



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE141599**

**IMPLEMENTASI PUSAT TEKANAN (COP) UNTUK  
KONTROL KESEIMBANGAN POSTUR PADA ROBOT  
HUMANOID**

**Muhammad Arifin**  
**NRP 2213100066**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng.**  
**Muhtadin, ST., MT.**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**  
**Fakultas Teknologi Elektro**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE141599**

**IMPLEMENTATION OF CENTER OF PRESSURE (COP)  
FOR POSTURE BALANCE CONTROL ON HUMANOID  
ROBOT**

**Muhammad Arifin  
NRP 2213100066**

**Supervisor  
Dr. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng.  
Muhtadin, ST., MT.**

**ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Implementasi Pusat Tekanan (CoP) Untuk Kontrol Keseimbangan Postur Pada Robot Humanoid**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2017

Muhammad Arifin  
NRP. 2213100066

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

**IMPLEMENTASI PUSAT TEKANAN (COP) UNTUK KONTROL  
KESEIMBANGAN POSTUR PADA ROBOT HUMANOID**

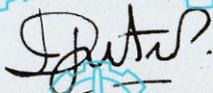
**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada

Bidang Studi Elektronika  
Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



Dr. Ir. Dioko Purwanto, M.Eng.  
NIP. 196512111990021002

Dosen Pembimbing II



Muhtadin, ST., MT.  
NIP. 198106092009121003



*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## ABSTRAK

Nama Mahasiswa : Muhammad Arifin  
Judul Tugas Akhir : Implementasi Pusat Tekanan (CoP) Untuk Kontrol Keseimbangan Postur Pada Robot Humanoid  
Pembimbing : 1. Dr. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng.  
2. Muhtadin, ST., MT.

Dalam perancangan robot humanoid, hal dasar yang perlu diperhatikan agar robot dapat melakukan pergerakan permainan sepak bola secara baik adalah pada bagian postur berdiri dan keseimbangan robot. Postur berdiri robot yang tepat akan menjadi parameter dalam perencanaan pergerakan robot dan juga sebagai penentuan keseimbangan robot. Untuk mendapatkan hal tersebut dapat diketahui dari nilai posisi *Zero Moment Point* (ZMP) pada robot. Salah satu cara untuk mengetahui ZMP adalah dengan mencari pusat tekanan (CoP) dengan menempatkan sensor tekanan pada alas kaki robot. Data informasi tersebut akan diperhitungkan hingga didapatkan posisi pusat tekanan dalam bentuk koordinat kartesian yang digunakan untuk penentuan postur berdiri dan keseimbangan robot. Robot dikatakan berada di posisi yang seimbang apabila berada di koordinat (0,0), yaitu tepat berada di pusat gravitasi robot. Robot humanoid yang dirancang dalam Tugas Akhir ini memiliki tinggi robot sebesar 843.94 mm dengan 20 jumlah derajat kebebasan. Pengujian dalam penelitian ini untuk mengetahui respon robot dalam pembangkitan postur berdiri dan keseimbangan robot. Pada pembentukan awal postur berdiri robot didapatkan data posisi pusat tekanan koordinat (-56,24) yang berada di kuadran II. Posisi tersebut menandakan bahwa robot berada di kondisi miring ke kiri dan ke depan. Dengan adanya koreksi dari posisi pusat tekanan, didapatkan postur berdiri baru dengan posisi pusat tekanan berada di koordinat (-5,4) yang mendekati posisi seimbang robot. Pada pengujian kemiringan robot, robot dapat bertahan berdiri sampai pada sudut kemiringan  $\pm 50$  derajat.

Kata kunci : robocup, robot humanoid, keseimbangan, *Zero Moment Point*, Pusat Tekanan

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## **ABSTRACT**

*Name* : Muhammad Arifin  
*Title* : *Implementation of Center of Pressure (CoP)  
for Posture Balance Control on Humanoid  
Robot*  
*Advisors* : 1. Dr. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng.  
2. Muhtadin, ST., MT.

*In the design of humanoid robots, the basic thing to note in order for the robot to perform the movement of soccer games well is on the stand-up posture and the balance of the robot. Appropriate posture of robot will be a parameter in the planning of robot movement and also as a determination of robot balance. To get it can be known from the position of Zero Moment Point (ZMP) on the robot. One way to find out ZMP is to look for a pressure center (CoP) by placing a pressure sensor on robot footstep. The information data will be calculated until the pressure center position is obtained in the form of cartesian coordinates used for the determination of standing posture and robot balance. Robots are in a balanced position when it has coordinates (0,0), which is exactly in the center of gravity of the robot. Humanoid robot designed in this Final Project has a robot height of 843.94 mm with 20 degrees of freedom. Tests in this final project to determine the robot response in the generation of standing posture and robot balance. In the initial formation of robot standing posture data center position of pressure is in coordinate (-56,24) in quadrant II. The position indicates that the robot is in a tilted condition to the left and forward. With the correction from the position of the center of pressure, a new standing posture with the center position of the pressure is located at the coordinates (-5.4) approaching the robot's balanced position. In robotic slope testing, the robot can survive standing up to a  $\pm 50$  degree angle.*

*Keyword* : *robocup, robot humanoid, balance, Zero Moment Point, Center of Pressure*

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan berkah, rahmat, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Tugas akhir ini diusulkan sebagai lanjutan dari penelitian tentang robot humanoid untuk sepak bola dan sebagai prasyarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik dari Departemen Teknik Elektro ITS. Penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Keluarga penulis, khususnya bapak dan ibu yang senantiasa memberikan dukungan baik dukungan material maupun non material.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Bapak Dr. Ir. Djoko Purwanto, M.Eng. dan Bapak Muhtadin, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan motivasi, ilmu dan saran serta bantuan dalam penelitian ini.
4. Bapak ibu dosen pengajar Departemen Teknik Elektro, khususnya bidang studi Elektronika.
5. Seluruh teman-teman penulis terutama teman-teman angkatan e-53 dan laboratorium B202.
6. Seluruh teman-teman beserta dosen pembimbing Tim Robotika ITS khususnya untuk tim ICHIRO.
7. Kontrakan Robot, Kita Keren! yang selalu menemani dan berbagi hal dalam pengerjaan tugas akhir bersama
8. Nevia Octa Permatasari yang selalu senantiasa memberikan dukungan, motivasi dan tempat berbagi hal baik suka dan duka selama proses pengerjaan tugas akhir ini .

Kesempurnaan hanya milik Allah SWT, penyusunan tugas akhir ini tentu masih banyak kekurangan. Untuk itu penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
<i>ABSTRACT</i> .....	iii
KATA PENGANTAR .....	v
DAFTAR ISI.....	vii
<i>CONTENTS</i> .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL.....	xix

### BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan .....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi .....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi dan Manfaat .....	5

### BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Robot Humanoid .....	7
2.2 Robocup .....	8
2.3 Kinematika Robot .....	9
2.4 Zero Moment Point .....	10
2.5 Keseimbangan Robot .....	10
2.6 Metode Pusat Tekanan .....	11
2.7 Regresi dan Interpolasi.....	13
2.8 Kalman Filter.....	14
2.9 Kontrol PID.....	15
2.10 Komunikasi Serial .....	16

2.11	Servo Dynamixel.....	17
2.12	Loadcell.....	18
2.13	Intel NUC.....	19
2.14	CM-730.....	20
2.15	Maple Mini.....	21
2.16	Lithium Pollymer.....	22

### BAB 3. DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

3.1	Desain Sistem.....	25
3.2	Desain Robot.....	26
	3.2.1 Mekanik Robot.....	26
	3.2.2 Elektronik Robot.....	28
	3.2.2.1 <i>Main Controller</i> .....	29
	3.2.2.2 <i>Sub Controller</i> .....	29
	3.2.2.3 <i>Interface</i> .....	29
	3.2.2.4 <i>Power Switching</i> .....	30
3.3	Sistem Rancangan Sensor Tekanan Robot.....	32
	3.3.1 Penempatan Sensor Tekanan Pada Robot.....	32
	3.3.2 Kontroler Elektronik Sensor Tekanan.....	34
3.4	Estimasi Gaya dan Penentuan Pusat Tekanan.....	37
	3.4.1 Karakterisasi Loadcell.....	38
	3.4.2 Filter Data.....	39
	3.4.3 Penentuan Posisi Pusat Tekanan Pada Alas Kaki.....	41
	3.4.4 Penentuan Posisi Pusat Tekanan Terhadap Robot.....	42
3.5	Penghitungan Sudut Kondisi Pusat Tekanan Robot.....	44
3.6	Pembangkitan Postur Berdiri Robot.....	45
	3.6.1 Pembangkitan Posur Berdasarkan Pusat Massa.....	45
	3.6.2 Pembangkitan Postur Dengan Pusat Tekanan.....	46
3.7	Sistem Keseimbangan Robot.....	48

### BAB 4. PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1	Pengujian Karakterisasi Loadcell.....	53
4.2	Pengujian Massa Pada Loadcell.....	57
4.3	Pengujian Kalman Filter.....	58
4.4	Pengujian Pusat Tekanan.....	59
	4.4.1 Pengujian Pusat Tekanan Pada Satu Alas Kaki.....	59
	4.4.2 Pengujian Pusat Tekanan Pada Dua Alas Kaki.....	61
4.5	Pengujian Postur Berdiri Robot.....	62
4.6	Pengujian Keseimbangan Robot.....	63

BAB 5. PENUTUP	
5.1	Kesimpulan .....69
5.2	Saran.....69
DAFTAR PUSTAKA .....71	
LAMPIRAN.....73	
BIOGRAFI PENULIS .....89	

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## **CONTENTS**

<i>ABSTRACT (BAHASA)</i> .....	<i>i</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>iii</i>
<i>PREFACE</i> .....	<i>v</i>
<i>CONTENTS (BAHASA)</i> .....	<i>vii</i>
<i>CONTENTS</i> .....	<i>xi</i>
<i>LIST OF FIGURES</i> .....	<i>xv</i>
<i>LIST OF TABLES</i> .....	<i>xix</i>

### **CHAPTER 1. INTRODUCTION**

1.1 <i>Background</i> .....	1
1.2 <i>Problems</i> .....	2
1.3 <i>Purpose</i> .....	3
1.4 <i>Scope of Problems</i> .....	3
1.5 <i>Methodology</i> .....	3
1.6 <i>Writing Systematics</i> .....	4
1.7 <i>Relevance</i> .....	5

### **CHAPTER 2. LITERATURE REFERENCES**

2.1 <i>Humanoid Robot</i> .....	7
2.2 <i>Robocup</i> .....	8
2.3 <i>Kinematics Robot</i> .....	9
2.4 <i>Zero Moment Point</i> .....	10
2.5 <i>Robot Balance</i> .....	10
2.6 <i>Center of Pressure Method</i> .....	11
2.7 <i>Regression and Interpolation</i> .....	13
2.8 <i>Kalman Filter</i> .....	14
2.9 <i>PID Control</i> .....	15
2.10 <i>Serial Communications</i> .....	16

2.11	<i>Dynamixel Servo</i> .....	17
2.12	<i>Loadcell</i> .....	18
2.13	<i>Intel NUC</i> .....	19
2.14	<i>CM-730</i> .....	20
2.15	<i>Maple Mini</i> .....	21
2.16	<i>Lithium Polymer</i> .....	22

**CHAPTER 3. DESIGN AND IMPLEMENTATION SYSTEM**

3.1	<i>System Design</i> .....	25
3.2	<i>Robot Design</i> .....	26
	3.2.1 <i>Mechanical Robot</i> .....	26
	3.2.2 <i>Elektronics Robot</i> .....	28
	3.2.2.1 <i>Main Controller</i> .....	29
	3.2.2.2 <i>Sub Controller</i> .....	29
	3.2.2.3 <i>Interface</i> .....	29
	3.2.2.4 <i>Power Switching</i> .....	30
3.3	<i>Pressure Sensor Design System</i> .....	32
	3.3.1 <i>Placement Pressure Sensor on Robot</i> .....	32
	3.3.2 <i>Pressure Sensor Electronics Controller</i> .....	34
3.4	<i>Force Estimation and Center of Pressure Determination</i> ..	37
	3.4.1 <i>Loadcell Characteristics</i> .....	38
	3.4.2 <i>Filter Data</i> .....	39
	3.4.3 <i>Position Center of Pressure Determination on footwear</i> .....	41
	3.4.4 <i>Position Center of Pressure Determination on Robot</i> .....	42
3.5	<i>Calculation Angle Condition Center of Pressure Robot</i> ....	44
3.6	<i>Generate of Robot Standing Posture</i> .....	45
	3.6.1 <i>Generate of Posture Based on Center of Mass</i> .....	45
	3.6.2 <i>Generate of Posture Based on Center of Pressure</i> ..	46
3.7	<i>Robot Balance System</i> .....	48

