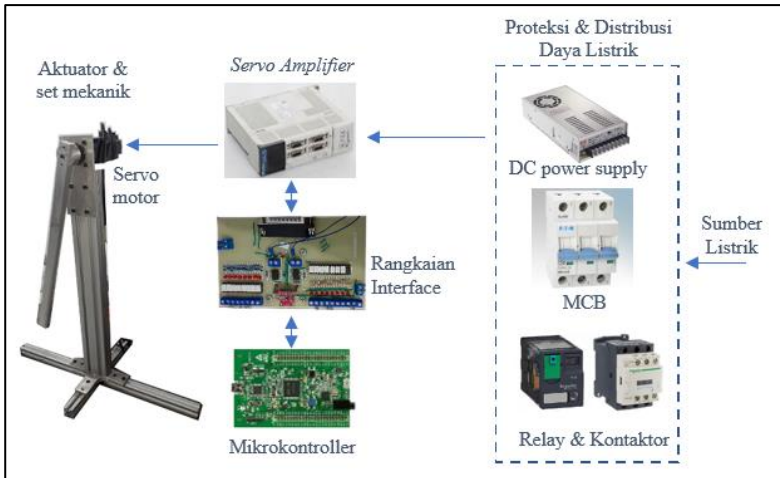
### 3.2 Pembuatan Set Eksperimen

Dalam penelitian ini dilakukan rancang bangun terhadap sebuah set eksperimen yang digunakan untuk melakukan pengujian algoritma *impedance control* dengan kompensasi friksi dan gravitasi. Set eksperimen ini dibuat untuk mewakili sebuah sistem manipulator robot dengan satu aktuator servomotor. Secara umum, set eksperimen ini dapat dibagi menjadi tiga komponen yaitu komponen mekanik, komponen elektrikal, dan mikrokontroler. Set eksperimen pada penelitian *joint impedance control* berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi ditunjukkan oleh gambar

3.2 dan arsitektur sistem dari set eksperimen ditunjukkan oleh gambar 3.3.



**Gambar 3.2** Set eksperimen *joint impedance control* berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi.



**Gambar 3.3** Arsitektur sistem dari set eksperimen.

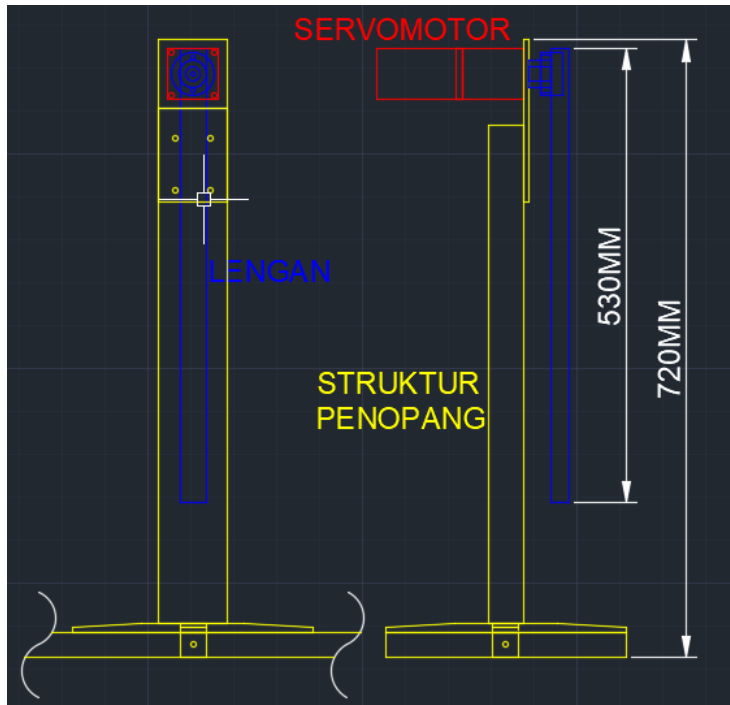
### 3.2.1. Komponen Mekanik

Komponen mekanik pada set eksperimen dalam penelitian ini terdiri atas servomotor dan gearbox, serta struktur penopang dan lengan yang terhubung dengan as dari servomotor. Untuk membuat komponen mekanik dari set eksperimen perlu adanya perancangan untuk menentukan desain, ukuran, dan material yang tepat agar sesuai dengan spesifikasi yang dimiliki oleh servomotor dan gearbox yang digunakan.

Pada set eksperimen ini digunakan sebuah aktuator servometer pabrikan Mitsubishi dengan seri HC-MFS23 dengan daya 0.2kW dan *rating* torsi 0.62Nm yang dipasangkan dengan *planetary gearbox* pabrikan Apex Dynamics dengan seri AB060-S2-P2 dengan rasio reduksi 1:10. Material yang digunakan sebagai bahan dari struktur penopang dan lengan adalah Aluminium. Aluminium dipilih karena memiliki kekuatan yang cukup tinggi, mudah untuk diproses dengan permesinan untuk memperoleh akurasi dimensi yang tinggi, dan memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi.

Langkah pertama dalam pembuatan komponen set mekanik adalah perancangan. Rancangan dari komponen mekanik

set eksperimen dibuat dengan menggunakan program komputer *computer aided design (CAD)* yaitu Autodesk AutoCAD. Dalam proses perancangan ditentukan dimensi dari setiap komponen mekanik dari set eksperimen. Rancangan dari set mekanik yang dibuat pada program komputer Autodesk AutoCAD ditunjukkan oleh gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Rancangan komponen mekanik dari set eksperimen yang dibuat pada program komputer Autodesk AutoCAD.

Setelah dilakukan perancangan pada program komputer Autodesk AutoCAD, tahap selanjutnya adalah fabrikasi komponen mekanik. Desain beserta ukuran-ukuran yang telah ditentukan pada rancangan dijadikan sebagai referensi pada proses fabrikasi dan komponen mekanik. Komponen lengan adalah bagian yang sangat



krusial karena akan sangat berpengaruh bagi model dari sistem. Oleh sebab itu, lengan harus dibuat dengan tingkat presisi yang tinggi. Fabrikasi lengan dilakukan dengan menggunakan metode *end-milling* pada mesin frais sehingga diperoleh komponen dengan dimensi sesuai yang dirancang dengan kepresisian dimensi 50 $\mu$ m. Gambar 3.5 menunjukkan proses permesinan dari komponen lengan.



**Gambar 3.5** Proses permesinan komponen lengan pada fabrikasi komponen mekanik.

Tahap selanjutnya dari pembuatan komponen mekanik adalah perakitan. Setelah setiap komponen difabrikasi, komponen mekanik dirakit sesuai rancangan yang telah dibuat. Hasil akhir

dari komponen mekanik dari set eksperimen ditunjukkan oleh gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Komponen mekanik set eksperimen.

Tahap terakhir dari pembuatan komponen mekanik adalah pengujian. Pengujian ditujukan untuk memastikan bahwa komponen mekanik telah sesuai dan siap untuk digunakan dalam eksperimen. Karena pada set eksperimen ini terdapat komponen bergerak, maka faktor keamanan menjadi prioritas utama agar set eksperimen tidak memaparkan orang-orang dan lingkungan pada bahaya saat mengoperasikannya. Seluruh komponen harus dipastikan telah tersambung dengan kencang dan konstruksi struktur penopang dipastikan kuat dan dapat menopang lengan yang dalam keadaan bergerak akan menimbulkan efek gaya sentrifugal. Selain itu, agar dapat diperoleh hasil eksperimen yang

baik, set eksperimen yang diasumsikan sebagai benda tegar juga harus dipastikan memiliki kekakuan yang tinggi.

### 3.2.2. Komponen Elektrik

Komponen elektrik terdiri atas *servo amplifier* beserta perangkat-perangkat pendukung yang berperan dalam distribusi daya, pengondisian sinyal, dan proteksi. Proses pembuatan komponen elektrik set eksperimen dibagi menjadi tahap perancangan, perakitan/*wiring*, dan pengujian.

Tahap perancangan adalah tahap di mana rancangan rangkaian komponen elektrik digambar dengan menggunakan program komputer. Program komputer yang digunakan untuk menggambar rangkaian komponen elektrik adalah Autodesk Autocad Electrical. Karena komponen elektrik yang utama adalah *servo amplifier*, maka dalam merancang kebutuhan komponen lainnya yang penunjang dari *servo amplifier* digunakan referensi yang diperoleh melalui *user manual* dari *servo amplifier*.

Berikut adalah daftar komponen elektrik yang dibutuhkan pada set eksperimen ini:



**Gambar 3.7** Mitsubishi MR-J2S-20A

**Servo Amplifier**, merupakan komponen utama dari sistem elektrik. Servo amplifier memiliki fungsi sebagai *driver* sekaligus kontroler dari aktuator servomotor. Servo amplifier menerima sinyal analog dan digital dari mikrokontroler dan memproses sinyal tersebut menjadi sinyal listrik 3 fasa yang menggerakkan aktuator servomotor. *Servo amplifier* yang digunakan dalam set eksperimen ini adalah Mitsubishi MR-J2S-20A yang ditunjukkan oleh gambar 3.7. *Servo amplifier* ini membutuhkan suplai daya berbeda untuk rangkaian *driver* dan kontrolernya yaitu 220VAC 1 fasa untuk rangkaian *driver*, 220 VAC 1 fasa dan 24VDC untuk rangkaian kontroler.



**Gambar 3.8** DC Power Supply 24V

**DC Power Supply**, adalah perangkat yang digunakan untuk mengubah arus AC dari sumber power AC menjadi arus DC dengan besar tegangan tertentu. Sumber daya DC dibutuhkan untuk mengoperasikan rangkaian kontroler pada *servo amplifier* dan untuk menggerakkan kontaktor dan relay. Pada set eksperimen ini digunakan 1 buah DC Power Supply dengan keluaran 24VDC ditunjukkan oleh komponen dengan *tag number* G1.1 pada gambar 3.13.

**Power Line Filter**, adalah sejenis filter elektronik yang dipasang di antara perangkat elektronik dengan sumber power AC. *Power line filter* digunakan untuk mengatenuasi *noise* dari frekuensi radio - dikenal sebagai *electro-magnetic Interference* (EMI) - yang merambat antara sumber power AC dan perangkat elektronika. Pada set eksperimen ini, digunakan *power line filter* TDK Lambda seri ZRAC2220-11 yang ditunjukkan oleh komponen dengan *tag number* Z1.1 pada gambar 3.13.



**Gambar 3.9** Power Line Filter

**Residual Current Circuit Breaker (RCCB)**, adalah perangkat yang dapat mendeteksi dan melakukan trip terhadap adanya kebocoran arus. Perangkat ini memberikan proteksi terhadap sengatan listrik pada personel. RCCB dipasang secara seri dengan MCB untuk melindungi rangkaian elektrik dari potensi kerusakan termal yang disebabkan oleh *over currents*. RCCB juga menjadi *switch* pemutusan utama yang terletak paling hulu pada rangkaian elektrik yang memiliki beberapa MCB. RCCB bekerja dengan mendeteksi adanya *ground fault error* melalui pengukuran terhadap besarnya arus yang masuk dan keluar dan menghitung selisih besarnya. Selisih arus yang besar mengindikasikan adanya kebocoran arus (misal disebabkan oleh personel yang

mengalami kontak dengan *live wire*) dan RCCB akan merespons dengan melakukan trip. Pada set eksperimen ini digunakan RCCB Fuji Electric EG32AC yang ditunjukkan oleh komponen dengan *tag number* Q1.1 pada gambar 3.13.



**Gambar 3.10** Residual Current Circuit Breaker.

**Miniature Circuit Breaker (MCB), *Miniature Circuit Breaker*** (MCB) adalah perangkat yang digunakan untuk mengamankan rangkaian elektrik dari *over current* yang dapat disebabkan oleh arus pendek maupun *overload*. MCB menggunakan mekanisme termal-magnetik, yang mana mekanisme magnetik akan seketika memutus rangkaian apabila terdeteksi arus yang melebihi kapasitas arus dari MCB yang dapat disebabkan oleh adanya arus pendek. Mekanisme termal menggunakan bimetal yang dapat memutus rangkaian apabila terjadi *over current* yang tidak begitu ekstrem namun terjadi dalam periode waktu yang cukup lama, ini dapat disebabkan oleh adanya *overload* pada rangkaian. Pada set eksperimen ini digunakan 1 buah MCB 3 *pole*, 1 buah MCB 2 *pole*, dan 1 buah MCB 1 *pole* yang ditunjukkan oleh komponen dengan *tag number* Q1.2, Q1.3, dan Q1.4.