**CHAPTER 4. EXPERIMENT AND ANALYSIS**

4.1	<i>Experiment of Loadcell Characteristics</i> .....	53
4.2	<i>Experiment of Mass on Loadcell</i> .....	57
4.3	<i>Experiment of Kalman Filter</i> .....	58
4.4	<i>Experiment Center of Pressure</i> .....	59
	4.4.1 <i>Experiment Center of Pressure on One Foot</i> .....	59
	4.4.2 <i>Experiment Center of Pressure on Foot</i> .....	61

4.5	<i>Experiment of Standup Posture Robot</i>	62
4.6	<i>Experiment of Balance Robot</i>	63
<i>CHAPTER 5. INFERENCE</i>		
5.1	<i>Conclusion</i>	69
5.2	<i>Suggestion</i>	69
	<i>REFERENCES</i>	71
	<i>ATTACHMENT</i>	73
	<i>BIOGRAPHY</i>	89

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## DAFTAR GAMBAR

2.1	Robot Humanoid dari Boston Dynamics . . . . .	7
2.2	Pertandingan Sepak Bola Robot Humanoid . . . . .	8
2.3	Kinematika Robot pada Robot Manipulator 3 dof . . . . .	10
2.4	Posisi Zero Moment Point Pada Robot . . . . .	11
2.5	Konsep Tata Letak Untuk Metode Pusat Tekanan . . . . .	12
2.6	Blok Diagram Kalman Filter Secara Umum . . . . .	15
2.7	Blok Diagram Kontrol PID Secara Umum . . . . .	15
2.8	Servo Dynamixel Seri MX . . . . .	17
2.9	Loadcell . . . . .	18
2.10	Jembatan Wheatstone . . . . .	19
2.11	Mini PC Intel NUC Core i5 Generasi 5 . . . . .	20
2.12	CM-730 . . . . .	20
2.13	Maple Mini . . . . .	22
2.14	Lithium Pollymer Merk Gens Ace Kapasitas 3300mAH 4S	23
3.1	Rancang Desain Sistem . . . . .	25
3.2	Rancang Desain Mekanik Robot . . . . .	27
3.3	Realisasi Robot Humanoid . . . . .	27
3.4	Rancang Desain Elektronik Robot . . . . .	28
3.5	Rancangan Skematik Interface . . . . .	30
3.6	Realisasi Board Interface . . . . .	30
3.7	Rancangan Skematik Power Switching . . . . .	31
3.8	Realisasi Board Power Switching . . . . .	31
3.9	Penempatan Elektrik Pada Badan Robot . . . . .	32
3.10	Desain Peletakan Loadcell Pada Alas Kaki Robot . . . . .	32
3.11	Struktur Loadcell Pada Alas Kaki . . . . .	33
3.12	Penempatan Loadcell Pada Alas Kaki Robot . . . . .	34
3.13	Desain Ukuran Alas Kaki . . . . .	34

3.14	Desain Sistem Pengambilan Data . . . . .	35
3.15	Skematik Rangkaian HX711 . . . . .	36
3.16	Skematik Rangkaian Maple Mini . . . . .	36
3.17	Realisasi Board Elektronik Loadcell . . . . .	37
3.18	Desain Sistem Estimasi Gaya dan Penentuan Pusat Tekanan	37
3.19	Proses Pengambilan Data Untuk Karakterisasi Loadcell . .	38
3.20	Algoritma Kalman Filter . . . . .	40
3.21	Penentuan Pusat Tekanan Pada Satu Alas Kaki . . . . .	41
3.22	Penentuan Pusat Tekanan Terhadap Robot . . . . .	43
3.23	Pembagian Posisi Kuadran Pada Robot . . . . .	43
3.24	Posisi Pusat Tekanan Robot . . . . .	44
3.25	Diagram Sistem Kontrol PID untuk Penentuan $\theta$ kondisi .	44
3.26	Algoritma Penghitungan $\theta$ kondisi . . . . .	45
3.27	Pembuatan Postur Berdiri Robot Sebagai Dasar Awal . . .	46
3.28	Diagram Sistem Kontrol PID untuk Pembangkitan Postur Baru . . . . .	47
3.29	Algoritma Pembangkitan Postur Baru . . . . .	48
3.30	Kondisi Berdiri Robot Tanpa Menggunakan Kontrol Ke- seimbangan Saat Dimiringkan Dari Depan . . . . .	48
3.31	Posisi Pusat Tekanan Robot Saat dimiringkan dari Depan .	49
3.32	Diagram Sistem Kontrol PID . . . . .	50
3.33	Keseimbangan Robot Pada Kemiringan Depan . . . . .	50
3.34	Algoritma Keseimbangan Robot . . . . .	51
3.35	Kondisi berdiri robot tanpa menggunakan kontrol keseim- bangan Saat dimiringkan dari Belakang . . . . .	51
3.36	Posisi Pusat Tekanan Robot Saat dimiringkan dari Belakang	52
3.37	Keseimbangan Robot Pada Kemiringan Belakang . . . . .	52
4.1	Grafik Hubungan Antara Massa Obyek Dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Alas Kaki Kanan 1 . . . . .	54
4.2	Grafik Pengujian Data tanpa Filter dan dengan Kalman Filter . . . . .	59
4.3	Respon Keseimbangan Robot Dari Depan, (a) Tanpa Ke- seimbangan, (b) Dengan Keseimbangan IMU . . . . .	64
4.4	Respon Keseimbangan Robot Dari Belakang, (a) Tanpa Keseimbangan, (b) Dengan Keseimbangan IMU . . . . .	64

4.5	Respon Keseimbangan Robot dari Depan, (a) Dengan Keseimbangan IMU, (b) Dengan Keseimbangan Pusat Tekanan . . . . .	65
4.6	Respon Keseimbangan Robot dari Depan, (a) Dengan Keseimbangan IMU, (b) Dengan Keseimbangan Pusat Tekanan . . . . .	66

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## DAFTAR TABEL

1.1	Perencanaan Perubahan Robocup . . . . .	1
4.1	Hasil Percobaan Hubungan Massa Obyek Dengan Tegangan Pada loadcell . . . . .	54
4.2	Hasil Pengujian Massa pada tiap orde dalam Polynomial Regresi . . . . .	55
4.3	Hasil Percobaan Hubungan Massa Obyek Dengan Tegangan yang Dihasilkan pada Semua Loadcell . . . . .	56
4.4	Hasil pengujian massa pada masing-masing loadcell di kaki kanan . . . . .	57
4.5	Hasil Pengujian Massa Pada Masing-Masing Loadcell di Kaki Kiri . . . . .	58
4.6	Hasil Pengujian Pusat Tekanan Pada Kaki Kanan . . . . .	60
4.7	Hasil Pengujian Pusat Tekanan Pada Kaki Kiri . . . . .	60
4.8	Pengujian Pusat Tekanan Pada Dua Alas Kaki . . . . .	61
4.9	Pengujian Postur Berdiri Robot . . . . .	62
4.10	Hasil Pengujian Keseimbangan Robot dari depan dengan Tanpa Keseimbangan dan Dengan IMU . . . . .	63
4.11	Hasil Pengujian Keseimbangan Robot dari belakang dengan Tanpa Keseimbangan dan Dengan IMU . . . . .	63
4.12	Hasil Pengujian Keseimbangan Robot dari depan dengan IMU dan Dengan Pusat Tekanan . . . . .	65
4.13	Hasil Pengujian Keseimbangan Robot dari Belakang Dengan IMU dan Dengan Pusat Tekanan . . . . .	66

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar belakang

Seiring berkembangnya teknologi saat ini, tidak akan menutup kemungkinan bahwa semua kegiatan nantinya akan digantikan oleh semua robot baik itu dalam kegiatan industri, rumah tangga ataupun dalam hiburan. Salah satu organisasi dari Robocup memprediksikan dan mempunyai mimpi bahwa pada tahun 2050 nantinya, sepak bola robot dapat mengalahkan tim juara dunia sepak bola manusia dengan aturan permainan dari FIFA [1]. Dengan melihat tujuan tersebut, maka pihak organisasi FIFA melakukan pertandingan sepak bola robot tingkat internasional dengan aturan yang berubah setiap tahunnya. Perubahan aturan permainan sepak bola robot telah direncanakan oleh pihak robocup dari tahun 2014 sampai 2040 [2]. Perubahan tersebut ada pada Tabel 1.1.

Hal tersebut menuntut robot untuk memiliki bentuk dan kemampuan seperti manusia yang dapat bermain sepak bola baik dalam strategi penyerangan maupun pertahanan secara otomatis. Lapangan pertandingan robot sepak bola saat ini mulai menggunakan rumput sintetis, sehingga robot diharuskan dapat bermain pada kondisi lantai yang tidak tetap.

Hal dasar pada robot sebelum robot humanoid bermain sepak bola adalah pada kondisi postur berdiri robot. Kondisi berdiri robot yang ti-

**Tabel 1.1** Perencanaan Perubahan Robocup

Peraturan	Robocup						
	2014	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Tinggi Minimal	40 cm	40 cm	60 cm	80 cm	100 cm	120 cm	140 cm
Panjang Lapangan	9 m	10 m	20 m	30 m	50 m	70 m	90 m
Jumlah Pemain	4	4	6	6	8	8	11
Durasi Pertandingan	10 min	10 min	20 min	25 min	30 min	35 min	45 min

dak tepat pada pusat massa robot akan menyebabkan permasalahan pada perencanaan gerakan selanjutnya seperti gerakan berjalan atau gerakan menendang bola. Selain pada kondisi berdiri, robot yang tidak dilengkapi dengan keseimbangan akan mudah sekali jatuh jika berada di kondisi lantai yang tidak tetap atau di bidang miring. Untuk mengatasi hal tersebut, robot harus diperhitungkan kondisi bentuk tubuhnya agar mendapatkan jumlah gaya yang aktif bernilai nol diberbagai posisi yang dapat disebut dengan *Zero Moment Point* (ZMP). Perhitungan ZMP dapat dilakukan dengan cara memproyeksikan titik tumpu ujung bagian robot kearah alas dasar robot pada kondisi *Double Support Polygon* (DSP) yang disimplifikasi menggunakan *inverted pendulum model* [3]. Namun, hal ini masih terdapat nilai yang error karena terdapat perubahan pertambahan massa akibat dari mur, baut, kabel atau penambahan massa dari kondisi luar. Metode lain untuk mencari ZMP dapat dilakukan dengan menentukan Pusat Tekanan (CoP) dengan penambahan sensor tekanan pada alas kaki robot [4]. Oleh karena itu, diajukanlah proposal tugas akhir ini meliputi pembuatan robot humanoid serta implementasi sensor tekanan untuk mendapatkan pusat tekanan robot untuk mendapatkan postur berdiri dan keseimbangan robot yang tepat.

## 1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Robot humanoid di ITS dan tim Indonesia pada umumnya memiliki ukuran *kid-size*. Untuk mencapai mimpi robocup pada tahun 2050, maka perlu dilakukan perancangan robot humanoid pada kelas *teen-size*,
2. Perlu adanya data informasi kaki yang menapak untuk mengetahui kondisi robot saat berdiri dan melakukan perencanaan gerakan lainnya
3. Pembangkitan postur berdiri robot selama ini dilakukan dengan cara perhitungan berdasarkan pusat massa atau dilakukan secara *tuning* posisi pada masing-masing *joint* untuk berdiri. Hal itu akan merepotkan jika terdapat perubahan penambahan part pada robot.
4. Keseimbangan robot hanya mengandalkan informasi sudut kemiringan dari badan robot. Hal tersebut sering kali terjatuh karena alas kaki tidak menapak pada tanah sepenuhnya saat dilantai kemiringan.

### 1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam perancangan ini adalah:

1. Mendapatkan konstruksi robot humanoid yang sesuai dalam regulasi robocup pada tingkat *teen-size*,
2. Sistem peletakan sensor tekanan yang tepat untuk robot humanoid,
3. Mendapatkan informasi mengenai posisi koordinat pusat tekanan robot saat berdiri,
4. Robot mendapatkan postur berdiri yang seimbang dari posisi pusat tekanan robot,
5. Robot dapat menyeimbangkan dirinya tanpa jatuh saat berada di lantai yang tidak tepat atau bidang miring.

### 1.4 Batasan masalah

Untuk memfokuskan permasalahan yang akan diangkat maka dilakukan pembatasan masalah. Batasan-batasan masalah tersebut diantaranya adalah:

1. Permasalahan robot yang diangkat adalah robot sepak bola humanoid, sehingga robot ini tidak menyerupai konstruksi tubuh manusia baik dari segi penggunaan jumlah *degree of freedom* (dof) ataupun kemampuan fungsinya,
2. Permasalahan yang akan diteliti dalam tugas akhir ini adalah pusat tekanan yang ada pada alas kaki berdasarkan aturan yang tertera pada robocup, sehingga luas alas kaki dan konstruksi robot dibuat dengan ukuran batas maksimal dari robot,
3. Lingkungan robot yang dipilih adalah lingkungan sepak bola robot yaitu rumput sintetis. Sehingga pengambilan dan pengujian data dilakukan dirumput sintetis tersebut.