**Gambar 3.11** Miniature Circuit Breaker.

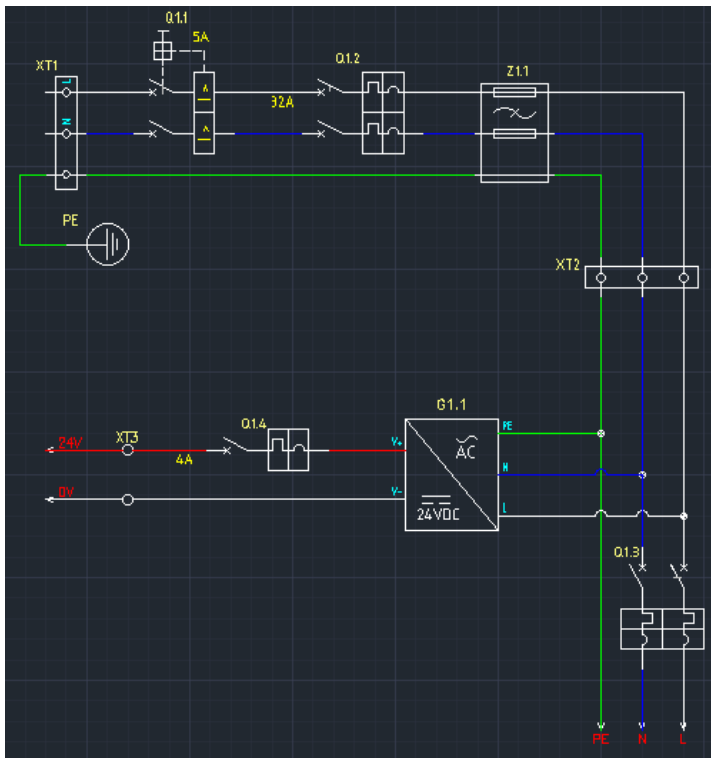
**Relay dan Kontaktor**, adalah *switch* yang dioperasikan secara elektrik. *Relay* menggunakan elektromagnet untuk dapat mengendalikan rangkaian secara mekanis. *Relay* digunakan ketika suatu rangkaian perlu untuk dikendalikan oleh sinyal terpisah dengan daya yang lebih kecil, atau ketika beberapa rangkaian perlu dikendalikan sekaligus.



**Gambar 3.12** Relay dan Kontaktor.

Kontaktor adalah sejenis *relay* yang digunakan untuk menangani beban yang membutuhkan daya yang tinggi seperti

motor. Pada set eksperimen ini kontaktor digunakan sebagai saklar yang mengontrol daya yang masuk ke rangkaian *driver* dari *servo amplifier*, sedangkan *relay* digunakan untuk mengendalikan kontaktor berdasarkan sinyal *input/output* digital dari *servo amplifier* seperti ketika terjadi *emergency* atau kemunculan *alarm*. Dalam set eksperimen, relay dan kontaktor ditunjukkan oleh komponen dengan *tag number* R2.1, R2.2, dan MC2.1 pada gambar 3.14.

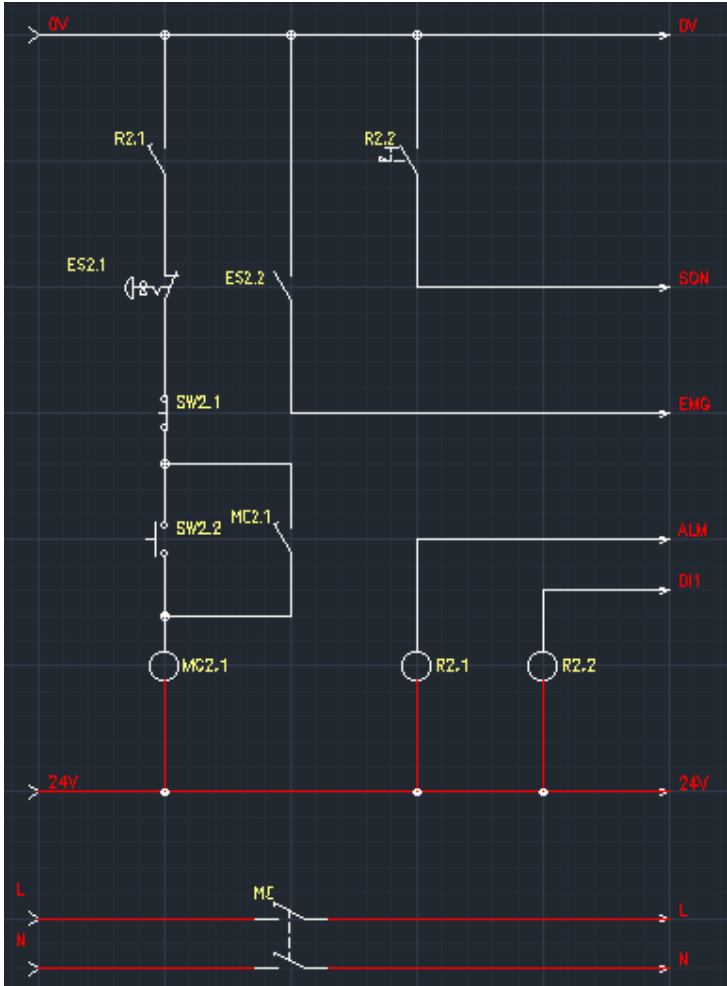


**Gambar 3.13** Rangkaian distribusi daya.

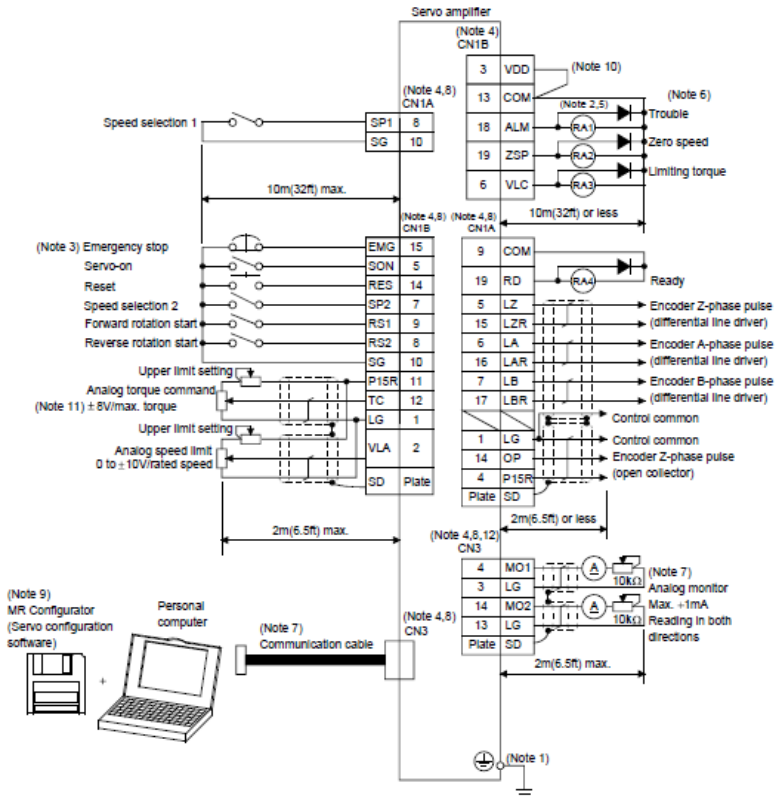
Dari perangkat-perangkat yang telah ditentukan tadi kemudian dibuat desain rangkaian listrik-nya. Proses pembuatan desain ini dilakukan dengan menggunakan *software* Autodesk



Autocad Electrical. Rangkaian listrik yang dibuat pada program tersebut ditunjukkan oleh gambar 3.13 dan gambar 3.14.

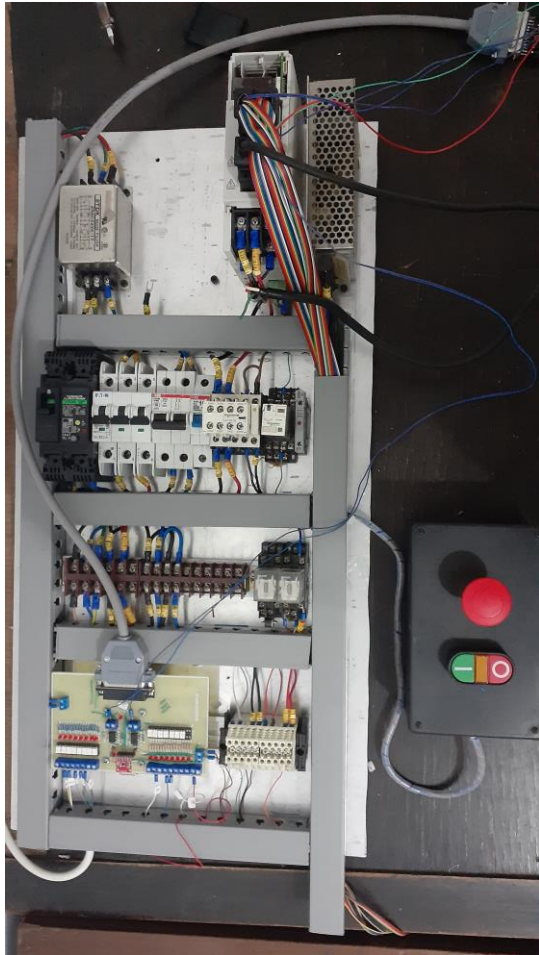


**Gambar 3.14** Rangkaian saklar dan distribusi daya 24VDC.



**Gambar 3.15** Rangkaian *input/output* [43].

Setelah desain rangkaian listrik dibuat, selanjutnya dilakukan proses perangkaian atau *wiring*. Tiap-tiap perangkat listrik ditata pada panel listrik untuk kemudian dihubungkan dengan kabel konektor sesuai dengan gambar rangkaian yang telah dibuat pada proses perancangan. Hasil dari perangkaian komponen elektrik dari set eksperimen ditunjukkan oleh gambar 3.16.



**Gambar 3.16** Komponen elektrik dari set eksperimen.

Tahap terakhir dari pembuatan komponen elektrik dari set eksperimen adalah pengujian. *Wiring* dipastikan telah sesuai dengan desain dan tidak terdapat *short-circuit* dan tidak terdapat jalur yang terputus pada jalur yang seharusnya tersambung. Tiap-tiap perangkat proteksi seperti MCB dan RCCB dipastikan telah berfungsi sebagaimana mestinya. Jalur sinyal dipastikan telah

benar dan menghasilkan keluaran sesuai yang diharapkan. Jalur *Protective Earth (grounding)* dipastikan dalam kondisi baik.

### 3.2.3. Mikrokontroler

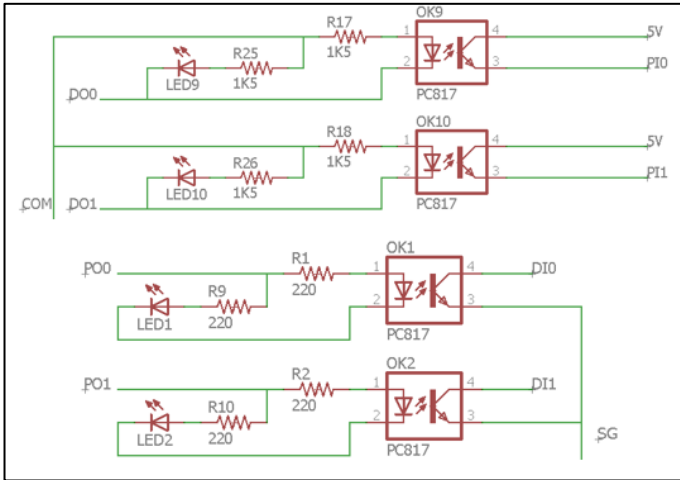
Mikrokontroler menjadi perangkat dimana algoritma kontrol diterapkan. Mikrokontroler berfungsi untuk menerima dan memproses sinyal *output* dari *servo amplifier* yang kemudian digunakan untuk melakukan kontrol terhadap aktuator dengan mengirimkan sinyal analog dan digital ke *servo amplifier*. Mikrokontroler yang digunakan pada set eksperimen ini adalah STM32F407VG Discovery.

Mikrokontroler beroperasi pada level sinyal yang berbeda dengan *servo amplifier*. Mikrokontroler beroperasi pada level sinyal 0-5 VDC sedangkan *servo amplifier* beroperasi pada level sinyal 0-24 VDC untuk sinyal digital dan  $\pm 8$  VDC untuk sinyal analog. Selain itu, perlu adanya isolasi galvanis antara mikrokontroler dengan *servo amplifier* untuk memberikan proteksi berupa isolasi antara *servo amplifier* dengan mikrokontroler dan PC selagi komunikasi sinyal tetap dapat terjadi. Untuk tujuan tersebut, perlu adanya rangkaian tambahan sebagai antarmuka mikrokontroler dengan *servo amplifier*.

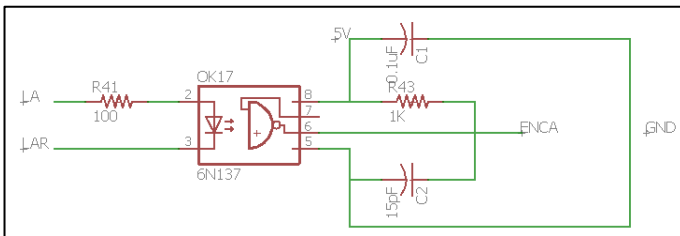
Dalam membuat rangkaian antarmuka, dibutuhkan komponen-komponen elektronika sebagai berikut:

- PC817 – IC *photocoupler* yang digunakan untuk mengisolasi sekaligus merubah level tegangan sinyal *input/output* digital antara mikrokontroler dan *servo amplifier*.
- 6N137 – IC *photocoupler* kecepatan tinggi yang mampu menangani sinyal digital dengan bandwidth 10Mbps. IC ini digunakan untuk mengisolasi sinyal *quadrature encoder* dari sensor posisi yang dikeluarkan oleh *servo amplifier*.
- MCP4725 – IC *digital to analog converter (DAC)* yang digunakan untuk mengubah sinyal digital dari mikrokontroler menjadi sinyal analog yang merupakan sinyal *input* dari *servo amplifier*.

Perancangan rangkaian antarmuka dilakukan dengan menggunakan program komputer Autodesk EAGLE. Perancangan dimulai dari membuat skematika rangkaian elektronika dari komponen-komponen yang telah disebutkan. Skematika rangkaian elektronika ditunjukkan oleh gambar 3.15 – gambar 3.17.

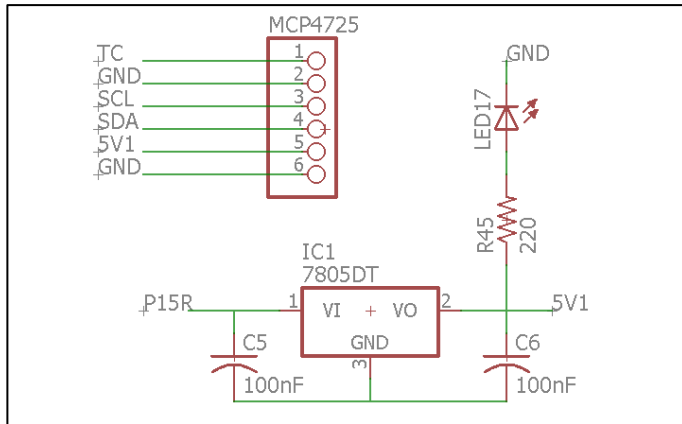


**Gambar 3.17** Skematik rangkaian PC817.

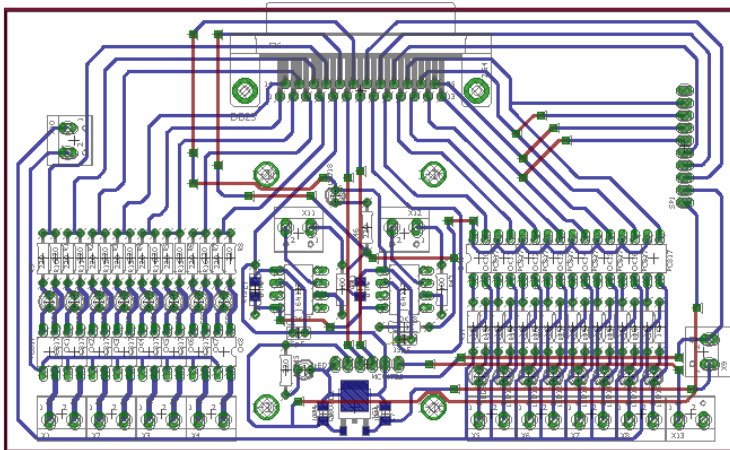


**Gambar 3.18** Skematik rangkaian 6N137.

Setelah perancangan skematika, dilanjutkan dengan perancangan *printed circuit board (PCB)*. Perancangan PCB juga dilakukan menggunakan program komputer Autodesk EAGLE. Hasil perancangan PCB ditunjukkan oleh gambar 3.18.



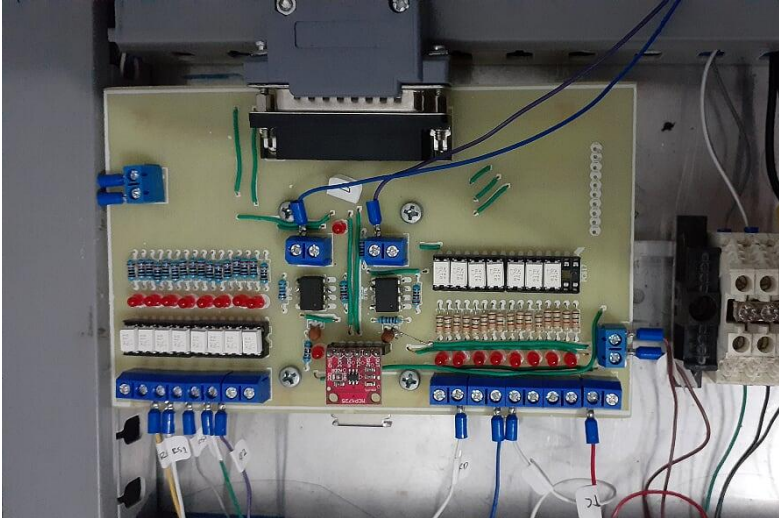
**Gambar 3.19** Skematik rangkaian MCP4725.



**Gambar 3.20** Desain papan PCB.

Desain papan PCB selanjutnya dicetak menjadi papan PCB. Komponen-komponen elektronika dari rangkaian elektronika antarmuka mikrokontroler-*servo amplifier* dipasangkan ke papan PCB. Dilakukan pengujian untuk memastikan tidak adanya jalur yang terputus ataupun mengalami *short-circuit*. Rangkaian

antarmuka mikrokontroler-*servo amplifier* yang telah jadi ditunjukkan oleh gambar 3.19.



**Gambar 3.21** Rangkaian antarmuka mikrokontroler-*servo amplifier*

### 3.3 Identifikasi Parameter

Dalam rancang bangun algoritma kontrol berbasis model, sangat penting untuk dapat mengidentifikasi parameter-parameter fisis dari sistem. Dalam penelitian ini dua komponen utama dari parameter yang perlu untuk diidentifikasi adalah friksi dan gravitasi. Eksperimen dilakukan untuk melengkapi model matematis yang diuraikan pada BAB II dengan parameter atau konstanta.

#### 3.3.1. Identifikasi Parameter Friksi

Untuk menentukan model friksi beserta parameter fisisnya yang digunakan pada kompensasi friksi, dilakukan eksperimen dengan langkah-langkah percobaan sebagai berikut:

- Set eksperimen disiapkan untuk melakukan mode kontrol kecepatan dengan kecepatan konstan pada kecepatan rendah.
- 16 titik kecepatan sudut antara 0.01 - 0.6 rad/s ditentukan sebagai titik percobaan.
- Nilai torsi yang dibutuhkan untuk dapat menggerakkan aktuator untuk tiap-tiap kecepatan sudut dikumpulkan.
- Identification Toolbox di Matlab digunakan untuk mengidentifikasi parameter model.
- Data hasil pengukuran pada eksperimen digunakan untuk mendapatkan 3 model friksi yang dibahas pada subbab 2.2 yaitu: model friksi viscous + coulomb, model friksi kurva Stribeck yang dinyatakan oleh persamaan 2.4, dan *continuously differentiable friction model* yang dinyatakan oleh persamaan 2.5.
- Ke-tiga model dibandingkan dan di evaluasi untuk memilih model friksi yang digunakan pada kompensator friksi.

### 3.3.2. Identifikasi Torsi Gravitasi

Eksperimen dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- Set eksperimen disiapkan dengan mode kontrol posisi
- Aktuator diberikan perintah untuk melakukan kontrol posisi pada posisi  $1/16\pi - 1/2\pi$  radian dengan kenaikan  $1/16\pi$  radian, torsi yang dibutuhkan untuk menahan lengan pada masing-masing posisi diukur dan dicatat.
- Nilai torsi dari tiap-tiap titik pengukuran dikurangi dengan nilai *stiction*.
- Nilai torsi untuk potensial gravitasi tertinggi yaitu pada posisi  $1/2\pi$  radian ditentukan sebagai konstanta dari model gravitasi.
- Nilai prediksi dari model dan data pengukuran dibandingkan.

### 3.4 Perancangan dan Implementasi Algoritma *Impedance Control*

Perancangan algoritma *impedance control* dilakukan dengan menurunkan model kontroler dan kompensator dari model sistem



set eksperimen secara analitis. Sistem benda tegar yang digunakan sebagai set-eksperimen dapat dimodelkan sebagai sistem Euler-Lagrange. Model dinamis non-linear untuk sistem benda tegar ditunjukkan oleh persamaan 2.2. Sistem benda tegar dari set eksperimen yang dibuat terdiri atas dua *link* (termasuk struktur penyangga) dan satu *joint*. Sistem benda tegar memiliki sebuah batasan kinematik berupa *revolute pair* sehingga sistem dikatakan memiliki 1 DoF. Untuk mendeskripsikan sistem benda tegar tersebut, model pada persamaan 2.2 dapat diturunkan menjadi model berikut:

$$M\ddot{\theta} + \tau_f(\dot{\theta}) + G(\theta) = \tau(t) \quad (3.1)$$

Dengan:

$\theta$  = Posisi sudut lengan (rad).

$M$  = Momen inersia lengan ( $\text{Kg m}^2$ ).

$\tau_f$  = Torsi friksi (Nm).

$G$  = Torsi gravitasi (Nm).

$\tau$  = Torsi *joint* (Nm).

Untuk menerapkan model benda tegar tersebut, diperlukan identifikasi terhadap parameter momen inersia. Parameter momen inersia dari sistem diperoleh melalui perhitungan matematis langsung. Tabel 3.1 menunjukkan parameter fisis yang perlu diukur untuk digunakan dalam perhitungan momen inersia. Persamaan 3.2 adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung momen inersia.

$$M = \frac{1}{12}mL^2 + md^2 \quad (3.3)$$

**Tabel 3.1** Parameter fisis untuk perhitungan momen inersia

Parameter	Simbol	Satuan
Massa	m	$\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
Panjang lengan	L	m
Jarak dari sumbu putar ke <i>centroid</i>	d	m

Strategi kontrol yang dipilih adalah *joint impedance control* berbasis torsi yang melakukan perhitungan nilai torsi yang dibutuhkan agar tercipta hubungan antara torsi *joint* dan posisi *joint* yang sesuai dengan nilai *joint impedance* yang diinginkan. Sistem kontrol dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\tau_d = K_d(\theta_d - \theta) + D_d\dot{\theta} \quad (3.4)$$

Dengan:

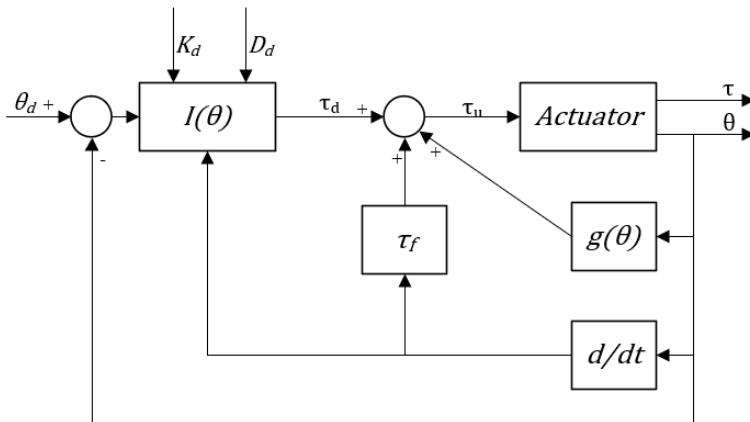
$\tau_d$  = Torsi yang dibutuhkan (Nm).

$K_d$  = Koefisien kekakuan yang diinginkan (Nm rad<sup>-1</sup>).

$D_d$  = Koefisien redaman yang diinginkan (Nm s rad<sup>-1</sup>).

$\theta_d$  = Posisi sudut yang diinginkan (rad).

$\theta$  = Posisi sudut aktual dari lengan (rad).



**Gambar 3.22** Arsitektur algoritma *joint-impedance control* berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi.

Strategi kontrol yang dirancang memiliki arsitektur sebagaimana ditunjukkan gambar 3.22. Block  $I(\theta)$  adalah blok *impedance control* yaitu yang dinyatakan oleh persamaan 2.8. Persamaan 2.9 memiliki tiga variabel independen yaitu:  $\theta_d$ ,  $K_d$ ,

dan  $D_d$  yang menjadi *input* dari kontroler, dan satu *output* yaitu  $\tau_d$ . *Output* ini kemudian dijumlahkan dengan *output* dari kompensator friksi dan gravitasi yang diperoleh melalui eksperimen. Hasil penjumlahan tersebut yang menjadi nilai torsi *input* dari aktuator. Aktuator diasumsikan sebagai sumber torsi ideal sehingga *input* torsi aktuator diasumsikan akan selalu bernilai sama dengan *output* torsi *joint*. Hubungan antara torsi *joint* dan posisi sudut *joint* dimodelkan dengan persamaan 3.1

### 3.5 Pengujian dan Pengambilan Data

Untuk mendemonstrasikan validitas secara umum dari arsitektur kontrol yang diajukan, dilakukan tiga eksperimen pada aktuator yang telah diimplementasikan *joint impedance control* berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi. Eksperimen ini terkait dengan aplikasi yang tipikal bagi *impedance control* yaitu: interaksi yang aman dan stabil dengan manusia, dan kontak dengan lingkungan yang tidak terduga.

Eksperimen yang pertama bertujuan untuk mengetahui performa dari *impedance control* dengan melakukan pengujian komparatif. Set eksperimen diberikan nilai *set-point* impedansi mekanik yang berbeda dengan mengatur *set-point* dari kekakuan dan redaman yang diinginkan lalu membandingkannya untuk memperoleh kesimpulan performa *impedance control* dari aktuator. Eksperimen yang kedua dilakukan untuk menguji akurasi dan keandalan dari *impedance control* ketika melakukan interaksi dengan manusia. Aktuator diberikan nilai kekakuan dan redaman tertentu, kemudian pengguna melakukan interaksi dengan aktuator dengan menggerak-gerakkan lengan dari set eksperimen. Respons dari aktuator ketika melakukan interaksi dengan manusia dicatat. Eksperimen ketiga dilakukan untuk menguji performa robot ketika menghadapi benturan yang tidak terduga dari lingkungan yang memiliki kekakuan tinggi. Aktuator diberikan nilai kekakuan dan redaman tertentu kemudian sebuah objek dengan kekakuan yang tinggi dibenturkan ke aktuator. Respons aktuator ketika mengalami benturan yang tidak terduga dicatat.