### 1.5 Metodologi

Langkah-langkah yang dikerjakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Studi Literatur

Pada studi literatur dilakukan pengumpulan dasar teori yang menunjang dalam penulisan tugas akhir yang meliputi buku, jurnal, artikel, forum diskusi dan penelitian-penelitian sebelumnya.

## 2. **Perancangan Konsep Sistem**

Pada bagian ini dilakukan penyusunan konsep awal perancangan tugas akhir yang akan dilakukan nantinya. Dalam hal ini meliputi sistem pembuatan robot yang akan dikerjakan, sistem perencanaan peletakkan dan jenis sensor tekanan yang digunakan, sistem elektronik dan sistem kontrol keseimbangan.

## 3. **Perancangan Sistem**

Perancangan sistem ini dibuat sesuai dalam perancangan konsep sebelumnya. Perancangan sistem meliputi perancangan robot humanoid yang konstruksi tubuhnya disesuaikan dengan regulasi organisasi robocup yang memiliki kemampuan dalam bermain sepak bola, perancangan elektronik robot, perancangan sensor tekanan, penentuan posisi pusat tekanan, pembangkitan postur berdiri baru yang tepat dan sistem keseimbangan robot.

## 4. **Pengujian Sistem**

Pengujian sistem ini dilakukan untuk mengetahui hasil dari perancangan sistem yang dibuat sebelumnya. Pengujian dalam tugas akhir ini meliputi pengujian mekanik dan elektrik robot, pengujian akurasi pembacaan sensor tekanan, pengujian akurasi penentuan posisi pusat tekanan, pengujian pembangkitan postur berdiri robot dan pengujian keseimbangan robot dalam kondisi lantai yang tidak rata atau kemiringan tertentu.

## 5. **Analisa**

Pada bagian ini dilakukan analisa dari hasil yang didapatkan dari pengujian sistem sebelumnya. Analisa ini dilakukan apakah sistem tersebut sesuai dengan rancangan atau perlu dilakukan perubahan perancangan kembali baik dari secara mekanik robot atau di proses algoritma untuk penentuan postur dan keseimbangan robot.

## 6. **Penyusunan Laporan Tugas Akhir**

Penyusunan laporan tugas akhir adalah bagian terakhir dalam proses pengerjaan setelah dilakukan pengujian dan analisa data. Dalam hal ini akan berisikan hasil kegiatan yang telah dikerjakan yang meliputi pendahuluan, dasar teori penunjang, implementasi perancangan, pengujian dan analisa serta kesimpulan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian Tugas akhir ini tersusun dalam sistematika dan terstruktur sehingga mudah dipahami dan dipelajari oleh pembaca maupun seseorang yang ingin melanjutkan penelitian ini. Alur sistematika penulisan laporan penelitian ini yaitu :

### 1. **BAB I Pendahuluan**

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang permasalahan yang akan dikerjakan dalam tugas akhir ini, tujuan, pembatasan masalah yang akan dikerjakan, metodologi penelitian, sistematika penulisan dan relevansi.

### 2. **BAB II Tinjauan Pustaka dan Teori Penunjang**

Pada bab ini berisi tentang uraian secara sistematis teori-teori penunjang dan hal-hal yang nantinya dibutuhkan dalam proses penyelesaian tugas akhir. Konsep dasar teori meliputi robot humanoid dan sistem keseimbangannya, sensor dan filter yang nantinya akan digunakan serta beberapa teori penunjang lainnya.

### 3. **BAB III Perancangan Sistem dan Implementasi**

Bagian ini berisi tentang penjelasan terkait perencanaan sistem yang nantinya akan dikerjakan yang berupa perencanaan mekanik robot dan elektroniknya, perencanaan sensor tekanan untuk informasi pusat tekanan terhadap robot serta proses pembangkitan postur berdiri dan sistem keseimbangan robot.

### 4. **BAB IV Pengujian dan Analisa**

Bab ini akan menjelaskan tentang pengujian dari sistem yang telah dirancang pada bab sebelumnya. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan data yang kemudian di analisa hasil tersebut.

### 5. **BAB V Penutup**

Bagian ini merupakan penutup yang berisi kesimpulan yang diambil dari pengujian dan analisa yang telah dilakukan. Saran dan kritik yang membangun untuk pengembangan lebih lanjut juga dituliskan pada bab ini.

## 1.7 Relevansi dan Manfaat

Pada pembuatan tugas akhir ini merupakan bagian terkecil dari riset besar dan merupakan pengerjaan dasar dari robot tersebut. Hasil dari tugas akhir ini akan mendukung proses pengembangan robot humanoid yang dimana

nantinya akan berkembang sesuai dengan kemajuan teknologi. Penerapan pada tugas akhir ini tidak hanya pada robot sepak bola saja, namun juga dapat diterapkan untuk robot humanoid dalam lingkungan masyarakat, rumah tangga industri dan lainnya.

## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Robot Humanoid

Robot humanoid adalah robot yang penampilan keseluruhannya dibentuk berdasarkan tubuh manusia, mampu melakukan interaksi dengan peralatan maupun lingkungan yang dibuat untuk manusia. Secara umum robot humanoid memiliki tubuh dengan kepala, dua buah lengan dan dua kaki, meskipun ada pula beberapa bentuk robot humanoid yang hanya berupa sebagian dari tubuh manusia, misalnya dari pinggang ke atas. Beberapa robot humanoid juga memiliki wajah, lengkap dengan mata dan mulut. Android merupakan robot humanoid yang dibangun untuk secara estetika menyerupai manusia. Robot humanoid digunakan sebagai alat riset pada beberapa area ilmu pengetahuan. Periset perlu mengetahui struktur dan perilaku tubuh manusia (biomekanik) agar dapat membangun dan mempelajari robot humanoid. Di sisi lain, upaya mensimulasikan tubuh manusia mengarahkan pada pemahaman yang lebih baik mengenai hal tersebut. Kognisi manusia adalah bidang studi yang berfokus kepada ba-



**Gambar 2.1** Robot Humanoid dari Boston Dynamics

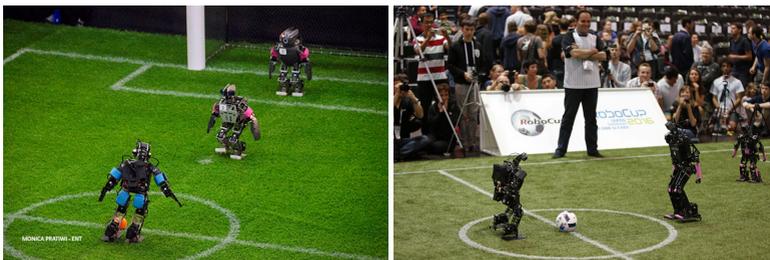
gaimana manusia belajar melalui informasi sensori dalam rangka memperoleh keterampilan persepsi dan motorik. Pengetahuan ini digunakan untuk mengembangkan model komputasi dari perilaku manusia dan hal ini telah berkembang terus sepanjang waktu. Gambar 2.1 merupakan riset robot humanoid yang dilakukan oleh *Boston Dynamics*.

Robot humanoid dibangun sedemikian rupa agar mereka mirip dengan tubuh manusia, maka mereka juga mempergunakan aktuator yang berlaku seperti otot dan sendi, meskipun dengan struktur yang berbeda. Agar dapat mencapai efek yang sama dengan gerakan manusia, robot humanoid terutama menggunakan aktuator rotari. Mereka dapat berupa elektrik, pneumatik, hidraulik, piezoelektrik, atau ultrasonik.

## 2.2 Robocup

RoboCup adalah kompetisi robot tahunan pada level internasional yang dimulai pada 1997. Tujuan utama dari kompetisi ini adalah untuk mengkomodasi penelitian tentang robotika dan kecerdasan buatan dengan pendekatan aplikasi yang mudah diterima publik. Nama robocup adalah singkatan dari Robot Soccer World Cup. Meskipun demikian, terdapat kategori lain dalam kompetisi ini seperti *RoboCupRescue*, *RoboCup@Home*, dan *RoboCupJunior*. Sesuai dengan namanya, *RoboCup Soccer* memerandingkan robot yang bermain menyerupai permainan sepak bola pada umumnya. Tujuan utama dari kompetisi ini adalah pada tahun 2050 sebuah tim yang terdiri dari robot humanoid mampu memenangkan sebuah pertandingan sepak bola melawan juara dunia sepak bola dengan peraturan resmi FIFA[1].

*RoboCup-Soccer* dibagi menjadi beberapa tingkatan sesuai dengan



**Gambar 2.2** Pertandingan Sepak Bola Robot Humanoid

ukuran robot yang dipertandingkan yaitu *kid-size*, *teen-size*, dan *adult-size*. Aturan RoboCup berubah setiap waktu menggambarkan perkembangan teknologi yang begitu cepat. Hal tersebut dilakukan untuk mendekati liga sepak bola manusia. Para panitia, peneliti dan peserta melakukan evaluasi setiap tahun menyusun aturan-aturan baru. Hal tersebut memberikan tantangan sendiri bagi mereka untuk terus berkembang hingga mendekati permainan sepak bola manusia. Pada tahun 2017 ini, untuk tingkat *kid-size* robot diharuskan memiliki tinggi minimal 40 cm dan maksimal 90 cm. Pertandingan yang dilakukan adalah 4 lawan 4 dengan 1 pemain cadangan dengan bola yang digunakan adalah bola standard FIFA nomor 1. Pada tingkat *teen-size*, tinggi robot diharuskan memiliki minimal 80 cm dan maksimal 140 cm. Pertandingan yang dilakukan adalah 3 lawan 3 dengan bola yaitu standard FIFA nomor 3. Sedangkan pada tingkat *adult-size*, tinggi robot diharuskan memiliki minimal 130 cm dan maksimal 180 cm. Pertandingan yang dilakukan adalah 1 lawan 1 dengan bola yaitu standard FIFA nomor 5.

Selain pada kompetisi robocup, di Indonesia dilakukan pertandingan robot sepak bola humanoid yang aturannya mengacu pada robocup, yaitu Kontes Robot Sepak Bola Indonesia. Kontes robot tersebut diselenggarakan oleh Kementerian Ristek Dikti. Juara pada kontes robot tersebut akan mewakili tim Indonesia dalam kompetisi Robocup.

### 2.3 Kinematika Robot

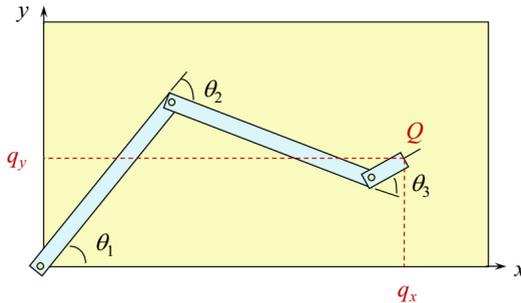
Kinematika adalah analisa tentang gerak yang mengacu pada referensi koordinat tanpa memperhatikan faktor-faktor yang menyebabkan gerak tersebut. Kinematika robot merupakan analisa untuk menghitung hubungan antara posisi *joint* dan posisi lengan robot. Dalam kinematika robot terdapat dua macam, yaitu *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. Gambar 2.3 merupakan kinematika pada robot manipulator 3 *dof*.

#### 1. *Forward Kinematics*

Pada *forward kinematics*, data yang menjadi masukan adalah sudut pada masing-masing *joint* sedangkan data keluaran berupa posisi koordinat. Sehingga posisi dan *end-effector* pada robot dapat dibentuk berdasarkan dari posisi masing-masing *joint* dan model struktur mekanik robot

#### 2. *Inverse Kinematics*

Pada *inverse kinematics*, data yang menjadi masukan adalah posisi



**Gambar 2.3** Kinematika Robot pada Robot Manipulator 3 dof

koordinat kartesian dan data keluaran berupa sudut pada masing-masing *joint*. Hal ini merupakan berkebalikan dari *forward kinematics*. Dengan kondisi tersebut, posisi dan *end-effector* robot yang diinginkan harus dapat dicapai dengan struktur mekanik yang ada. Dengan model mekanik tertentu, maka penyelesaian *inverse kinematics* dapat dilakukan dengan berbagai persamaan.

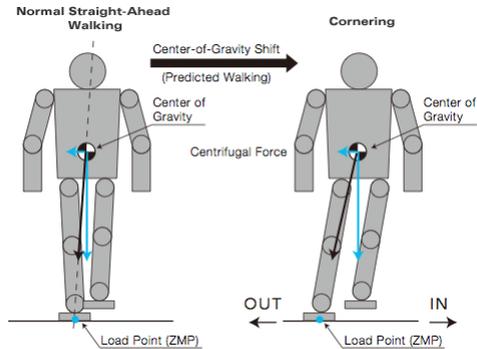
## 2.4 Zero Moment Point

*Zero Moment Point* (ZMP) adalah sebuah konsep yang berkaitan dengan dinamika dan kontrol penggerak berkaki, misalnya untuk robot humanoid. Penentuan titik nol ini sehubungan dengan gaya reaksi yang dinamis pada bagian kaki dengan bagian alas yang selalu ada pada setiap saat dalam arah horizontal, yaitu titik di mana total inersia dan gravitasi horizontal sama dengan 0 (nol). Konsep ini mengasumsikan bidang kontak adalah planar dan memiliki gesekan yang cukup tinggi untuk menjaga kaki tergelincir. Gambar 2.4 merupakan posisi *zero moment point* pada robot.

Titik koordinat dari ZMP sendiri ditentukan oleh posisi kaki dan ditinjau terhadap pusat massanya (*Centre of Mass*). Pusat massa ini diberikan sensor untuk menentukan reaksi dari kerja sistemnya.

## 2.5 Keseimbangan Robot

Keseimbangan robot merupakan kondisi dimana robot dapat mempertahankan kondisinya dalam melakukan suatu tindakan meskipun mendapatkan gangguan dari luar. Hal terpenting dalam keseimbangan robot ada-



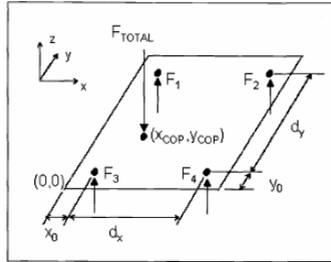
**Gambar 2.4** Posisi Zero Moment Point Pada Robot

lah posisi dari pusat gravitasi (*Center of Gravity*). Pusat gravitasi merupakan titik dimana semua berat robot berada pada kondisi terpusat. Robot akan seimbang di keadaan apapun jika robot ditahan tepat di titik pusat gravitasi. Pusat gravitasi merupakan sesuatu yang sangat penting karena posisinya sangat berpengaruh pada kestabilan sebuah robot. Dalam mengetahui pusat gravitasi dapat dilakukan dengan mencari pusat massa (*Center of Mass*). Untuk mencari pusat massa perlu diperhitungkan masing-masing struktur mekanik antara satu dengan yang lainnya sehingga akan diketahui pusat massa tersebut.

## 2.6 Metode Pusat Tekanan

Pusat tekanan adalah titik dimana semua gaya terkonsentrasi pada titik tersebut tanpa ada momen putar/torsi. Dalam pusat tekanan ini terdiri dari beberapa tekanan yang kemudian dihitung nilainya berdasarkan luas penampang tersebut hingga didapatkan posisi pusat tekanan tersebut. Pusat Tekanan memiliki hubungan dengan keseimbangan robot terutama pada titik pusat gravitasi. Dapat dipahami dengan ilustrasi bahwa jika posisi pusat tekanan berada di depan dari pusat gravitasi, maka robot akan cenderung mengalami *pitch down*. Sebaliknya jika posisi pusat tekanan berada di belakang, robot akan cenderung mengalami *pitch up*.

Pusat Tekanan tidak selalu berhubungan dengan keseimbangan robot. Salah satu aplikasi pusat tekanan adalah pada bidang kesehatan, yaitu untuk mendeteksi posisi tekanan kursi pada penyandang disabilitas saat pe-



**Gambar 2.5** Konsep Tata Letak Untuk Metode Pusat Tekanan

sawat landas. Penyandang disabilitas adalah orang yang memiliki keterbatasan diri dalam melakukan suatu kegiatan. Dengan kondisi tersebut, kebutuhan transportasi bagi mereka membutuhkan perhatian yang lebih. Namun jika dengan hal tersebut akan menambah kebutuhan sumber daya manusia, terutama pada kondisi pesawat sedang melakukan terbang landas. Pada kondisi tersebut posisi pasien perlu mendapat perhatian lebih karena tidak mampu menyeimbangkan diri dan mempertahankan kursi roda dalam kabin pesawat sehingga akan menyebabkan kecelakaan didalam pesawat. Sehingga terdapat sebuah tesis dari Oregon State University dengan membuat pengukuran sensor kekuatan untuk posisi tekanan saat pesawat terbang landas. Sensor tekanan tersebut diletakkan pada sandaran kursi dan berjumlah 4 buah. Gambar 2.5 menunjukkan konsep peletakkan sensor tekanan. Dari konsep tersebut dapat dihitung pusat tekanan dengan menggunakan Persamaan 2-1 dan Persamaan 2-2.

$$X_{cop} = X_0 + \frac{(F_2 + F_4) * dx}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \quad (2-1)$$

$$Y_{cop} = Y_0 + \frac{(F_1 + F_2) * dy}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4} \quad (2-2)$$

Setelah diketahui posisi pusat tekanan tersebut, maka posisi tersebut akan digunakan untuk referensi pergerakan kursi roda agar pasien tidak mengalami kecelakaan saat berada di dalam pesawat.

## 2.7 Regresi dan Interpolasi

Regresi adalah pengukur hubungan dua variabel atau lebih yang dinyatakan dengan bentuk hubungan persamaan atau fungsi. Untuk menentukan bentuk hubungan (regresi) diperlukan pemisahan yang tegas antara variabel bebas yang sering diberi simbol X dan variabel tak bebas dengan simbol Y. Kedua variabel biasanya bersifat kausal atau mempunyai hubungan sebab akibat yaitu saling mempengaruhi. Dengan demikian, regresi merupakan bentuk fungsi tertentu antara variabel tak bebas Y dengan variabel bebas X atau dapat dinyatakan bahwa regresi adalah sebagai suatu fungsi  $Y = f(X)$ . Bentuk regresi tergantung pada fungsi yang menunjangkannya atau tergantung pada persamaannya. Metode ini terdiri dari dua kelompok yaitu metode regresi linier dan metode regresi non linier.

### 1. Regresi Linier

Pada metode regresi linier, hubungan antara variabel bebas (X) dengan variabel tidak bebas (Y) dalam persamaan matematis bersifat linier atau bentuk garis lurus. Metode regresi linier terdiri atas dua macam yaitu regresi linier sederhana dan regresi linier berganda.

### 2. Regresi Non Linier

Metode regresi non linier ialah bentuk hubungan atau fungsi di mana variabel bebas X dan atau variabel tak bebas Y dapat berfungsi sebagai faktor atau variabel dengan pangkat tertentu. Selain itu, variabel bebas X dan atau variabel tak bebas Y dapat berfungsi sebagai penyebut (fungsi pecahan), maupun variabel X dan atau variabel Y dapat berfungsi sebagai pangkat fungsi eksponen atau fungsi perpangkatan. Metode Regresi Non Linier dapat dibedakan menjadi beberapa model, yaitu regresi polinomial, regresi hiperbola, regresi fungsi perpangkatan, fungsi eksponensial, regresi logaritmik dan regresi fungsi geometri

Interpolasi merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui nilai dari sesuatu yang berada didalam sebuah interval (diantara dua buah titik yang segaris) atau bisa diartikan untuk menentukan nilai diantara dua nilai pada data yang sudah diketahui. Metode ini juga digunakan untuk mencari persamaan garis yang dapat mewakili data atau suatu titik, dimana pada persamaan tersebut grafiknya mencapai/bersinggungan dengan semua data yang diketahui sehingga garis yang di dapat tidak selurus seperti grafik regresi artinya semua titik data yang ada harus masuk dalam

persamaan garis yang nanti akan didapatkan. Bila fungsi cocokan yang digunakan berbentuk polinom, maka polinom tersebut dinamakan polinom interpolasi. Contoh data yang tingkat ketelitiannya tinggi adalah titik-titik data yang diperoleh dari persamaan yang menyatakan hubungan antara jarak tempuh terhadap waktu tempuh pada benda yang jatuh bebas. Selain dengan polinom, interpolasi titik-titik data dapat dilakukan dengan fungsi linear, fungsi kuadrat, fungsi spline, fungsi rasional atau dengan deret Fourier.

Interpolasi memegang peranan yang sangat penting dalam metode numerik. Fungsi yang tampak sangat rumit, akan menjadi sederhana bila dinyatakan dalam polinom interpolasi. Sebagian besar metode integrasi numerik, metode persamaan diferensial biasa dan metode turunan numerik didasarkan pada polinom interpolasi, sehingga banyak yang menyatakan bahwa interpolasi merupakan pokok bahasan yang fundamental dalam metode numerik.

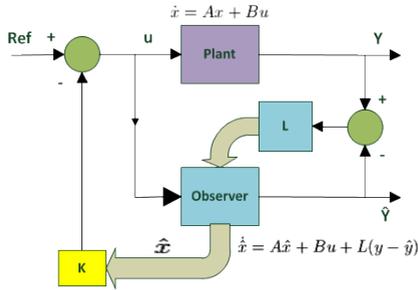
## 2.8 Kalman Filter

Kalman filter adalah sebuah estimator. Kalman filter melakukan estimasi terhadap perubahan state karena gangguan dari *white noise*. Kata filter berarti metode ini melakukan filter terhadap gangguan *noise* pada sistem. Jadi tujuan digunakannya kalman filter pada sistem kontrol adalah untuk melakukan estimasi terhadap *state* pada sistem seperti yang digunakan pada metode *observer*. Metode *observer* dan kalman filter memiliki kesamaan yaitu melakukan estimasi, tetapi penyelesaian kalman filter mengikutsertakan persamaan dari *noise* sehingga bisa dikatakan metode kalman filter lebih *robust* jika dibandingkan dengan *observer*. Secara umum persamaan *state space* kalman filter adalah sebagai berikut.

$$x = Ax + Bu + Fw \quad (2-3)$$

$$y = Cx + Du + Gw + v \quad (2-4)$$

Matrik  $x, y, A, B, C$ , dan  $D$  adalah matrik *statespace* pada umumnya. Matrik  $F$  dan  $G$  adalah matrik yang menentukan bagaimana proses *noise*  $w$  masuk kedalam sistem, bagaimana proses *noise*  $w$  berpengaruh ke

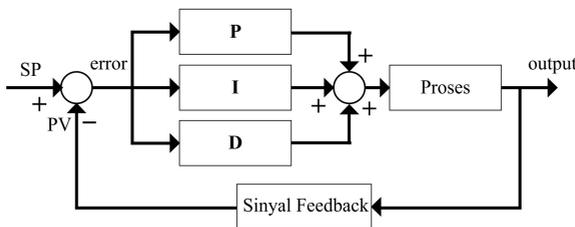


**Gambar 2.6** Blok Diagram Kalman Filter Secara Umum

setiap *state* variabel. Vektor  $v$  adalah *noise* pada pengukuran atau *measurement noise*. Vektor  $w$  dan  $v$  adalah *white noise* dengan *zero mean*. Gambar 2.6 merupakan diagram blok pada proses kalman filter.

## 2.9 Kontrol PID

PID (*ProportionalIntegralDerivative controller*) merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik pada sistem tersebut. Sistem kontrol PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol P (*Proportional*), D (*Derivative*) dan I (*Integral*), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam implementasinya masing-masing cara dapat bekerja sendiri maupun gabungan diantaranya. Dalam perancangan sistem kontrol PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran system terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan. Gambar 2.7 menunjukkan diagram blok kontrol PID.



**Gambar 2.7** Blok Diagram Kontrol PID Secara Umum

### 1. Kontrol Proporsional

Kontrol P jika  $G(s) = k_p$ , dengan  $k$  adalah konstanta. Jika  $u = G(s) e$  maka  $u = K_p e$  dengan  $K_p$  adalah Konstanta Proporsional.  $K_p$  berlaku sebagai *Gain* (penguat) saja tanpa memberikan efek dinamik kepada kinerja kontroler. Penggunaan kontrol P memiliki berbagai keterbatasan karena sifat kontrol yang tidak dinamik ini. Walaupun demikian dalam aplikasi-aplikasi dasar yang sederhana kontrol P ini cukup mampu untuk memperbaiki respon transien khususnya *rise time* dan *settling time*.