Model matematis diuji dengan membandingkan simulasi dengan hasil eksperimen. Model benda tegar pada persamaan 3.1

diberi *input* berupa trayektori posisi. Fungsi trayektori posisi  $\theta(t)$  diperoleh melalui regresi polinomial dengan orde 10. Regresi polinomial dilakukan di Matlab dengan menggunakan data eksperimen dari *impedance control*. Fungsi trayektori dinyatakan oleh persamaan 3.5.

$$\theta(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + \dots + b_{10}t^{10} \quad (3.5)$$

Di mana  $b_i$  adalah koefisien regresi polinomial yang diperoleh menggunakan Matlab. Fungsi trayektori dari posisi sudut tersebut kemudian didiferensialkan untuk memperoleh persamaan polinomial kecepatan sudut dan percepatan sudut. Ketiga fungsi trayektori yang telah diperoleh menjadi *input* bagi persamaan *inverse dynamics* dari sistem yang dinyatakan oleh persamaan 3.1.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

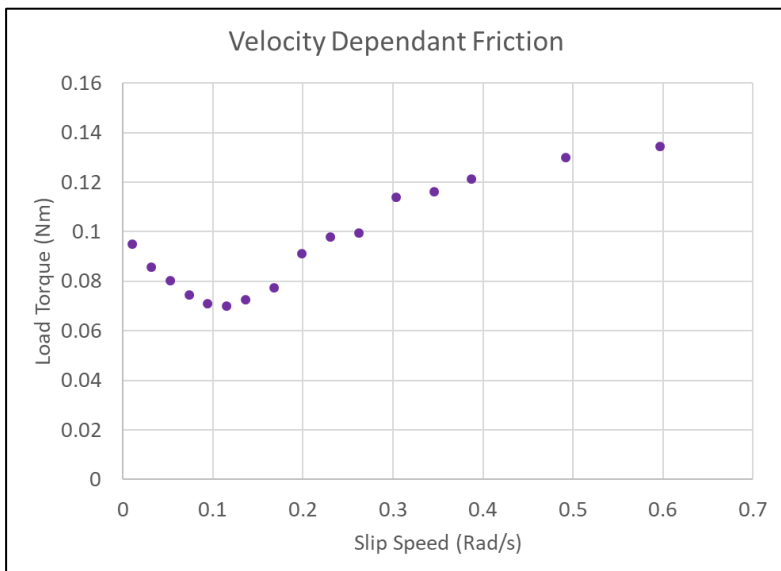
## BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil yang diperoleh dari eksperimen yang dilakukan dengan menggunakan set eksperimen.

### 4.1 Analisa Data

Data diperoleh dari hasil eksperimen yang dilakukan yaitu eksperimen dalam menentukan model dan parameter fisis dari sistem, dan pengujian dari algoritma kontrol yang diterapkan pada aktuator.

#### 4.1.1. Eksperimen Identifikasi Parameter Friksi



**Gambar 4.1** Data eksperimen *velocity dependant friction*

Pada eksperimen ini, aktuator diberikan step input berupa kecepatan sudut dan *output* yang diukur adalah torsi yang

dikeluarkan. Gambar 4.1 menunjukkan data yang diperoleh pada eksperimen ini.

Dari data eksperimen tersebut dilakukan proses identifikasi parameter dengan menggunakan Matlab untuk menentukan model friksi yang digunakan pada kompensasi friksi. Dilakukan komparasi terhadap tiga model friksi yaitu:

### **Model friksi *viscous* + *coulomb***

Model friksi ini menggabungkan dua fenomena friksi yang paling umum digunakan yaitu *viscous friction* dan *coulomb friction*. Model friksi ini dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$T_{vcf}(\dot{\theta}) = a_1\dot{\theta} + b_1 \quad (4.1)$$

### **Model friksi kurva Stribeck**

Pada model ini, selain fenomena *viscous friction* dan *coulomb friction*, model juga melibatkan fenomena efek Stribeck. Model friksi Stribeck memiliki keunggulan dapat mengaproksimasi friksi secara linear pada kecepatan tinggi dan eksponensial pada kecepatan rendah (yang konsisten terhadap observasi eksperimen yang dilakukan dalam penelitian ini). Model ini dinyatakan dengan persamaan berikut:

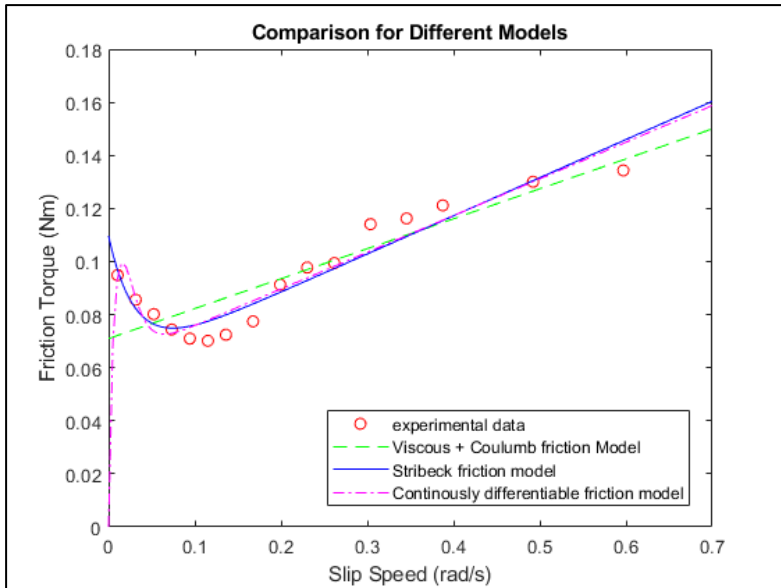
$$T_{sf}(\dot{\theta}) = a_2e^{-b_2\dot{\theta}} + c_2\dot{\theta} + d_2 \quad (4.2)$$

### ***Continuously differentiable friction model***

Model ini memasukkan fenomena friksi *viscous*, *coulomb*, statis, dan efek Stribeck. Model ini dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$T_{cdf}(\dot{\theta}) = a_3(\tanh(b_3\dot{\theta}) - \tanh(c_3\dot{\theta})) + d_3 \tan(e_3\dot{\theta}) + f_3\dot{\theta} \quad (4.3)$$

Hasil evaluasi ketiga model friksi yang dilakukan melalui proses *curve fitting* untuk menyamakan data eksperimen dengan model analitis ditunjukkan oleh Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Perbandingan antar model yang diuji.

Kualitas dari masing-masing model analitis dievaluasi secara komparatif. Tabel 4.1 menunjukkan kuantifikasi dari kualitas masing-masing model yang dinyatakan oleh besarnya *Normalized Root Mean Square Error* (NRMSE), *Final Prediction Error* (FPE), dan *Mean Square Error* (MSE).

**Tabel 4.1** Perbandingan antar model yang diuji.

Model Friksi	Fitness	FPE	MSE
Model Friksi Viscous + Coulomb	53,57%	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$9,51 \cdot 10^{-5}$
Model Friksi Kurva Stribeck	71,84%	$5,83 \cdot 10^{-5}$	$3,50 \cdot 10^{-5}$
<i>Continuously Differentiable Friction</i>	72,03%	$7,59 \cdot 10^{-5}$	$3,45 \cdot 10^{-5}$



Dari evaluasi tersebut diketahui bahwa model friksi *viscous + coulomb* memiliki kualitas yang paling rendah karena tidak tepat mengakomodir efek Stribeck pada kecepatan rendah. Model friksi kurva Stribeck dan *continuously differentiable friction model* memiliki kualitas yang serupa dan memiliki nilai *fitness* dan *error* yang hampir sama. Hal ini dikarenakan kedua model tersebut didasarkan pada fenomena friksi yang sama, namun dinyatakan dengan pendekatan model matematis yang berbeda. Model friksi kurva Stribeck memiliki kelemahan karena sifatnya yang diskontinyu dapat menimbulkan masalah ketika diterapkan pada kontroler yang kontinyu. Dalam kasus penelitian ini, *continuously differentiable friction model* memiliki keunggulan yang signifikan karena cocok untuk diterapkan pada kontroler kontinyu. Sehingga, dalam penelitian ini, *continuously differentiable friction model* dipilih sebagai model friksi pada kompensator friksi dari *joint-impedance control* dengan parameter fisis yang diperoleh sebagaimana ditunjukkan oleh tabel 4.2.

Dari hasil eksperimen dan evaluasi yang dilakukan, diperoleh model berikut sebagai kompensator friksi:

$$\tau_f(\dot{\theta}) = 1,112(\tanh(51,605 \cdot \dot{\theta}) - \tanh(48,053 \cdot \dot{\theta})) + 0,062 \cdot \tanh(221,460 \cdot \dot{\theta}) + 0,138 \cdot \dot{\theta} \quad (4.4)$$

**Tabel 4.2** Parameter yang diperoleh melalui *curve fitting*.

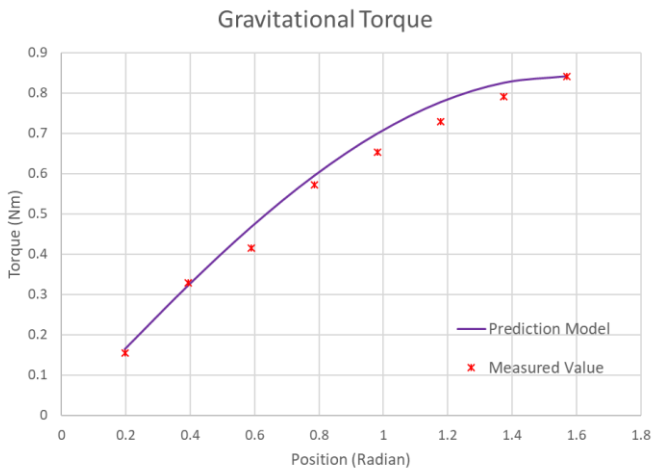
Parameter	Model Friksi		
	1	2	3
a	0,113	0,050	1,112
b	0,071	32,424	51,605
c	-	0,144	48,053
d	-	0,060	0,062
e	-	-	221,460
f	-	-	0,138

### 6.1.1. Eksperimen Identifikasi Parameter Gravitasi

Pada eksperimen ini aktuator diberikan step *input* berupa posisi sudut dan *output* yang diukur adalah torsi yang dikeluarkan. Tabel 4.3 menunjukkan data dari eksperimen yang dilakukan dan perbandingannya dengan model gravitasi yang digunakan.

**Tabel 4.3** Hasil eksperimen torsi gravitasi.

No.	Posisi (rad)	Posisi (derajat)	$\tau_m$ (Nm)	$\tau_m$ stiction (Nm)	Prediksi model (Nm)
1	0,195	11,25	0,250	0,155	0,164
2	0,393	22,50	0,438	0,328	0,322
3	0,589	33,75	0,526	0,416	0,467
4	0,785	45,00	0,682	0,572	0,595
5	0,982	56,25	0,763	0,654	0,700
6	1,178	67,50	0,838	0,729	0,777
7	1,374	78,75	0,901	0,791	0,825
8	1,571	90,00	0,951	0,841	0,841



**Gambar 4.3** Perbandingan model prediksi dan data eksperimen.

Berdasarkan eksperimen yang dilakukan, diperoleh model dengan RMSE sebesar 0.033 Nm dan *fitness* sebesar 95.14%. Gambar 4.3 menunjukkan grafik perbandingan antara model dan hasil eksperimen. Persamaan berikut merupakan model yang digunakan sebagai kompensator gravitasi:

$$G(\theta) = 0,841 \cdot \sin(\theta) \quad (4.5)$$

### 6.1.2. Perancangan Algoritma *Impedance Control*

Dari hasil eksperimen dan evaluasi diperoleh model beserta parameter fisis yang dibutuhkan dalam perancangan dan implementasi algoritma *impedance control*. Algoritma kontrol dibuat berdasarkan model yang diperoleh yaitu sebagai berikut:

$$\tau_u = K_d(\theta_d - \theta) + D_d \cdot \dot{\theta} + \tau_f(\dot{\theta}) + G(\theta) \quad (4.6)$$

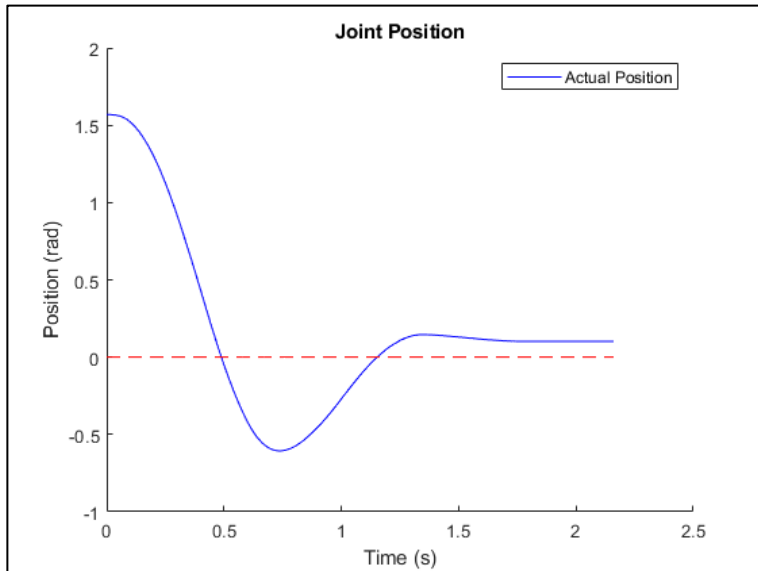
### 6.1.3. Eksperimen Pengujian Performa Kompensator Friksi dan gravitasi

Pada eksperimen ini dilakukan pengujian komparatif dari respon sistem tanpa *impedance control* ketika tidak diberi kompensator, dengan kompensator friksi saja, dan dengan kompensator gravitasi saja. Pada pengujian respon sistem tanpa kompensator dan kontrol, lengan aktuator dilepas dari posisi  $1/2\pi$  rad dan dibiarkan bergerak bebas. Diperoleh data pengujian sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 4.4.