### 2. Kontrol Integral

Jika  $G(s)$  adalah kontrol I maka  $u$  dapat dinyatakan sebagai  $u(t) = [\int e(t) dt] K_i$  dengan  $K_i$  adalah konstanta Integral, dan dari persamaan diatas,  $G(s)$  dapat dinyatakan sebagai  $u = K_d [\delta e / \delta t]$  Jika  $e(T)$  mendekati konstan (bukan nol) maka  $u(t)$  akan menjadi sangat besar sehingga diharapkan dapat memperbaiki error. Jika  $e(T)$  mendekati nol maka efek kontrol I ini semakin kecil. Kontrol I dapat memperbaiki sekaligus menghilangkan respon *steady-state*, namun pemilihan  $K_i$  yang tidak tepat dapat menyebabkan respon transien yang tinggi sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Pemilihan  $K_i$  yang sangat tinggi justru dapat menyebabkan *output* berosilasi karena menambah orde sistem

### 3. Kontrol Derivative

Sinyal kontrol  $u$  yang dihasilkan oleh kontrol D dapat dinyatakan sebagai  $G(s) = s K_d$  Dari persamaan di atas, nampak bahwa sifat dari kontrol D ini dalam konteks "kecepatan" atau rate dari error. Dengan sifat ini ia dapat digunakan untuk memperbaiki respon transien dengan memprediksi error yang akan terjadi. Kontrol Derivative hanya berubah saat ada perubahan error sehingga saat error statis kontrol ini tidak akan bereaksi, hal ini pula yang menyebabkan kontroler Derivative tidak dapat dipakai sendiri

## 2.10 Komunikasi Serial

Komunikasi serial adalah komunikasi yang pengiriman datanya per-bit secara berurutan dan bergantian. Komunikasi ini mempunyai suatu kelebihan yaitu hanya membutuhkan satu jalur dan kabel yang sedikit dibandingkan dengan komunikasi paralel. Pada prinsipnya komunikasi serial merupakan komunikasi dimana pengiriman data dilakukan per bit sehingga lebih lambat dibandingkan komunikasi paralel, atau dengan kata lain

komunikasi serial merupakan salah satu metode komunikasi data di mana hanya satu bit data yang dikirimkan melalui seuntai kabel pada suatu waktu tertentu.

Terdapat dua macam komunikasi serial yaitu *asynchronous* serial dan *synchronous* serial. *Synchronous* serial adalah komunikasi dimana hanya ada satu pihak (pengirim atau penerima) yang menghasilkan clock dan mengirimkan *clock* tersebut bersama-sama dengan data. Contoh penggunaan *synchronous* serial terdapat pada transmisi data keyboard. *Asynchronous* serial adalah komunikasi dimana kedua pihak (pengirim dan penerima) masing-masing menghasilkan *clock* namun hanya data yang ditransmisikan, tanpa *clock*. Agar data yang dikirim sama dengan data yang diterima, maka kedua frekuensi *clock* harus sama dan harus terdapat sinkronisasi. Setelah adanya sinkronisasi, pengirim akan mengirimkan datanya sesuai dengan frekuensi clock pengirim dan penerima akan membaca data sesuai dengan frekuensi *clock* penerima. Contoh penggunaan *asynchronous* serial adalah pada *Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)* yang digunakan pada serial port (COM) komputer.

## 2.11 Servo Dynamixel

Dynamixel adalah jenis motor servo keluaran dari Robotis, suatu perusahaan produsen kit robot dan perangkat pendukungnya dari Korea Selatan, yang banyak digunakan dalam pembuatan robot. Motor servo ini dapat digolongkan sebagai aktuator cerdas (*smart actuator*) karena pada masing-masing motor terdapat mikroprosesor yang menyediakan kemampuan komunikasi dengan kontroler, menyediakan informasi tentang posisi dan beban yang bekerja serta temperatur pada motor. Pada dasarnya terdapat empat seri servo Dynamixel, yaitu AX, RX, MX dan EX. Dynami-



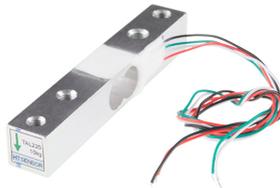
**Gambar 2.8** Servo Dynamixel Seri MX

xel menggunakan dua jenis protokol komunikasi yaitu half-duplex TTL dan RS-485. Kedua protokol tersebut tidak dapat digabungkan dalam satu untai komunikasi dari kontroler. Hal ini menyebabkan jika telah memiliki satu tipe servo dan akan dikombinasikan dalam satu untai komunikasi dengan tipe lainnya harus menggunakan jenis protokol komunikasi yang sama.

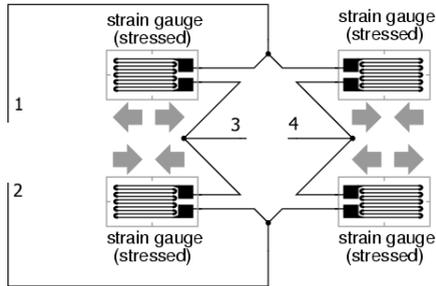
Seri MX merupakan seri dari Dynamixel yang berbeda dibanding dengan seri AX dan RX. Dengan kombinasi pemanfaatan enkoder magnetik sebagai sensor posisi dan kontroler Cortex M3, maka seri MX memiliki fitur yang lebih baik, antara lain sudut putar 360 derajat(1 putaran penuh), resolusi lebih baik, kecepatan komunikasi mencapai 3 mbps, dan kendali PID untuk posisi. Gambar 2.8 menunjukkan servo dynamixel seri MX28, MX64 dan MX106. Semakin tinggi angka pada seri tersebut, maka kecepatan dan torsi pada servo tersebut semakin besar.

## 2.12 Loadcell

Load cell adalah sebuah perangkat yang dapat mengubah suatu gaya menjadi sinyal listrik. Perubahan dari satu sistem ke sistem lainnya ini tidak langsung terjadi dalam dua tahap saja tetapi harus melalui tahap-tahap pengaturan mekanikal, kekuatan dan energi yang dapat merasakan perubahan kondisi. Secara umum, loadcell terdiri dari empat strain gauge. Strain gauge merupakan suatu kawat listrik yang disusun secara melengkung dengan pola tertentu dan memiliki hambatan. Hambatan strain gauge tersebut akan bertambah apabila strain gauge tersebut ditekuk. Semakin ditekuk strain gauge tersebut, maka hambatan strain gauge akan semakin membesar. Gambar 2.9 menunjukkan loadcell yang digunakan dalam penelitian ini.



**Gambar 2.9** Loadcell



**Gambar 2.10** Jembatan Wheatstone

Keempat strain gauge yang ada pada loadcell disusun dengan sistem konfigurasi jembatan wheatstone. Jembatan Wheatstone dipergunakan untuk memperoleh ketelitian dalam melaksanakan pengukuran terhadap suatu tahanan yang nilainya relative kecil. Sehingga dengan konfigurasi tersebut, loadcell akan dapat membaca massa benda dengan presisi yang tinggi. Gambar 2.10 menunjukkan susunan jembatan wheatstone yang ada pada loadcell.

### 2.13 Intel NUC

Intel NUC adalah PC Mini 4x4 inci bertenaga dengan fitur hiburan, game, dan produktivitas, termasuk board yang dapat disesuaikan yang siap menerima memori, penyimpanan, dan sistem operasi yang diinginkan. Dengan bentuknya yang minimalis, Intel hanya menjual bodi dan juga prosesor serta motherboard-nya. Artinya perangkat Intel NUC ini hampir mirip dengan PC rakitan biasa, pengguna bisa menambahkan komponen-komponen yang dikehendaki pada Intel NUC ini. Slot RAM yang ada pada perangkat ini sama dengan slot RAM dari notebook, jadi bentuk RAM akan lebih kecil jika dibandingkan dengan RAM pada PC. Maksimal RAM yang bisa ditambahkan mampu mencapai 16 GB (2 port, 1 port senilai 8 GB). Intel menyediakan slot yang bisa digunakan untuk HDD sebesar 2.5 dan dapat melakukan kombinasi drive penyimpanan antara HDD dan SSD. Untuk konektivitas yang digunakan oleh Intel NUC, dapat ditambahkan wireless card sendiri. Interface seperti port USB, HDMI dan juga koneksi LAN telah terpasang pada bagian belakang dari NUC ini. PC Mini intel NUC ada pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Mini PC Intel NUC Core i5 Generasi 5

Intel NUC saat ini memiliki banyak tipe dan generasi, salah satunya adalah Intel NUC tipe 5i5ryh. Tipe tersebut menggunakan prosesor Intel Core i5 generasi 5 yang mempunyai kecepatan proses sampai 2.7GHz. Voltase input yang dibutuhkan oleh PC tersebut antara 12-19 VDC. *Thermal Design Power* (TDP) atau daya rata-rata yang dikeluarkan prosesor saat beroperasi pada frekuensi dasar sebesar 15W. TDP tersebut sangat kecil, sehingga PC tersebut dapat dijalankan secara *portable* menggunakan baterai.

## 2.14 CM-730

CM-730 merupakan kontroler buatan dari *robotis* yang merupakan kontroler cerdas. Kontroler ini memiliki berbagai fitur dan dikhususkan untuk kontroler pada robot humanoid. CM-730 ini menggunakan STM32f103RE ARM Cortex 32 bit dengan kecepatan proses sampai 72MHz. Dalam CM-730 ini sudah terdapat *firmware* untuk mengontrol servo *dynami-*



**Gambar 2.12** CM-730

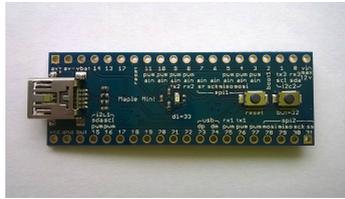
xel dengan jenis komunikasi RS-485 dan TTL. Dalam mengontrol hal tersebut, *robotis* telah menyiapkan *control table* yang berisikan tentang deskripsi dan perintah alamat agar mempermudah pengguna dalam mengakses *kontroler* tersebut. Kontroler tersebut akan bekerja selama ada perintah data yang masuk. Perintah data tersebut didapatkan melalui komunikasi serial. Saat menerima perintah dari komunikasi serial, maka kontroler akan memberikan informasi sesuai permintaan dari pengiriman tersebut. CM-730 akan menerima data perintah dari kontroler lain untuk menggerakkan *joint* pada setiap servo robot yang terhubung menggunakan jalur komunikasi *TTL Half Duplex*. Gambar 2.12 menunjukkan *sub controller* CM730.

Selain untuk mengontrol servo, CM-730 dilengkapi dengan sensor 3 axis *accelerometer* dan 3 axis *gyroscope* serta indikator kondisi tegangan masukan yang dibaca melalui ADC. Dalam kontroler ini juga terdapat beberapa tombol dan led untuk mempermudah komunikasi antara board dengan pengguna.

## 2.15 Maple Mini

Maple mini merupakan mikrokontroler yang berbasis ARM 32 bit dengan memiliki ukuran kecil dan dapat diprogram dengan mengikuti style seperti pada IDE Arduino. Maple mini merupakan board yang diproduksi oleh leaflabs yang bertujuan untuk mempermudah pengguna dalam memprogram namun memiliki kecepatan proses dan memori yang tinggi. Maple mini memiliki kecepatan proses mencapai 72 MHz, 34 GPIO, Flash memori sebesar 120KB dan SRAM sebesar 20KB. Berikut adalah fitur spesifikasi dari maple mini

1. STM32 F103RCBT6: a 32-bit ARM Cortex M3 microprocessor
2. Clock Speed: 72 MHz
3. Input Voltage (recommended): 3.0V-12V
4. 34 Digital I/O Pins (GPIO)
5. 9 Analog Input Pins
6. 12-bit ADC resolution
7. 12 PWM pins at 16-bit resolution
8. Dedicated USB port for programming and communications
9. 120 KB Flash and 20 KB SRAM
10. Integrated SPI (2) and I2C (2)



**Gambar 2.13** Maple Mini

11. 7 Channels of Direct Memory Access
12. 3 USART devices
13. Four 4-channel Timers
14. Support for low power and sleep modes ( $\pm 500\mu\text{A}$ )

## 2.16 Lithium Polymer

Baterai Lithium Polimer atau biasa disebut dengan LiPo merupakan salah satu jenis baterai yang sering digunakan dalam dunia RC. Utamanya untuk RC tipe pesawat dan helikopter. Baterai LiPo tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis. Lapisan film ini disusun berlapis-lapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion. Dengan metode ini baterai LiPo dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran. Gambar 2.14 menunjukkan baterai lipo yang dijual di pasaran dengan merk Gens Ace yang berkapasitas 3300mAH 4S. Ada tiga kelebihan utama yang ditawarkan oleh baterai berjenis LiPo daripada baterai jenis lain seperti NiCad atau NiMH yaitu :

1. Baterai LiPo memiliki bobot yang ringan dan tersedia dalam berbagai macam bentuk dan ukuran
2. Baterai LiPo memiliki kapasitas penyimpanan energi listrik yang besar
3. Baterai LiPo memiliki tingkat discharge rate energi yang tinggi, dimana hal ini sangat berguna sekali dalam bidang RC.