Pada kondisi lengan dan aktuator bergerak bebas tanpa adanya sinyal kontrol dan kompensator sebagaimana yang ditunjukkan gambar 4.4, lengan bergerak dari simpangannya menuju ke titik setimbang karena dipengaruhi oleh gravitasi. Namun, gerakan lengan juga diredam oleh efek disipatif dari adanya friksi pada aktuator sehingga lengan tidak bergerak seperti sebuah pendulum. Pada akhirnya lengan akan diam pada posisi di dekat titik setimbang, tapi tidak tepat pada titik setimbangnya.

Untuk pengujian respon sistem dengan kompensator friksi saja. Aktuator diberikan sinyal kompensator friksi dengan *impedance control* yang dimatikan. Aktuator dilepas dari posisi

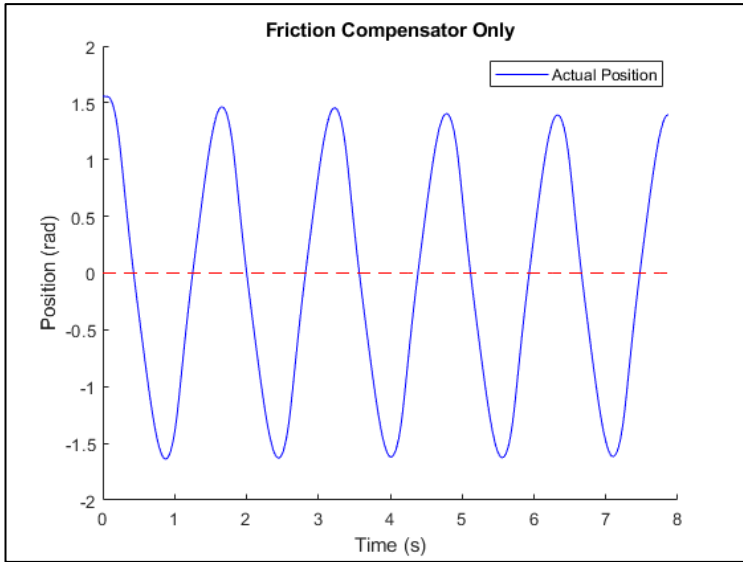
$1/2\pi$  rad dan dibiarkan bergerak bebas. Diperoleh data eksperimen seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5.



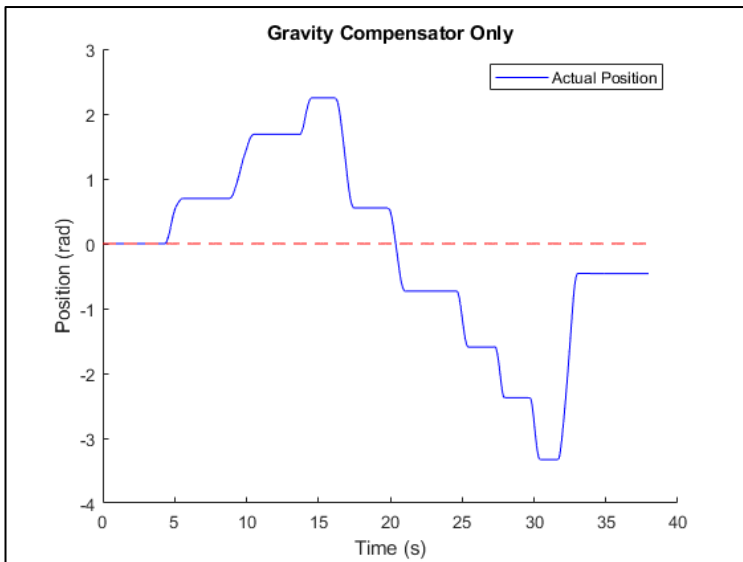
**Gambar 4.4** Respon sistem ketika bergerak bebas tanpa kontrol dan kompensator.

Dengan kompensator friksi, efek friksi dari aktuator dapat diminimalisir sehingga lengan dapat bergerak menyerupai gerakan pendulum dengan friksi yang kecil, sebagaimana ditunjukkan gambar 4.5. Lengan bergerak disekitar titik setimbangnya karena pengaruh gravitasi, kompensator friksi menyebabkan efek redaman oleh friksi terhadap gerakan menjadi sangat kecil.

Untuk pengujian respon sistem dengan kompensator gravitasi saja. Aktuator diberikan sinyal kompensator gravitasi dengan *impedance control* yang dimatikan. Lengan aktuator digerakkan secara manual. Diperoleh data eksperimen seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6.



**Gambar 4.5** Respon sistem dengan kompensator friksi saja.



**Gambar 4.6** Respon sistem dengan kompensator gravitasi saja.

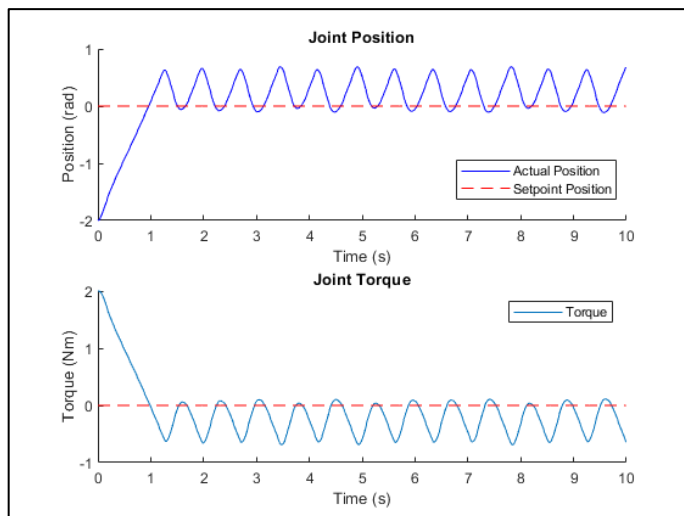
Penambahan kompensator gravitasi pada aktuator membuat aktuator dan lengan memiliki respon sebagaimana berada pada lingkungan dengan gravitasi 0. Gambar 4.6 menunjukkan lengan dan aktuator bergerak sesuai gerakan yang diberikan secara eksternal, dan berhenti ditempatnya ketika gerakan eksternal tersebut dihilangkan.

#### 6.1.4. Eksperimen Pengujian Performa *Joint-Impedance Control* dengan kompensasi friksi dan gravitasi

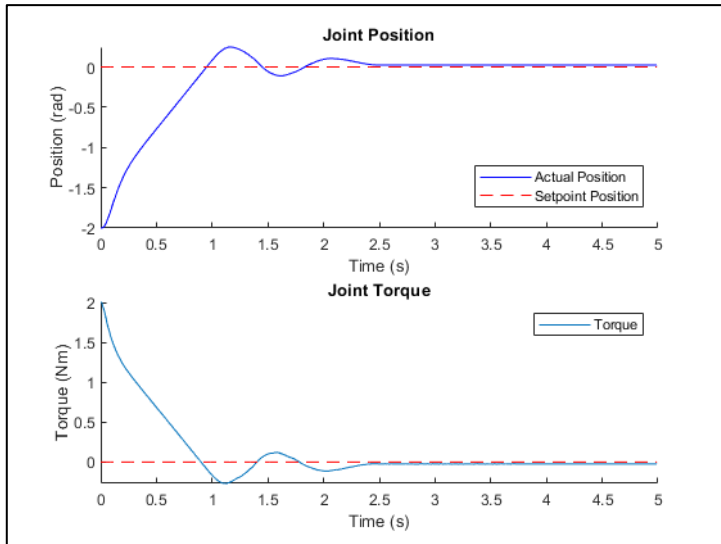
Pada eksperimen ini algoritma *impedance control* diberikan 3 *input* impedansi mekanik yang berbeda, kemudian respon aktuator dicatat. Tabel 4.4 menunjukkan input yang diberikan. Gambar 4.4 – 4.6 menunjukkan respon dari aktuator.

**Tabel 4.4** Input impedance control pada eksperimen uji performa

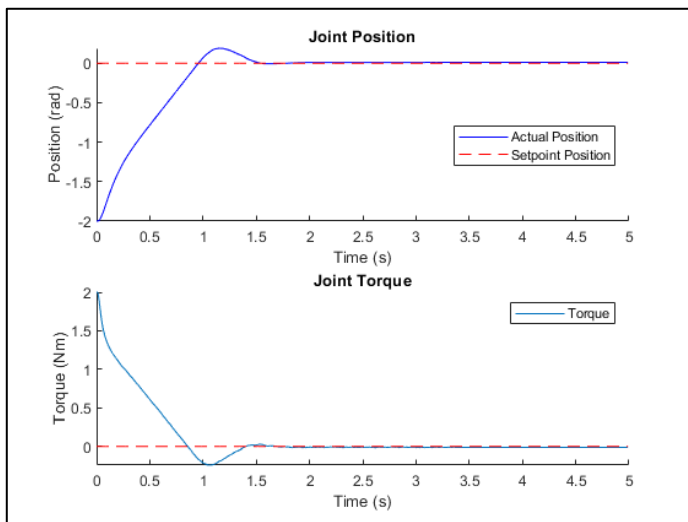
No.	Posisi	Kekakuan	Redaman
1	2 rad	1 Nm/rad	0 Nms/rad
2	2 rad	1 Nm/rad	0.05 Nms/rad
3	2 rad	1 Nm/rad	0.1 Nms/rad



**Gambar 4.7** Respon aktuator pada percobaan 1.  $K_d = 1$ ,  $D_d = 0$ .



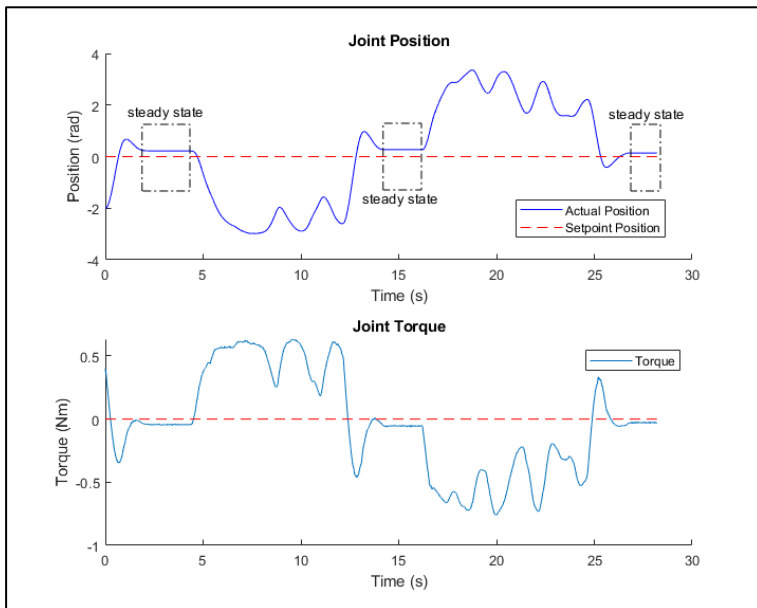
**Gambar 4.8** Respon aktuator pada percobaan 2.  $K_d = 1$ ,  $D_d = 0.05$ .



**Gambar 4.9** Respon aktuator pada percobaan 3.  $K_d = 1$ ,  $D_d = 0.1$ .

### 6.1.5. Eksperimen Interaksi Aktuator dengan Manusia

Pada eksperimen ini algoritma diberikan input impedansi mekanik tertentu yaitu  $K_d = 0.2$  dan  $D_d = 0.05$  dengan target posisi adalah 2 rad. Dilakukan interaksi antara aktuator dengan manusia dan respon dari aktuator dicatat. Respon dari aktuator selama melakukan interaksi dengan manusia ditunjukkan oleh gambar 4.10.



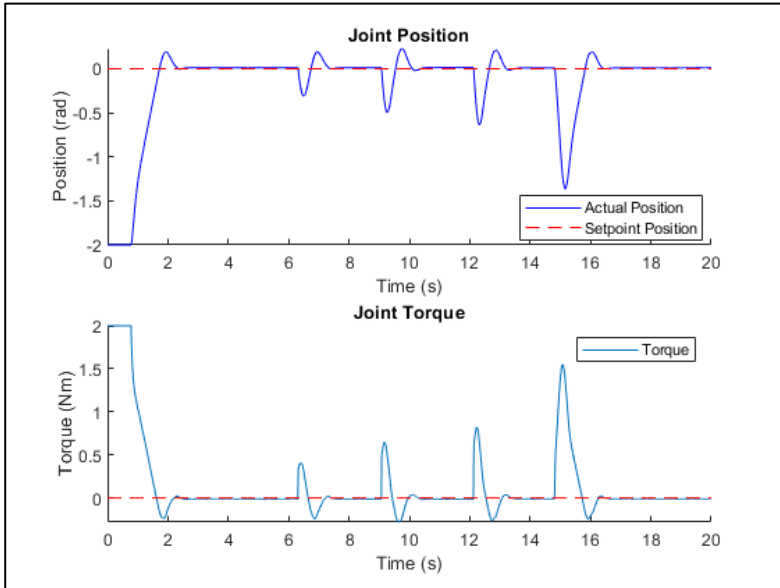
**Gambar 4.10** Respon aktuator ketika melakukan interaksi dengan manusia. Bagian pada grafik yang menyimpang dari setpoint menunjukkan ketika manusia melakukan interaksi dengan aktuator.

### 6.1.6. Eksperimen Interaksi Aktuator dengan Lingkungan yang tidak dikenal.

Pada eksperimen ini algoritma diberikan input impedansi mekanik tertentu yaitu  $K_d = 1 \text{ Nm/rad}$  dan  $D_d = 0.1 \text{ Nms/rad}$  dengan target posisi adalah 2 rad. Lengan aktuator dibenturkan



secara tidak terduga dengan objek yang memiliki kekakuan tinggi. Respon dari aktuator dicatat dan ditunjukkan oleh gambar 4.11



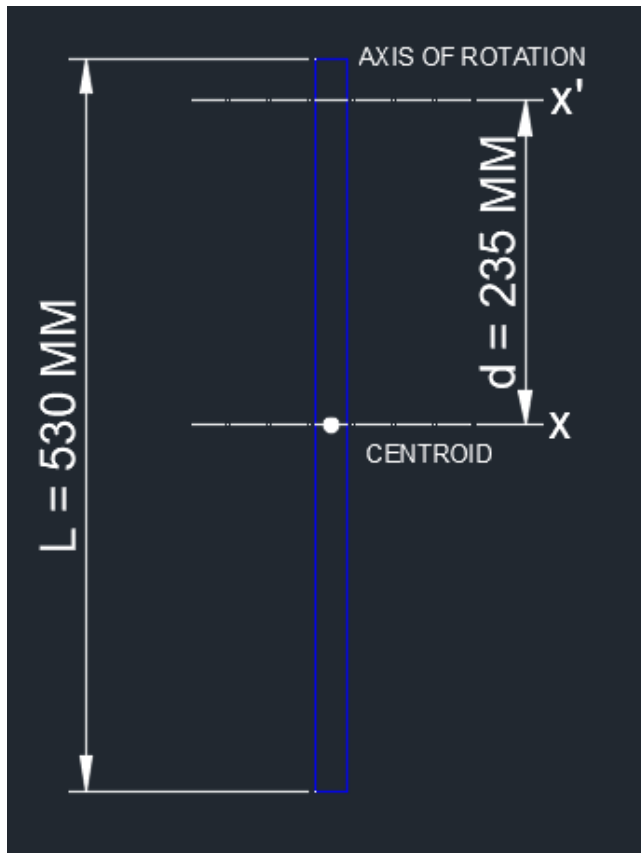
**Gambar 4.11** Respon aktuator ketika mengalami benturan yang tidak terduga. Spike pada grafik menunjukkan ketika aktuator mengalami benturan.

### 6.1.17. Evaluasi Model Matematis dengan Komparasi Simulasi dan Eksperimen

Untuk memperoleh parameter momen inersia dari persamaan 3.1, dilakukan perhitungan matematis langsung. Parameter yang dibutuhkan untuk menghitung momen inersia dan hasil perhitungan momen inersia dengan menggunakan persamaan 3.3 ditunjukkan oleh gambar 4.12 dan tabel 4.5.

Dengan memasukkan hasil perhitungan parameter momen inersia pada persamaan 3.1, diperoleh model benda tegar yang ditunjukkan oleh persamaan berikut

$$0.077\ddot{\theta} + \tau_f(\dot{\theta}) + G(\theta) = \tau(t) \quad (4.7)$$



**Gambar 4.12** Parameter dimensi lengan yang digunakan dalam perhitungan momen inersia.

**Tabel 4.5** Parameter momen inersia.

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Massa	m	0.980	Kg
Panjang	L	0.530	m
Centroid – sumbu putar	d	0.235	m
Momen inersia	M	0.077	$\text{Kg} \cdot \text{m}^2$

Model pada persamaan 4.7 dikombinasikan dengan model friksi dan gravitasi yang diperoleh pada subbab 4.1.1 dan 4.1.2 yaitu yang dinyatakan oleh persamaan 4.4 untuk model friksi dan persamaan 4.5 untuk model gravitasi. Model *inverse dynamics* sistem menjadi berikut

$$\begin{aligned} \tau(t) = & 0.077\ddot{\theta} + 1,112(\tanh(51,605 \cdot \dot{\theta}) - \tanh(48,053 \cdot \dot{\theta})) \\ & + 0,062 \cdot \tanh(221,460 \cdot \dot{\theta}) + 0,138 \cdot \dot{\theta} \\ & + 0,841 \cdot \sin(\theta) \end{aligned} \quad (4.8)$$

Simulasi dilakukan secara numerik dengan terlebih dahulu menetapkan fungsi trayektori sebagai variabel dari posisi sudut. Fungsi trayektori diperoleh melalui regresi polinomial dari data yang diperoleh dari percobaan respons aktuator dengan  $K_d = 1$ ,  $D_d = 0.05$ , yang ditunjukkan oleh gambar 4.8. Dari regresi polinomial tersebut, diperoleh fungsi trayektori posisi sudut. Fungsi tersebut diturunkan untuk memperoleh fungsi kelajuan sudut, dan diturunkan lagi untuk memperoleh fungsi percepatan sudut. Fungsi trayektori ditunjukkan oleh persamaan 4.9 – 4.11 dengan koefisien yang ditunjukkan oleh tabel 4.6.

$$\theta(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + \dots + b_{10} t^{10} \quad (4.9)$$

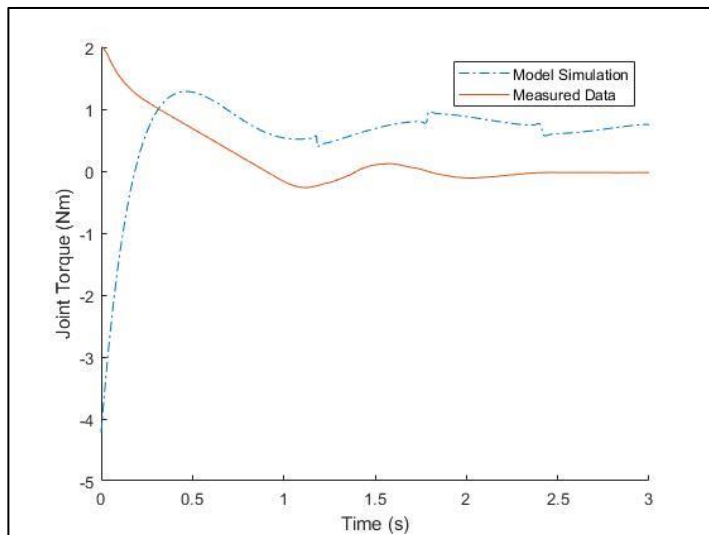
$$\dot{\theta}(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + \dots + b_9 t^9 \quad (4.10)$$

$$\ddot{\theta}(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 + \dots + b_8 t^8 \quad (4.11)$$

Dengan menjadikan fungsi trayektori sebagai *input* dari model *inverse dynamics*, diperoleh output torsi  $\tau(t)$  melalui simulasi matematis. Hasil simulasi dibandingkan dengan data eksperimen dan diperoleh data yang ditunjukkan oleh gambar 4.13 berikut. Melalui perbandingan antara simulasi model matematis dengan data eksperimen, diketahui bahwa model memiliki RMSE sebesar 0.808 Nm dengan *fitness* sebesar 64,36%.

**Tabel 4.6** Koefisien polinomial fungsi trayektori.

Parameter	$\theta(t)$	$\dot{\theta}(t)$	$\ddot{\theta}(t)$
b0	-0.010	-0.0962	-0.8658
b1	0.226	2.035645	16.28516
b2	-2.264	-18.115	-126.805
b3	12.591	88.13376	528.8025
b4	-42.482	-254.893	-1274.47
b5	89.136	445.6784	1782.714
b6	-114.434	-457.734	-1373.2
b7	85.203	255.6098	511.2196
b8	-34.223	-68.4461	-68.4461
b9	8.552	8.552233	-
b10	-0.229	-	-

**Gambar 4.13** Perbandingan simulasi model matematis dan data eksperimen.

## 6.2 Pembahasan

Agar robot dapat melakukan interaksi yang aman dan andal dengan manusia dan lingkungannya, dibutuhkan *compliant control*. *Compliant control* bisa diraih dengan menerapkan skema *joint impedance control* pada aktuator robot yang merupakan penggerak utama dari robot dengan melakukan kontrol terhadap gaya atau torsi dari interaksi robot dengan lingkungan eksternalnya.

Kontrol aktuator sangat dipengaruhi oleh efek dari distorsi linear yang disebabkan oleh friksi pada transmisi atau *gearbox* dari robot dan juga pengaruh dari gravitasi. Untuk memperoleh performa *joint impedance control* yang baik, perlu penerapan kompensator untuk meminimalisir efek non-linear dari friksi dan mengeliminasi pengaruh gravitasi pada sistem.

Rancang bangun algoritma *joint-impedance control* berbasis torsi dilakukan dengan mengasumsikan sistem sebagai benda tegar sehingga model dapat turunkan dari model umum benda tegar. Analisa matematis dalam penurunan model mengacu pada hukum dan asas dari mekanika klasik, dibahas pada subbab 2.2. Model yang digunakan dalam perancangan kompensator friksi mengacu pada fenomena friksi yang dibahas pada subbab 2.2. Model gravitasi yang digunakan pada kompensator gravitasi dibahas pada bab 2.4. Skema kontrol diturunkan berdasarkan model matematis untuk memperoleh suatu sistem massa-pega-*damp*er virtual dari sebuah sistem benda tegar, dibahas pada subbab 2.5.

Untuk menerapkan skema kontrol yang dirancang, dibuat sebuah set eksperimen berupa sistem benda tegar dengan dua *link* (termasuk penyangga), dan satu *joint* yang digerakkan oleh aktuator servomotor. Sistem benda tegar ini memiliki 1 DoF. Proses rancang bangun set eksperimen dibahas pada subbab 3.2.

Dalam proses rancang bangun algoritma kontrol, hal pertama yang dilakukan adalah identifikasi model dan parameter fisis dari sistem yang digunakan pada eksperimen. Karena algoritma kontrol yang diajukan membutuhkan kompensasi friksi, dalam penelitian

ini dilakukan identifikasi model melalui eksperimen. Eksperimen dilakukan untuk memperoleh data besarnya torsi yang dibutuhkan agar aktuator yang dipengaruhi oleh friksi dari gearbox dan lainnya dapat bergerak dengan kecepatan sudut tertentu. Data yang diperoleh dari eksperimen ini ditunjukkan oleh gambar 4.1. Data eksperimen yang diperoleh kemudian diolah dengan menggunakan *software* Matlab. Pengolahan data bertujuan untuk memperoleh model matematis yang dari distorsi friksi. Tiga model friksi yang dijabarkan pada subbab 6.1.1 diuji coba dengan menggunakan System Identification Toolbox pada Matlab untuk dilakukan *curve fitting* pada data hasil eksperimen. Dari pengolahan data di Matlab, diperoleh model matematis terbaik adalah *Continously Differentiable Friction* Model dengan *fitness* sebesar 72.03%. Perbandingan antar model friksi ditunjukkan oleh gambar 4.2. Model friksi yang diperoleh beserta parameter-parameter fisisnya digunakan dalam merancang kompensator friksi pada *joint impedance control* berbasis torsi.

Distorsi berikutnya yang diteliti adalah gravitasi. Eksperimen yang dilakukan untuk memodelkan distorsi gravitasi mengacu pada studi literatur mengenai penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Eksperimen dilakukan dengan mengukur torsi yang dibutuhkan untuk melakukan kontrol posisi pada beberapa titik posisi pengukuran. Hasil eksperimen ditunjukkan oleh tabel 4.3 dan evaluasi model friksi ditunjukkan oleh gambar 4.3. Model gravitasi yang diperoleh ditunjukkan oleh persamaan 4.5. Setelah dievaluasi, diketahui model friksi memiliki RMSE sebesar 0.033 Nm dengan *fitness* sebesar 95.14%.

Selanjutnya dilakukan perancangan algoritma *impedance control* dengan kompensator friksi dan gravitasi. Algoritma diterapkan pada mikrokontroler yang mengirimkan sinyal *input* kontrol torsi ke *servo amplifier*. Servo dan *servo amplifier* diasumsikan sebagai sumber torsi ideal sehingga *output* torsi dari servo diasumsikan selalu bernilai sama dengan *input* torsi yang dikirimkan oleh mikrokontroler. Perancangan algoritma *joint impedance control* berbasis torsi yang didasarkan pada model

benda tegar dibahas pada subbab 3.3 dan diperoleh algoritma dengan arsitektur yang ditunjukkan oleh gambar 3.22.

Dilakukan eksperimen untuk melakukan pengujian komparatif dari kompensator. Data yang diperoleh ditunjukkan oleh gambar 4.4, gambar 4.5, dan gambar 4.6. Pada percobaan tanpa kompensator dan kontrol, sistem bergerak bebas di bawah pengaruh gravitasi namun tidak bergerak seperti pendulum ideal dan berhenti tidak tepat pada titik setimbang karena efek friksi pada servo dan *gearbox*. Pada eksperimen dengan kompensator friksi, sistem dapat bergerak bebas seperti sebuah sistem pendulum yang ideal. Namun, terdapat sedikit penyimpangan yaitu *peak* pada posisi negatif lebih besar daripada *peak* pada posisi positif dengan selisih sebesar 0.08 rad. Hal ini dapat disebabkan oleh *error* pada model friksi. Pada pengujian dengan kompensator gravitasi saja, diperoleh respons dari sistem yang menyerupai pergerakan sistem pada lingkungan dengan gravitasi nol.