Selain keuntungan yang dimilikinya, baterai jenis ini juga memiliki beberapa kelemahan yaitu:



**Gambar 2.14** Lithium Pollymer Merk Gens Ace Kapasitas 3300mAh 4S

1. Harga baterai LiPo masih tergolong mahal jika dibandingkan dengan baterai jenis NiCad dan NiMH
2. Performa yang tinggi dari baterai LiPo harus dibayar dengan umur yang lebih pendek. Usia baterai LiPo sekitar 300-400 kali siklus 31 pengisian ulang. Sesuai dengan perlakuan yang diberikan pada baterai.
3. Alasan keamanan. Baterai LiPo menggunakan bahan elektrolit yang mudah terbakar.
4. Baterai LiPo membutuhkan penanganan khusus agar dapat bertahan lama. Charging, Discharging, maupun penyimpanan dapat mempengaruhi usia dari baterai jenis ini.

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## BAB 3

### DESAIN DAN IMPLEMENTASI SISTEM

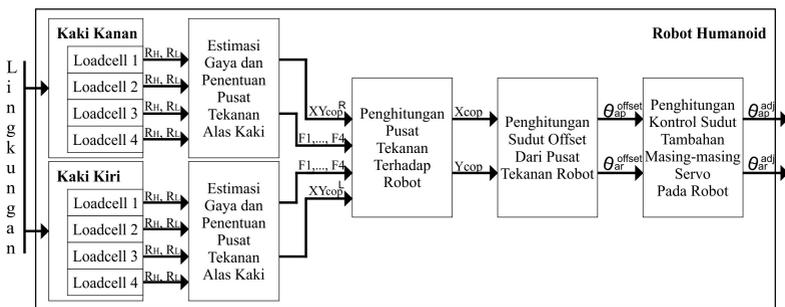
Bab ini akan menjelaskan tentang metodologi perancangan sistem yang akan dikerjakan. Perancangan tersebut meliputi perancangan mekanik dan elektrik pada robot, perancangan sensor tekanan dan penentuan pusat tekanan pada robot, pembangkitan postur berdiri dan sistem keseimbangan robot. Semua sistem tersebut akan dibahas dalam bagian bab ini.

#### 3.1 Desain Sistem

Desain rancangan sistem keseluruhan untuk pembangkitan postur dan keseimbangan robot ada pada gambar 3.1. Dalam rancangan desain tersebut terdapat empat hal utama.

Yang pertama yaitu estimasi gaya dan penentuan pusat tekanan alas kaki yang dimana data setiap sensor tekanan akan diolah dan memberikan informasi posisi pusat tekanan dalam koordinat kartesian pada setiap masing-masing kaki.

Yang kedua yaitu perhitungan pusat tekanan terhadap robot dimana data posisi pusat tekanan pada setiap alas kaki akan dikirim ke badan robot lalu diperhitungkan posisi pusat tekanan yang diproyeksikan terhadap kedua kaki robot dalam koordinat kartesian.



Gambar 3.1 Rancang Desain Sistem

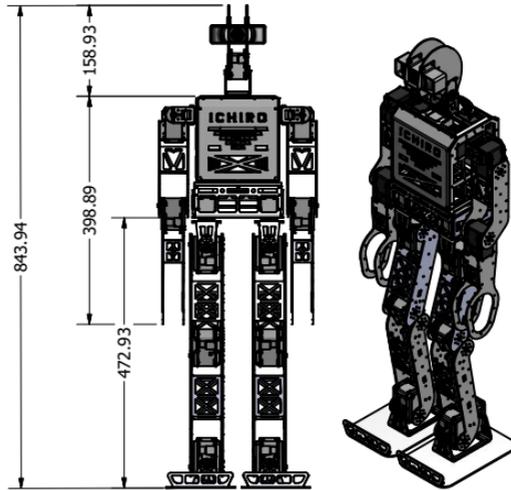
Yang ketiga yaitu penghitungan sudut *offset* dari pusat tekanan robot. Pada kondisi ini dilakukan perhitungan untuk menentukan sejauh mana sudut *offset* error robot yang harus dikeluarkan dari kondisi badan yang seimbang. Kondisi badan yang seimbang dapat diketahui dari pusat gravitasi(CoG) dan pusat tekanan(CoP). Robot yang memiliki posisi pusat tekanan berada di pusat gravitasi akan berada di kondisi yang seimbang. Pusat gravitasi merupakan titik di mana semua berat robot terpusat. Sedangkan pusat tekanan adalah titik dimana semua gaya berada terkonsentrasi pada suatu bagian tanpa ada momen putar/torsi.

Yang terakhir adalah penghitungan dan kontrol sudut tambahan masing-masing servo pada robot. Pada bagian ini akan dilakukan penambahan sudut *offset* dengan sudut awal dari kondisi postur yang dibuat sebelumnya. Sehingga hal ini akan terbentuk postur berdiri baru. Selain hal tersebut, robot juga dapat menyeimbangkan diri sendiri apabila lantai yang menapak pada robot berubah menggunakan metode kontrol PID sehingga robot dapat mempertahankan posisi berdirinya.

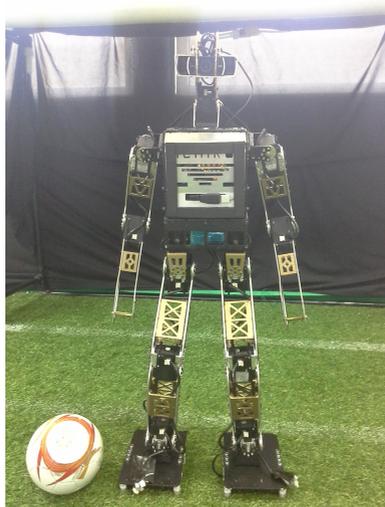
## **3.2 Desain Robot**

### **3.2.1 Mekanik Robot**

Robot humanoid yang dirancang dalam hal ini memiliki jumlah dof sebanyak 20 dof, diantaranya 12 dof ada pada kaki, 6 dof di tangan, dan 2 dof di kepala. Dalam perancangan mekanik robot ini, bentuk dan fungsinya disesuaikan untuk kemampuan dalam kecerdasan bermain sepak bola. Ukuran bentuk dan konstruksi robot dari ukuran telapak kaki, panjang tangan dan luas alas kaki disesuaikan dengan aturan yang berlaku dalam *robocup*. Desain robot yang dibuat menggunakan referensi dari robot Nimbro - OP yang merupakan tim robot dari Jerman[7]. Desain robot tidak sepenuhnya sama, terdapat beberapa modifikasi pada bagian kepala, badan, tangan dan kaki. Hal ini dikarenakan keterbatasan bahan dan proses pemotongan yang dapat dilakukan di industri Indonesia. Selain itu juga, robot dilakukan pengecilan ukuran dimana robot Nimbro-OP yang berukuran 95 cm, dilakukan desain ulang sehingga mendapatkan desain tinggi robot sebesar 84.4 cm. Pada ukuran tersebut, robot dapat bermain pada tingkat kid-size dan teen-size pada pertandingan *robocup*. Desain rancangan mekanik robot humanoid ada pada gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Rancang Desain Mekanik Robot

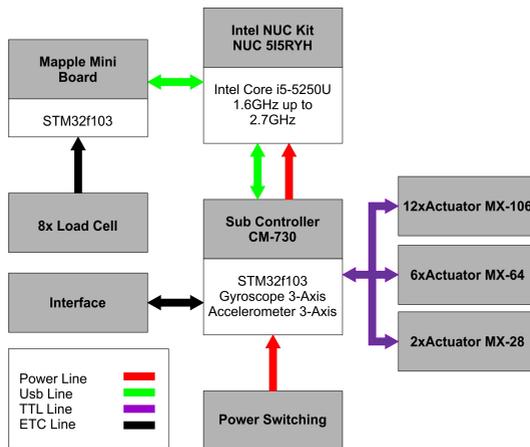


**Gambar 3.3** Realisasi Robot Humanoid

Bahan yang digunakan dalam robot ini menggunakan bahan jenis *aluminium alloy* tipe 5052 dengan ketebalan 2mm, 3mm dan 5 mm yang dipotong menggunakan mesin CNC. Proses pemotongan dan bending aluminium dilakukan dengan presisi yang rendah walaupun hal tersebut dikerjakan pada industri, sehingga banyak part yang harus dimodifikasi dan dipotong secara manual agar part robot sesuai dan dapat dirangkai dengan part lain. Dengan adanya kondisi tersebut akan mengakibatkan masalah tersendiri untuk keseimbangan robot karena ada perbedaan part antara part penggerak bagian kanan dan kiri. Penggerak robot dalam rancangan ini menggunakan servo merek *Dynamixel* dengan tipe MX-106T untuk kaki, MX-64T untuk tangan, MX-28T untuk kepala. Penentuan jenis servo tersebut disesuaikan dengan kebutuhan robot untuk torsi yang besar dalam setiap pergerakan. Realisasi robot humanoid ada pada gambar 3.3

### 3.2.2 Elektronik Robot

Robot yang telah dirancang tidak bisa dihidupkan tanpa adanya kecerdasan buatan yang ditanam pada robot. Oleh karena itu, robot diperlukan kontroler yang terlihat dalam desain rancangan sistem pada gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Rancang Desain Elektronik Robot

### 3.2.2.1 *Main Controller*

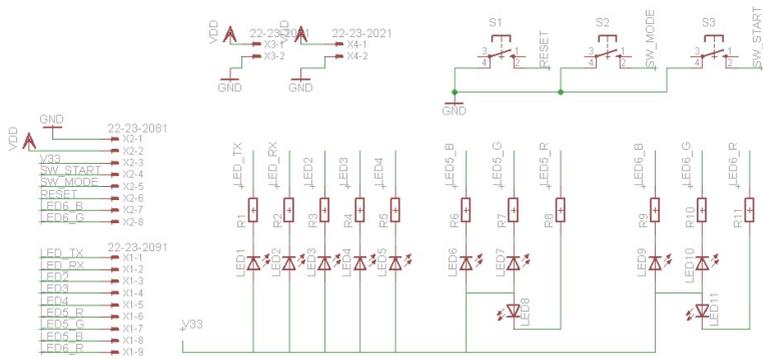
*Main Controller* sebagai pusat kendali, kecerdasan dan penentuan berbagai aksi pada robot menggunakan PC mini Intel NUC Tipe 5i5ryh. PC tersebut menggunakan prosesor Intel Core i5 generasi 5 yang memiliki kemampuan proses hingga mencapai 2.7GHz dan memiliki kapasitas RAM sebesar 4GB serta penyimpanan menggunakan SSD 120 GB. Dengan ukuran dan kebutuhan daya kecil pada PC tersebut, maka dapat diletakkan pada badan robot dan dijalankan secara *portable* menggunakan baterai Lithium Pollymer 4S 3300 mAH yang mampu bertahan selama 1 jam.

### 3.2.2.2 *Sub Controller*

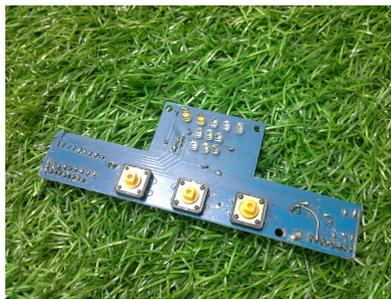
Dalam *sub controller* ini terdapat dua kontroler. Kontroler pertama menggunakan CM730 yang digunakan untuk mengontrol servo pada masing-masing *joint* robot. Kontroler tersebut terhubung ke *main controller* menggunakan jalur komunikasi serial. Selain untuk mengontrol servo, kontroler tersebut juga mengolah data sensor IMU dan menerima data tombol dari *interface* untuk dikirimkan pada *Main Controller*. Kontroler kedua yaitu Maple Mini yang digunakan untuk mengolah data sensor tekanan agar didapatkan informasi pusat tekanan robot. Maple mini terhubung dengan *main controller* menggunakan jalur komunikasi Serial.

### 3.2.2.3 *Interface*

*Interface* pada robot ini berguna sebagai penghubung antar muka antara robot dengan pengguna. *Interface* ini terhubung dengan *sub controller*. Bentuk *interface* berupa tiga tombol dan 10 led untuk indikator. Tiga tombol tersebut diantaranya yaitu tombol *mode* untuk memilih berbagai pilihan program yang akan dijalankan, *start/stop* untuk menjalankan atau menghentikan *mode* dan *reset* untuk menonaktifkan torsi pada semua servo sehingga servo akan lemas dan tidak mempertahankan posisi yang telah dibuat sebelumnya. Sedangkan led tersebut diantaranya yaitu led TX dan RX untuk indikator komunikasi antara *main controller* dengan *sub controller*, tiga led mode RGB untuk pilihan mode yang dapat dikombinasikan led tersebut untuk 9 mode dan led indikator RGB yang dapat kita atur sesuai kebutuhan. Skematik dan realisasi board ada pada Gambar 3.5 dan Gambar 3.6.



**Gambar 3.5** Rancangan Skematik Interface

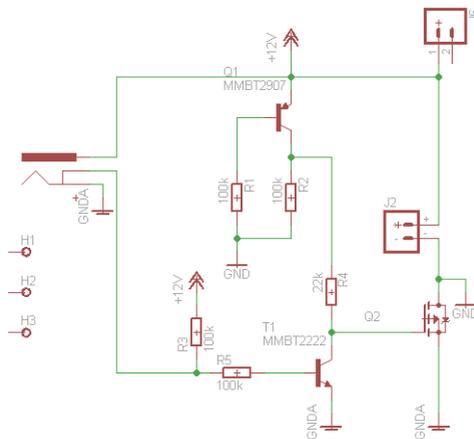


**Gambar 3.6** Realisasi Board Interface

### 3.2.2.4 Power Switching

*Power Switching* berguna sebagai sumber tenaga untuk *mode switching* antara baterai Lithium Pollymer dengan adaptor. Robot ini menggunakan baterai Li-Po 4 cell atau yang setara dengan 16.8v dan memiliki kapasitas 3300 mA.H. Saat kondisi robot bermain dalam lapangan, robot akan menggunakan baterai Lithium Pollymer, sehingga *power switching* akan memilih ke baterai tersebut. Saat robot dalam kondisi istirahat, agar menghemat pengeluaran daya pada baterai walaupun dalam kondisi diam, maka sumber tenaga robot menggunakan adaptor. Pada kondisi tersebut, sumber adaptor dan baterai tidak akan menyatu dan dipisahkan dengan

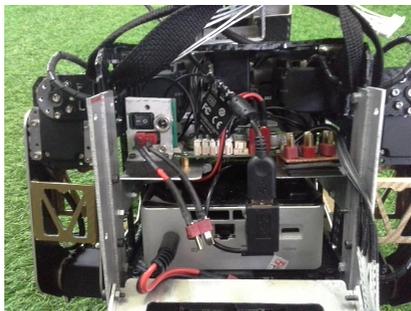
*power switching* walaupun kedua sumber tersebut dicolokkan secara bersamaan. Tujuan hal ini adalah jika sumber adaptor dan baterai Lithium Pollymer dibuat menyatu secara paralel, maka akan terjadi proses charge secara langsung pada baterai. Proses *charge* tersebut akan menyebabkan baterai menjadi rusak karena proses charge pada baterai Lithium Pollymer harus dikontrol agar masing-masing cell pada baterai memiliki daya charge yang sama. Skematik dan realisasi board ada pada Gambar 3.7 dan Gambar 3.8.



**Gambar 3.7** Rancangan Skematik Power Switching



**Gambar 3.8** Realisasi Board Power Switching



**Gambar 3.9** Penempatan Elektrik Pada Badan Robot

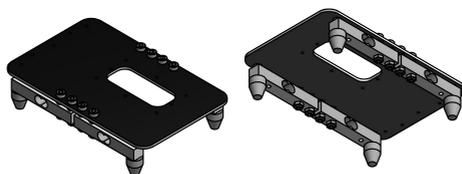
Semua part elektronik robot termasuk mini PC, CM730, Maple mini, *interface* dan *power switching* diletakkan pada badan robot. Gambar 3.9 menunjukkan penempatan elektronik pada badan robot.

### **3.3 Sistem Rancangan Sensor Tekanan Robot**

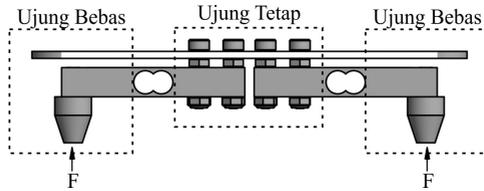
Sensor tekanan yang diterapkan di robot humanoid menggunakan loadcell model YZC-133 dengan berat maksimal yang dapat terukur yaitu 10Kg dengan *Zero Output* sebesar 0.1mV/V dan *Rated Output* sebesar 1mV/V0.15mV/V. Sensor loadcell diletakkan pada alas kaki robot. Sensor tersebut akan memberikan informasi data tekanan yang memijak pada dasar robot yang kemudian diolah untuk mendapatkan pusat tekanan.

#### **3.3.1 Penempatan Sensor Tekanan Pada Robot**

Desain rancangan penempatan loadcell pada alas kaki robot ada pada gambar 3.10. Dari gambar 3.10, terlihat bahwa pada masing-masing alas



**Gambar 3.10** Desain Peletakan Loadcell Pada Alas Kaki Robot



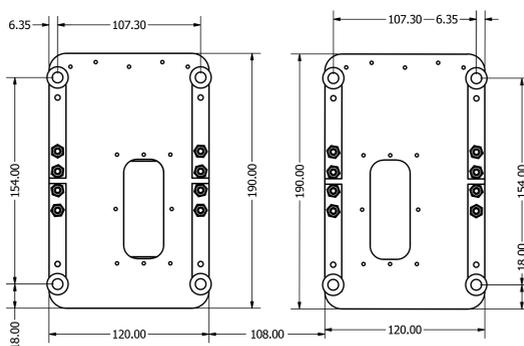
**Gambar 3.11** Struktur Loadcell Pada Alas Kaki

kaki terpasang loadcell yang berjumlah 4 buah. Loadcell ini diletakkan pada ujung dari setiap alas kaki. Tujuan peletakan 4 loadcell pada ujung-ujung alas kaki dikarenakan agar distribusi pusat tekanan menjadi mudah serta dapat mengetahui kondisi sensor tekanan yang tidak menapak apabila berada di permukaan yang tidak rata. Peletakan loadcell yang ada pada ujung alas kaki ini akan memberikan informasi bagaimana kondisi tekanan robot saat berdiri. Dalam rancangan tersebut, terdapat bagian ujung tetap dan ujung bebas yang dapat dilihat pada gambar 3.11. Ujung tetap pada loadcell ini disambungkan pada dasar alas kaki robot, sedangkan pada ujung bebas ini nantinya akan mendapatkan gaya dari dasar robot. Pada ujung bebas diberikan tambahan pul yang berbentuk seperti pull sepatu sepak bola pada umumnya dengan menggunakan bahan aluminium. Tujuan pemberian pull ini adalah sebagai dasar tambahan untuk mempermudah loadcell untuk mendapatkan tekanan gaya dari dasar robot. Selain itu juga pemberian pull ini untuk mempermudah robot dalam berjalan di lantai yang tidak merata seperti halnya rumput sintetis untuk permainan sepak bola robot saat ini.

Dari hasil desain tersebut, dilakukan realisasi penempatan loadcell pada alas kaki robot. Hasil realisasi penempatan loadcell pada alas kaki robot ada pada gambar 3.12. Terlihat bahwa dalam satu alas kaki membutuhkan empat loadcell, sehingga dalam satu robot membutuhkan delapan loadcell untuk mendapatkan informasi tekanan robot. Dalam rancangan desain tersebut, luas alas kaki dibuat dengan dimensi maksimal. Penentuan maksimal luas alas kaki robot ditentukan berdasarkan tinggi robot dan tinggi pusat massa pada bagian badan robot. Desain ukuran luas alas kaki robot ada pada gambar 3.13



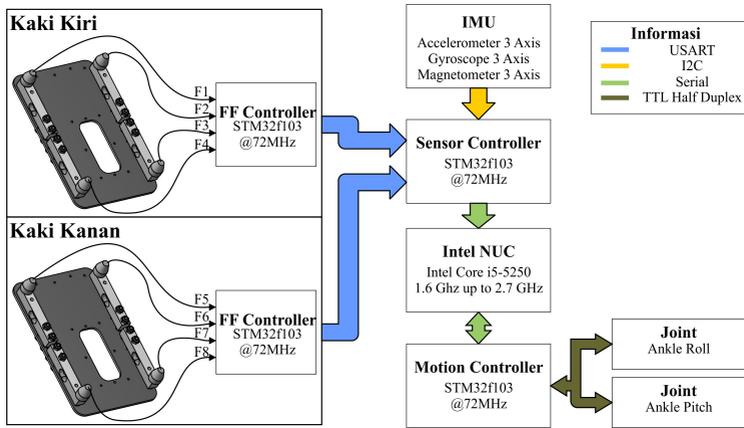
**Gambar 3.12** Penempatan Loadcell Pada Alas Kaki Robot



**Gambar 3.13** Desain Ukuran Alas Kaki

### 3.3.2 Kontroler Elektronik Sensor Tekanan

Setelah dirancang sistem peletakan loadcell pada robot, maka dilakukan perancangan elektrik untuk pengambilan dan pengolahan data. Desain sistem elektrik untuk pengambilan data ada pada gambar 3.14. Setiap loadcell memiliki empat keluaran kabel yaitu eksitasi positif, eksitasi negatif, sinyal positif dan sinyal negatif. Jika terdapat empat loadcell dalam satu alas kaki robot, maka kabel yang keluar dari alas kaki robot berjumlah enam belas. Jika kabel tersebut dihubungkan ke *sub-controller* secara langsung yang ada pada badan robot, maka akan menyebabkan gangguan pergerakan pada kaki robot saat melakukan aksi gerak dikarenakan kabel

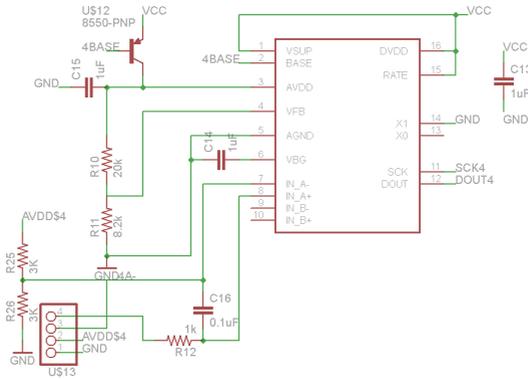


**Gambar 3.14** Desain Sistem Pengambilan Data

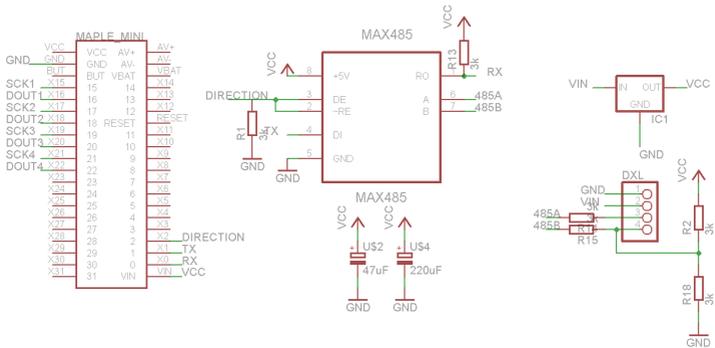
yang terlalu banyak. Sehingga untuk membuat kabel yang terhubung pada badan robot menjadi lebih sederhana, dibuat kontroller elektrik secara terpisah yang diletakkan pada alas kaki yang berfungsi untuk mengolah hasil informasi dari loadcell.

Setelah dilakukan perhitungan pusat tekanan masing-masing pada alas kaki, maka data tersebut dikirim ke *sensor controller* yang ada pada badan robot menggunakan komunikasi serial. Dalam *sensor controller*, data pusat tekanan dari hasil yang dikirim masih dalam data posisi pusat tekanan untuk kaki kanan dan data posisi pusat tekanan untuk kaki kiri, Sehingga dalam kontroler ini juga dilakukan perhitungan data untuk mendapatkan posisi pusat tekanan terhadap robot. Setelah itu dilakukan perhitungan dan penentuan kondisi robot dari data sensor yang ada untuk menggerakkan servo robot melalui *motion controller* yang terhubung dengan menggunakan komunikasi serial.