Pengujian algoritma *joint-impedance control* berbasis torsi dilakukan melalui tiga eksperimen. Eksperimen pertama adalah untuk menguji performa *impedance control* dengan melakukan pengambilan data atas respons dari aktuator dari 3 *input* impedansi mekanik yang berbeda. Pada percobaan pertama dengan hasil yang diperoleh ditunjukkan oleh gambar 4.4. Impedansi mekanik yang diinginkan adalah kekakuan 1Nm/rad dan redaman 0. respons yang diharapkan untuk impedansi mekanik tersebut adalah aktuator akan bersifat seperti pegas ideal tanpa adanya redaman. Hasil pengamatan atas respons aktuator telah menunjukkan bahwa servo aktuator telah bersifat pegas ideal, tampak dengan tidak adanya redaman pada *peak* dari osilasi. Namun, titik setimbang dari osilasi tidak jatuh tepat di tengah pada *setpoint* posisi sudut, melainkan meleset ke arah positif. Hal ini dapat disebabkan karena kurang akuratnya model atau parameter fisis yang digunakan. Pada percobaan kedua dengan algoritma kontrol diberi *input* impedansi mekanik kekakuan bernilai 1 Nm/rad dan redaman 0.05Nms/m. Diperoleh data sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.5. Respons servo telah mengalami redaman ditunjukkan pada responsnya yang bergerak dari transien menuju *steady state* dengan

*steady state error* sebesar 0.024. Pada percobaan ketiga algoritma kontrol diberi *input* impedansi mekanik dengan kekakuan bernilai 1Nm/rad dan redaman 0.05 Nms/rad. Diperoleh respons aktuator sebagaimana ditunjukkan gambar 4.6. Kali ini respons aktuator memiliki redaman yang lebih besar dari percobaan kedua dan memiliki *steady state error* sebesar 0.011 rad. Melalui ketiga eksperimen ini dapat disimpulkan bahwa respons aktuator telah menunjukkan bahwa algoritma kontrol dapat memberikan respon yang diinginkan dan terdapat *trade off* antara impedansi mekanik dengan akurasi posisi.

Pada eksperimen interaksi manusia dengan aktuator, diberikan *input* impedansi mekanik dengan kekakuan yang kecil yaitu  $K_d = 0.2 \text{ Nm/rad}$  dan  $D_d = 0.05 \text{ Nms/rad}$ . Lengan aktuator kemudian digerakkan oleh manusia dan dari gambar 4.10 terlihat bahwa meskipun lengan aktuator dapat digerakkan secara bebas oleh manusia, ia tetap dapat kembali ke posisi *set-point* dengan *steady state error* sebesar 0.218 rad. Hal ini menunjukkan algoritma *joint-impedance control* berbasis torsi dengan kompensasi friksi dan gravitasi. Pada eksperimen interaksi manusia dengan lingkungan, aktuator diberikan *input* impedansi mekanik dengan nilai kekakuan  $K_d = 1 \text{ Nm/rad}$  dan redaman  $D_d = 0.1 \text{ Nms/rad}$ . Lengan aktuator dibiarkan bergerak dari titik setimbang menuju *set-point* hingga berada pada kondisi *steady state* lalu dibenturkan dengan objek kaku sebanyak 4 kali dengan kekuatan yang berbeda. Dari respons yang dicatat, aktuator dapat meredam benturan tersebut dan kembali menuju *set-point*-nya.

Terakhir dilakukan perbandingan antara simulasi model matematis dengan data eksperimen. Fungsi trayektori yang diperoleh dari regresi polinomial terhadap trayektori dari salah satu hasil percobaan performa *impedance control*. Fungsi trayektori tersebut kemudian dijadikan *input* dari model *invers dynamics* dari sistem. Hasil perbandingan simulasi model matematis dengan data eksperimen ditunjukkan oleh gambar 4.13. Dari evaluasi diketahui bahwa model matematis memiliki RMSE sebesar 0,808 Nm



dengan *fitness* sebesar 64,36%. Error antara model matematis dan data eksperimen disebabkan oleh error gabungan dari identifikasi parameter fisis momen inersia, friksi, dan gravitasi, dan juga ketidaktelitian model.

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **7.1 Kesimpulan**

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

- a. Rancang bangun atas algoritma *impedance control* menunjukkan performa yang diinginkan dengan sifat *compliant* yang dapat melakukan interaksi yang aman antar aktuator dengan manusia. Skema *joint impedance control* dapat menghasilkan kontrol hubungan torsi dan pergerakan yang sesuai dengan karakteristik sistem massa-pegas-*damper* virtual yang diinginkan. Dari perbandingan simulasi model matematis dengan data eksperimen, ditemukan RMSE sebesar 0,808 Nm dan *fitness* sebesar 64,36%.
- b. Berdasarkan eksperimen dan pemodelan, diperoleh model friksi terbaik yaitu *Continously Differentiable Friction Model* dengan *fitness* sebesar 72.03%. Penerapan kompensator friksi pada sistem berhasil meminimalisir efek non-linear dari friksi.
- c. Berdasarkan eksperimen dan pemodelan, kompensator gravitasi dapat diterapkan dengan menggunakan model fungsi trigonometri dari potensial gravitasi tertinggi. Diperoleh model gravitasi dengan *fitness* sebesar 95.14%. Penerapan kompensator gravitasi pada sistem berhasil mengeliminasi efek dari gravitasi.

#### **7.2 Saran**

Adapun saran untuk penelitian selanjutnya adalah:

- a. Melakukan eksperimen dengan pengukuran yang lebih presisi dan lingkungan yang lebih terkontrol agar dapat memperoleh model dengan *fitness* yang lebih baik.
- b. Menggabungkan skema *impedance control* dengan skema kontrol modern lainnya seperti *adaptive control*, dll.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. F. N. Al-Shuka, S. Leonhardt, W.-H. Zhu, R. Song, C. Ding, and Y. Li, “Active Impedance Control of Bioinspired Motion Robotic Manipulators: An Overview,” *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2018, no. iii, pp. 1–19, 2018.
- [2] N. Hogan, “Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I—Theory,” *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 107, no. 1, p. 1, 1985.
- [3] N. Hogan, “Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II—Implementation,” *1984 Am. Control Conf.*, no. June 1983, pp. 304–313, 1984.
- [4] R. G. Bonitz and T. C. Hsia, “Internal Force-Based Impedance Control for Cooperating Manipulators 1 1 Introduction,” no. February, 1996.
- [5] R. J. Anderson and M. W. Spong, “Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators,” *IEEE J. Robot. Autom.*, vol. 4, no. 5, pp. 549–556, 1988.
- [6] J. J. Gonzalez and G. R. Widmann, “A Force Commanded Impedance Control Scheme for Robot with Hard Nonlinearities,” vol. 3, no. 4, pp. 398–408, 1995.
- [7] G. Liu and A. A. Goldenberg, “Robust hybrid impedance control of robot manipulators via a tracking control method,” *IEEE/RSJ/GI Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 3, pp. 1594–1601, 1994.
- [8] W. H. Zhu and J. De Schutter, “Experimental verifications of virtual-decomposition-based motion/force control,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 18, no. 3, pp. 379–386, 2002.
- [9] A. Albu-Schäffer, C. Ott, U. Frese, and G. Hirzinger, “Cartesian impedance control of redundant robots: Recent results with the DLR-Light-Weight-Arms,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, vol. 3, pp. 3704–3709, 2003.
- [10] B. Heinrichs, N. Sepehri, and A. B. Thornton-Trump, “Position-Based Impedance Control of an Industrial Hydraulic Manipulator,” *IEEE Control Syst.*, vol. 17, no. 1,

- pp. 46–52, 1997.
- [11] M. Schappler, J. Vorndamme, A. Tödtheide, D. C. Conner, O. Von Stryk, and S. Haddadin, “Modeling, identification and joint impedance control of the atlas arms,” in *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2015*, vol. 2015-Decem, pp. 1052–1059.
  - [12] M. Prats, S. Wieland, T. Asfour, A. P. Del Pobil, and R. Dillmann, “Compliant interaction in household environments by the armar-iii humanoid robot,” *2008 8th IEEE-RAS Int. Conf. Humanoid Robot. Humanoids 2008*, pp. 475–480, 2008.
  - [13] A. Bicchi *et al.*, “Physical human-robot interaction: Dependability, safety, and performance,” *Int. Work. Adv. Motion Control. AMC*, vol. 1, pp. 9–14, 2008.
  - [14] J. Heinzmann and A. Zelinsky, “Safe control of human-friendly robots,” *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, vol. 2, pp. 1020–1025, 1999.
  - [15] Y. Hirata, A. Hara, and K. Kosuge, “Motion control of passive intelligent walker using servo brakes,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 23, no. 5, pp. 981–990, 2007.
  - [16] R. Gassert and V. Dietz, “Rehabilitation robots for the treatment of sensorimotor deficits: A neurophysiological perspective,” *J. Neuroeng. Rehabil.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–15, 2018.
  - [17] R. Meziane, M. J. D. Otis, and H. Ezzaidi, “Human-robot collaboration while sharing production activities in dynamic environment: SPADER system,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 48, no. December 2015, pp. 243–253, 2017.
  - [18] M. H. Raibert and J. J. Craig, “Hybrid Position/Force Control of Manipulators,” *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 103, no. 2, p. 126, 2009.
  - [19] H. Liu, Y. C. Liu, M. Jin, K. Sun, and J. B. Huang, “An experimental study on Cartesian impedance control for a joint torque-based manipulator,” *Adv. Robot.*, vol. 22, no. 11, pp. 1155–1180, 2008.

- [20] F. Almeida, A. Lopes, and P. Abreu, "Force-Impedance Control: a new control strategy of robotic manipulators," *Control*, 1999.
- [21] R. C. Luo, C. Y. Yi, and Y. W. Perng, "Gravity compensation and compliance based force control for auxiliary easiness in manipulating robot arm," in *8th Asian Control Conference (ASCC)*, 2011, pp. 1193–1198.
- [22] Z. CHEN, N. Y. LIU, T. WIMBÖCK, S. FAN, and H. LIU, "EXPERIMENTAL EVALUATION OF CARTESIAN AND JOINT IMPEDANCE CONTROL WITH ADAPTIVE FRICTION COMPENSATION FOR THE DEXTEROUS ROBOT HAND DLR-HIT II," *Int. J. Humanoid Robot.*, vol. 08, no. 04, pp. 649–671, 2012.
- [23] C. W. Kennedy and J. P. Desai, "Modeling and control of the Mitsubishi PA-10 robot arm harmonic drive system," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, vol. 10, no. 3, pp. 263–274, 2005.
- [24] S.-H. Suh, *Theory and design of CNC systems*. 2008.
- [25] J. F. Gieras, "Permanent Magnet Motor Technology," *J. Chem. Inf. Model.*, 2013.
- [26] L. S. and B. Siciliano, "Modelling and Control of Robot Manipulators," *Meas. Sci. Technol.*, 2000.
- [27] J. J. E. Slotine and W. Li, "ON THE ADAPTIVE CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS.," *Int. J. Rob. Res.*, 1987.
- [28] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems, Third Edition*. 2002.
- [29] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, *Robot Dynamics and Control, 2nd Edition*. CRC Press, 2004.
- [30] M. W. Walker and D. E. Orin, "Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Manipulators," *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 104, no. September 1982, pp. 205–211, 1982.
- [31] C. H. An, C. G. Atkeson, and J. M. Hollerbach, "Estimation of Inertial Parameters of Rigid Body Links of Manipulators," 1986.
- [32] B. Armstrong, O. Khatib, and J. Burdick, "The explicit

- dynamic model and inertial parameters of the PUMA 560 arm,” in *Proceedings. 1986 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1986, vol. 3, pp. 510–518.
- [33] L. Ljung, “From data to model: a guided tour,” in *International Conference on Control '94*, 1994, vol. 1994, no. 389, pp. 422–430.
- [34] S. X. Tian and S. Z. Wang, “Dynamic modeling and simulation of a manipulator with joint inertia,” *Commun. Comput. Inf. Sci.*, vol. 86 CCIS, pp. 10–16, 2011.
- [35] Y. Zhang, S. Finger, and B. Stephannie, “Introduction to Mechanisms,” *Carnegie Mellon University*, 2010. [Online]. Available: <https://www.cs.cmu.edu/~rapidproto/mechanisms/chpt4.html>. [Accessed: 17-Jan-2020].
- [36] M. Arora and T. Kaur, “Modeling of One Link Robot using Friction Compensator,” vol. 4333, pp. 216–219, 2011.
- [37] J. T. Gravdahl, “Friction Problems in Servomechanisms: Modeling and Compensation Techniques,” *Dep. Eng. Cybern. Nor. Univ. Sci. Technol. Trondheim*, pp. 1–38, 1998.
- [38] C. Makkar, W. E. Dixon, W. G. Sawyer, and G. Hu, “A new continuously differentiable friction model for control systems design,” *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, vol. 1, pp. 600–605, 2005.
- [39] P. Tomei, “Adaptive PD Controller for Robot Manipulators,” *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 7, no. 4, pp. 565–570, 1991.
- [40] A. De Luca and S. Panzieri, “A simple iterative scheme for learning gravity compensation in robot arms,” *Proc. Ann. Conf. ANIPLA*, 1992.
- [41] A. De Luca, “3-Dynamic model of robots : Lagrangian approach,” 2016.
- [42] STMicroelectronics, “Discovery kit with STM32F407VG MCU Introduction,” no. May. 2013.
- [43] Mitsubishi, “J2-Super Series MR-J2S- A SERVO AMPLIFIER.”

## LAMPIRAN

### PROGRAM MATLAB IDENTIFIKASI FRIKSI

```
u = load('u.txt');
Y = load('Y.txt');

data = iddata(Y, u, 1);

%-----

FileName      = 'viscous_coulumb_m'; % File describing the
model structure.
Order         = [1 1 0]; % Model orders [ny nu nx].
Parameters    = {[0.1; 0.015]}; % Initial parameters.
InitialStates = []; % Initial initial states.
Ts           = 0; % Time-continuous system.
fm1 = idnlgrey(FileName, Order, Parameters, InitialStates,
Ts, ... 'Name', 'Viscous plus Coulumb friction model',
... 'InputName', 'Slip speed', 'InputUnit', 'rad/s', ...
'OutputName', 'Friction torque', 'OutputUnit', 'Nm', ...
'TimeUnit', 's');
fm1 = setpar(fm1, 'Minimum', {zeros(5, 1)}); % All
parameters must be >= 0.

%-----

FileName      = 'stribeck_m'; % File describing the
model structure.
Order         = [1 1 0]; % Model orders [ny nu
nx].
%Parameters   = {[0.20; 90; 11; 0.12; 110; 0.015]}; %
Initial parameters.
Parameters    = {[0.20; 90; 11; 0.12]}; % Initial
parameters.
InitialStates = []; % Initial initial
states.
Ts           = 0; % Time-continuous
system.
fm2 = idnlgrey(FileName, Order, Parameters, InitialStates,
Ts, ... 'Name', 'Stribeck friction model',
... 'InputName', 'Slip speed', 'InputUnit', 'rad/s',...
'OutputName', 'Friction torque', 'OutputUnit', 'Nm', ...
'TimeUnit', 's');
fm2 = setpar(fm2, 'Minimum', {zeros(5, 1)}); % All
parameters must be >= 0.

%-----
```



```

FileName      = 'friction_m';           % File describing the
model structure.
Order         = [1 1 0];               % Model orders [ny nu
nx].
Parameters    = {[0.20; 90; 11; ...    % Initial parameters.
                  0.12; 110; 0.015]};
InitialStates = [];                   % Initial initial
states.
Ts            = 0;                     % Time-continuous
system.
fm3 = idnlgrey(FileName, Order, Parameters, InitialStates,
Ts, ... 'Name', 'Continuously Differentiable Friction
model',... 'InputName', 'Slip speed', 'InputUnit', 'm/s',
... 'OutputName', 'Friction force', 'OutputUnit', 'N', ...
'TimeUnit', 's');
fm3 = setpar(fm3, 'Minimum', {zeros(5, 1)}); % All
parameters must be >= 0.

%-----

set(gcf, 'DefaultLegendLocation', 'southeast');
opt = nlgreyestOptions('Display', 'on');
opt.SearchOptions.MaxIterations = 50;
opt.SearchOptions.FunctionTolerance = eps;
opt.EstimateCovariance = false;

fm1 = nlgreyest(fm1, data, opt);
fm2 = nlgreyest(fm2, data, opt);
fm3 = nlgreyest(fm3, data, opt);

%compare(data, fm1, fm2, fm3);

v = [0:0.005:0.7];
g1 = fm1.Parameters.Value;
g2 = fm2.Parameters.Value;
g3 = fm3.Parameters.Value;
f1 = g1(1)*v+g1(2);
f2 = g2(1) * exp(-g2(2)*v) + g2(3)*v + g2(4);
f3 = g3(1)*(tanh(g3(2)*v)-tanh(g3(3)*v)) +
g3(4)*tanh(g3(5)*v) + g3(6)*v;

figure('Name', 'Comparison for Different Models');
plot(u, Y, 'or');
hold on
plot(v, f1, '--g');
plot(v, f2, '-b');
plot(v, f3, '-.m');

```

```

title('Comparison for Different Models');
xlabel('Slip Speed (rad/s)');
ylabel('Friction Torque (Nm)');
legend('experimental data','Viscous + Coulumb friction
Model', 'Stribeck friction model', 'Continuously
differentiable friction model');

function [dx, f] = viscous_coulumb_m(t, x, v, g, varargin)
%Nonlinear friction model with Coulomb and viscous
f = g(1)*v + g(2);
% Static system; no states.
dx = [];

function [dx, f] = stribeck_m(t, x, v, g, varargin)
%FRICITION_M Nonlinear friction model with Stribeck, Coulomb
and viscous
% dissipation effects.
% Output equation.
f = g(1) * exp(-g(2)*v) + g(3)*v + g(4);
% Static system; no states.
dx = [];

function [dx, f] = friction_m(t, x, v, g, varargin)
%FRICITION_M Nonlinear friction model with Stribeck, Coulomb
and viscous
% dissipation effects.
% Output equation.
f = g(1)*(tanh(g(2)*v(1))-tanh(g(3)*v(1))) +
g(4)*tanh(g(5)*v(1)) + g(6)*v(1);
% Static system; no states.
dx = [];

```

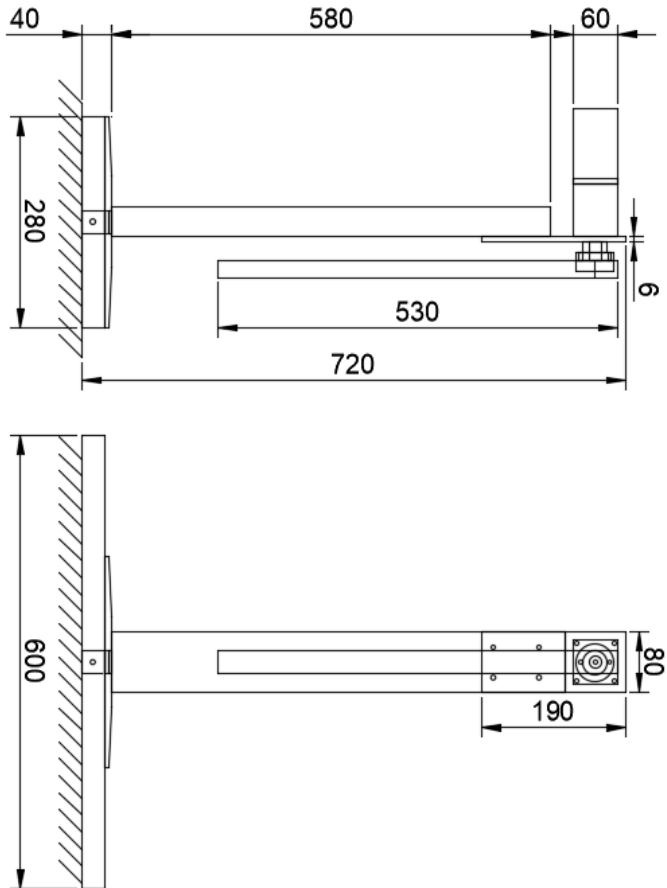


## LAMPIRAN 2 SPESIFIKASI SERVO AMPLIFIER

Servo Amplifier MR-J2S-□		10A	20A	40A	60A	70A	100A	200A	350A	500A	700A	11KA	15KA	22KA	10A1	20A1	40A1		
Power supply	Voltage/frequency	3-phase 200 to 230VAC, 50/60Hz or 1-phase 230VAC, 50/60Hz											3-phase 200 to 230VAC, 50/60Hz					1-phase 100 to 120VAC 50/60Hz	
	Permissible voltage fluctuation	3-phase 200 to 230VAC: 170 to 253VAC 1-phase 230VAC: 207 to 253VAC											3-phase 170 to 253VAC					1-phase 85 to 127VAC	
	Permissible frequency fluctuation	Within ±5%																	
	Power supply capacity	Refer to section 12.2 Refer to section 12.5																	
Inrush current	Sine-wave PWM control, current control system																		
Control system	Built-in																		
Dynamic brake	Built-in											External option			Built-in				
Protective functions	Overcurrent shut-off, regenerative overvoltage shut-off, overload shut-off (electronic thermal relay), servo motor overheat protection, encoder error protection, regenerative error protection, undervoltage, instantaneous power failure protection, overspeed protection, excessive error protection																		
	Max. input pulse frequency	500kpps (for differential receiver), 200kpps (for open collector)																	
	Command pulse multiplying factor	Electronic gear A: 1 to 65535 • 131072 B: 1 to 65535, 1/50 < A/B < 500																	
	In-position range setting	0 to ± 10000 pulse (command pulse unit)																	
Error excessive	(Note) ± 2.5 revolutions																		
Torque limit	Set by parameter setting or external analog input (0 to +10VDC/maximum torque)																		
Position control mode																			

Speed control mode		Speed control range		Analog speed command 1: 2000, internal speed command 1: 5000												
Analog speed command input		0 to $\pm 10$ VDC / Rated speed														
Speed fluctuation ratio		$\pm 0.01\%$ or less (load fluctuation 0 to 100%) 0% (power fluctuation $\pm 10\%$ ) $\pm 0.2\%$ or less (ambient temperature $25^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ ( $69^{\circ}\text{F}$ to $95^{\circ}\text{F}$ )), when using analog speed command														
Torque limit		Set by parameter setting or external analog input (0 to $\pm 10$ VDC/maximum torque)														
Torque control mode	Analog torque command input		0 to $\pm 8$ VDC / Maximum torque (input impedance 10 to 12k $\Omega$ )													
	Speed limit		Set by parameter setting or external analog input (0 to $\pm 10$ VDC/Rated speed)													
Structure		Self-cooled, open (IP00)		Force-cooling, open (IP00)												
Ambient temperature	In operation		0 to $+55$ (non-freezing)													
	In storage		$32$ to $+131$ (non-freezing)													
	In operation		$-20$ to $+65$ (non-freezing)													
	In storage		$-4$ to $+149$ (non-freezing)													
Ambient humidity		90%RH or less (non-condensing)														
Ambient		Indoors (no direct sunlight)														
Altitude		Free from corrosive gas, flammable gas, oil mist, dust and dirt														
Vibration		Max. 1000m (3280ft) above sea level														
		5.9 [m/s <sup>2</sup> ] or less														
		19.4 [ft/s <sup>2</sup> ] or less														
Mass	[kg]		0.7	1.1	1.7	2.0	2.0	4.9	15	16	16	20	0.7	0.7	1.1	
	[lb]		1.5	1.5	2.4	2.4	3.75	3.75	4.4	4.4	10.8	33.1	35.3	44.1	1.5	1.5

### LAMPIRAN 3 DESAIN MEKANIK SET EKSPERIMEN



\*Ukuran dalam mm



## LAMPIRAN 4

### PROGRAM KONTROL PADA MIKROKONTROLER

```
#define mcp4725addr 0xC0 //define MCP4725 I2C Address
#define M_PI 3.14159265358979323846
```

```
uint16_t adcout;
uint8_t i2cbuff[3];
uint16_t vOut = 0;
int32_t enc_count = 0;
```

```
uint16_t pid_err;
uint16_t position_setpoint;
```

```
int position_reached = 0;
```

```
char toprint[9];
char pAng[12];
char pTick[8];
char pForce[12];
```

```
double lAng =0; //previous angular position
double ang =0; //current angular position
double vAng = 0; //angular velocity
int lEnc = 0; //previous enc
```

```
double Tf;
double Tg;
```

```
int tick;
int tick10;
int ticksw = 0;
```

```
double set_point = 2;
double desired_stiffness = 1;
double desired_damping = 0.1;
```

```
double gcomv;
double fcomv;
double iconv;
```

```
while (1)
{
    double compensator = 0;
    gcomv = gravity_compensator(ang, vAng);
    fcomv = friction_compensator(vAng);

    compensator = gcomv + fcomv;
```



```

        iconv = impedance_control(set_point,
desired_stiffness, desired_damping);

        drive_torque(compensator);
        drive_torque(compensator + iconv);
    }

#define r1 1.1123
#define r2 51.6048
#define r3 48.0532
#define r4 0.0620
#define r5 221.4598
#define r6 0.1382
#define tf_factor 0.7
#define tf_offset 0
double friction_compensator(double angular_velocity)
    {
        double v = angular_velocity;

        double vr2 = r2 * v;
        double vr3 = r3 * v;
        double vr5 = r5 * v;
        double vr6 = r6 * v;
        Tf = (r1 * (tanh(vr2) - tanh(vr3))) + (r4
* tanh(vr5)) + vr6;

        Tf = (Tf + tf_offset) * tf_factor;
        return Tf;
    }
#define gcons 0.8413
#define stiction 0.101
#define tg_factor 0.7
double gravity_compensator(double angular_position, double
angular_velocity)
    {
        double sin_ang = sin(angular_position);
        Tg = gcons * sin_ang;
        if(sin_ang >= -0.04 && sin_ang <= 0.04)
            {
                if(angular_velocity >= -0.04 &&
angular_velocity <= 0.04)
                    {Tg = Tg + copysign(stiction, sin_ang);}
            }
        Tg = Tg * tg_factor;
        return Tg;
    }

```

```
double impedance_control(double Ad, double Kd, double Dd)
{
    double error = Ad - ang;
    double Td = Kd*error - Dd*vAng;
    return Td;
}
```





## **BIODATA PENULIS**

Penulis bernama lengkap Edo Kesuma Putra, dilahirkan di Batam pada tanggal 31 Maret 1997, merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Supriono dan Ibu Yunahara. Penulis menyelesaikan pendidikannya di SD Negeri 11 Sagulung – Batam pada tahun 2009, SMP Negeri 3 Batam pada tahun 2012, dan SMA Negeri 1 Batam pada tahun 2015. Setelah lulus dari Sekolah Menengah Atas, penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, pada Departemen Teknik Fisika – Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem di tahun 2015, dan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada tahun 2020. Selama menjalankan pendidikan di ITS, selain aktif pada kegiatan akademik, penulis juga aktif di Tim Robot ITS khususnya pada Tim ABU ROBOCON ITS (2015-2019), dengan total partisipasi pada 9 kontes robot tingkat regional, nasional, dan internasional yang diantaranya adalah Kontes Robot Indonesia dan ABU Asia-Pacific Robot Contest. Untuk kritik, saran atau diskusi mengenai penelitian tugas akhir ini, penulis dapat dihubungi melalui email: [edo.kesuma@outlook.co.id](mailto:edo.kesuma@outlook.co.id).