Data keluaran dalam loadcell saat mendapatkan tekanan berupa nilai resistansi. Nilai resistansi tersebut disusun membentuk jembatan wheats-tone dengan eksitasi positif dihubungkan ke tegangan supply 5 volt dan eksitasi negatif dihubungkan ke ground. Sinyal positif dan sinyal negatif dihubungkan ke dalam IC HX711. IC tersebut merupakan IC khusus untuk mengolah data sensor loadcell. Sinyal positif dan sinyal negatif akan dilakukan penguatan dengan tambahan filter *low-noise*. Kemudian data



**Gambar 3.15** Skematik Rangkaian HX711



**Gambar 3.16** Skematik Rangkaian Maple Mini

analog tersebut dikonversikan menjadi data digital dengan panjang data sebanyak 24 bit. Data tersebut yang kemudian akan dibaca oleh kontroler untuk diolah. Skematik Rangkaian untuk HX711 dan loadcell ada pada gambar 3.15. Kontroler yang digunakan untuk mengolah loadcell menggunakan maple mini board. Pada kontroler ini membutuhkan tegangan kerja supply sebesar 5 volt. Tegangan supply tersebut diambil dari tegangan supply yang ada pada servo yang memiliki tegangan sebesar 16 volt. Sehingga diperlukan rangkaian regulator untuk mengkonversikan



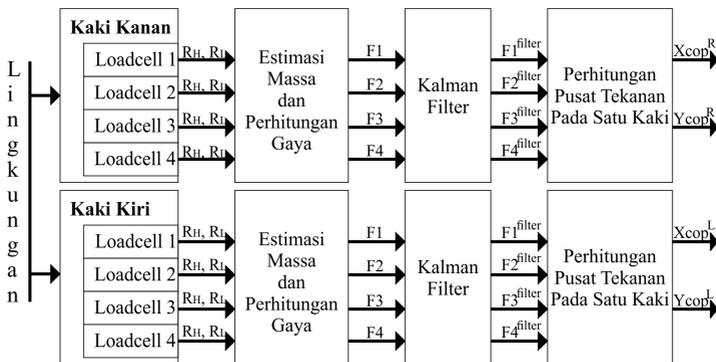
**Gambar 3.17** Realisasi Board Elektronik Loadcell

tegangan menjadi 5 volt untuk kerja kontroler. Skematik rangkaian untuk regulator dan maple mini ada pada gambar 3.16

Skematik dari HX711 dan kontroler digabung menjadi satu board dan diletakkan pada alas kaki robot. Dikarenakan ada empat loadcell, maka kebutuhan skematik HX711 untuk mengolah loadcell dibuat menjadi empat rangkaian. Realisasi board kontroler untuk loadcell ada pada gambar 3.17

### 3.4 Estimasi Gaya dan Penentuan Pusat Tekanan

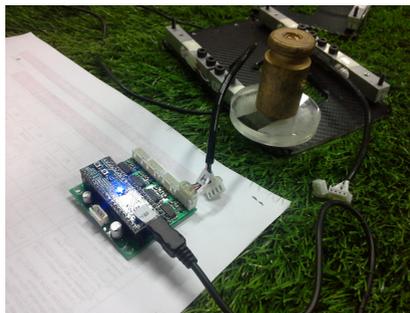
Agar data pusat tekanan dapat diperoleh dengan hasil yang bagus, maka loadcell harus diolah terlebih dahulu melalui berbagai tahapan seperti rancangan desain sistem pada gambar 3.18



**Gambar 3.18** Desain Sistem Estimasi Gaya dan Penentuan Pusat Tekanan

### 3.4.1 Karakterisasi Loadcell

Loadcell tipe YZC-133 memiliki spesifikasi *nonlinear* sebesar 0.05% *full scale* dan keluaran data berupa tegangan. Oleh karena itu perlu dilakukan konversi data untuk dijadikan satuan massa. Sebelum dikonversi menjadi massa, data keluaran loadcell dilakukan penguatan dan konversi menjadi data digital dengan resolusi 24 bit dan tegangan referensi yaitu 5 volt. Hal ini bertujuan agar kontroler dapat membaca informasi tegangan yang dikeluarkan oleh loadcell tersebut. Nilai tegangan yang didapatkan akan sulit untuk dikonversikan menjadi massa karena sifatnya loadcell sendiri yang *nonlinear*. Untuk mengatasi hal tersebut, maka dilakukan pencarian hubungan antara massa obyek yang sebenarnya dan tegangan yang terukur dengan cara melakukan pengambilan data dengan berbagai variasi obyek. Massa obyek yang sebenarnya dapat diketahui dengan timbangan digital yang sudah dijual dipasaran. Untuk memastikan keakuratan timbangan digital tersebut, maka dalam pengambilan massa obyek yang sebenarnya diukur menggunakan tiga timbangan digital dengan merek yang berbeda, lalu dicari nilai rata-rata dari hasil ketiga timbangan tersebut. Setelah diketahui massa dari obyek tersebut, obyek diletakkan pada loadcell dan dilakukan pencatatan tegangan yang dihasilkan. Setelah itu dilakukan percobaan kembali dengan obyek massa yang berbeda. Gambar 3.19 menunjukkan cara pengambilan massa pada setiap loadcell. Hasil pengambilan data dari massa dan tegangan yang dihasilkan tersebut dibuat dalam bentuk grafik lalu dilakukan pendekatan dengan regresi polynomial, sehingga didapatkan persamaan untuk mendapatkan hubung-



**Gambar 3.19** Proses Pengambilan Data Untuk Karakterisasi Loadcell

an antara massa dan tegangan. Setelah itu dilakukan konversi dari massa menjadi tekanan menggunakan persamaan 3-1 dengan  $F$  adalah tekanan,  $m$  adalah massa dan  $a$  adalah percepatan gravitasi.

$$F = m * a \quad (3-1)$$

### 3.4.2 Filter Data

Saat pembacaan data tekanan pada setiap loadcell, data yang terbaca akan selalu berubah-ubah walaupun dalam kondisi diam. Hal ini dikarenakan adanya *noise* pada lingkungan sekitar atau dari mekanik loadcell sendiri yang mengakibatkan pembacaan data loadcell berubah-ubah. Jika hal tersebut diterapkan langsung pada robot untuk pembangkitan postur atau keseimbangan robot, maka akan membuat robot bergetar dan sulit mencapai kondisi *steady-state*. Untuk mengatasi hal tersebut perlu ditambahkan kalman filter agar data yang dibaca menjadi lebih stabil. Kalman filter disini berperan untuk mengestimasi data keluaran selanjutnya dari data masukan yang diterima sebelumnya.

Dalam kalman filter, hal yang perlu diketahui adalah *noise* proses, *noise* sensor, estimasi error, kalman gain dan nilai inisial. Pada kondisi awal, dilakukan pencarian estimasi error yang ditambahkan dengan *noise* proses seperti pada persamaan 3-2 dengan  $p$  merupakan estimasi error dan  $q$  adalah *noise* proses.

$$p = p * q \quad (3-2)$$

Dari persamaan tersebut didapatkan *update* data estimasi error. Data tersebut diolah dengan *noise* sensor. Sehingga akan didapatkan nilai *kalman gain* seperti pada persamaan 3-3 dengan  $k$  merupakan *kalman gain* dan  $r$  merupakan *noise* sensor.

$$k = \frac{p}{p + r} \quad (3-3)$$

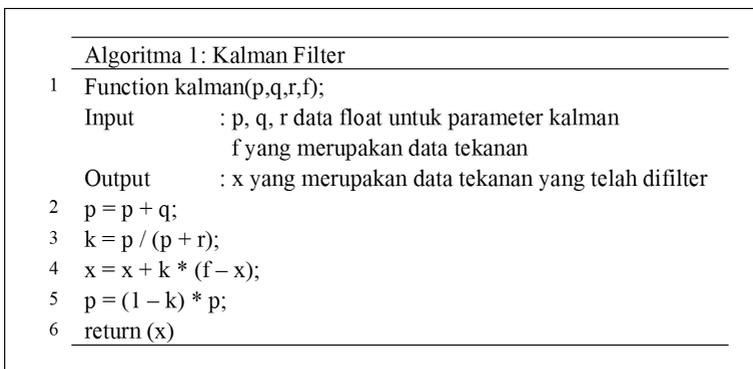
Persamaan diatas dikalikan dengan data pusat tekanan yang terbaca dan ditambah dengan nilai inisial, sehingga akan didapatkan data baru yang telah di filter. Persamaan 3-4 merupakan persamaan untuk mendapatkan data tekanan yang di filter dengan  $x$  merupakan nilai inisial sekaligus sebagai nilai tekanan yang telah difilter dan  $F$  merupakan tekanan masukan yang akan difilter.

$$x = x + (k * (F - x)) \quad (3-4)$$

Setelah didapatkan tekanan yang telah difilter, maka dilakukan update kembali pada estimasi error dengan persamaan 3-5.

$$p = (1 - k) * p \quad (3-5)$$

Kondisi tersebut akan berulang kembali dari persamaan 3-3 sampai persamaan 3-5 untuk mendapatkan data tekanan yang telah difilter. Dalam penerapan kalman filter, digunakan  $q$  sebesar 0.125,  $r$  sebesar 32,  $p$  sebesar 1023 dan  $x$  sebesar 0. Algoritma perancangan kalman filter ada pada Gambar 3.20.



**Gambar 3.20** Algoritma Kalman Filter

### 3.4.3 Penentuan Posisi Pusat Tekanan Pada Alas Kaki

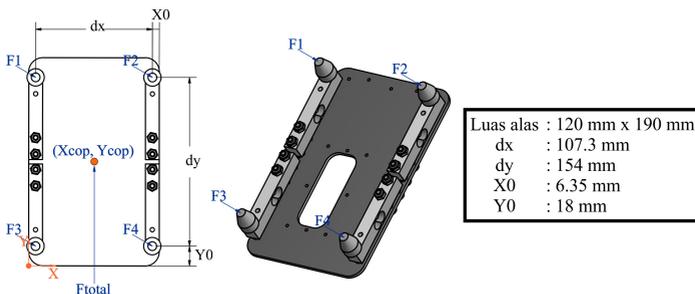
Untuk mendapatkan pusat tekanan terhadap robot, tiap masing-masing alas kaki diperhitungkan terlebih dahulu nilai tekanan yang ditekan oleh setiap alas kaki. Setelah didapatkan nilai tersebut, maka dicari pusat tekanan pada salah satu alas kaki. Untuk mendapatkan pusat tekanan pada salah satu alas kaki dapat menggunakan persamaan 3–6 dan persamaan 3–7 untuk posisi koordinat untuk kaki kiri dan persamaan 3–8 dan persamaan 3–9 untuk posisi koordinat untuk kaki kanan. Gambar 3.21 menunjukkan ukuran alas kaki dan posisi masing-masing ukuran.

$$X_{copl} = X0 + \frac{(F2 + F4) * dx}{F1 + F2 + F3 + F4} \quad (3-6)$$

$$Y_{copl} = Y0 + \frac{(F1 + F2) * dy}{F1 + F2 + F3 + F4} \quad (3-7)$$

$$X_{copr} = X0 + \frac{(F2 + F4) * dx}{F1 + F2 + F3 + F4} \quad (3-8)$$

$$Y_{copr} = Y0 + \frac{(F1 + F2) * dy}{F1 + F2 + F3 + F4} \quad (3-9)$$



**Gambar 3.21** Penentuan Pusat Tekanan Pada Satu Alas Kaki

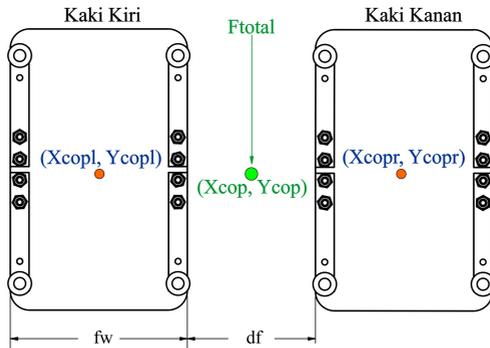
Dari Persamaan diatas akan didapatkan posisi tekanan pada masing-masing loadcell dengan pusat tekanan jika didapatkan kondisi tekanan loadcell bernilai sama akan berada di koordinat (60, 95) dan saat tidak ada tekanan pada masing-masing loadcell, posisi tekanan akan berada di koordinat (0, 0). Dalam hal ini, alas kaki kanan dan alas kaki kiri menggunakan persamaan yang sama dengan koordinat  $(x, y)$  sama seperti pada Gambar 3.21.

### 3.4.4 Penentuan Posisi Pusat Tekanan Terhadap Robot

Ketika posisi pusat tekanan pada masing-masing alas kaki didapat, maka data tersebut dikirim ke kontroler yang ada pada badan robot. Data tersebut kemudian diolah untuk didapatkan posisi pusat tekanan terhadap robot yang menapak pada kondisi saat itu. Selain data posisi pusat tekanan, data tekanan pada masing-masing loadcell dikirim juga untuk memastikan apabila ada kesalahan pengiriman data. Dalam mencari posisi pusat tekanan terhadap robot dapat menggunakan Persamaan 3-10 untuk koordinat  $x$  dan Persamaan 3-11 untuk koordinat  $y$ . Gambar 3.22 menunjukkan posisi pusat tekanan yang didapatkan terhadap robot.

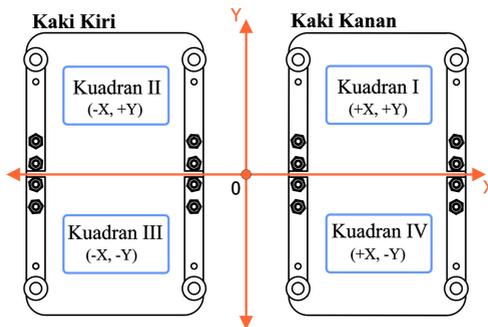
$$X_{cop} = X_o + \left( \frac{(F2l + F4l + F2r + F4r) * dx}{F_{total}} \right) + \left( \frac{(F1r + F2r + F3r + F4r) * (fw + df)}{F_{total}} \right) \quad (3-10)$$

$$Y_{cop} = Y_o + \left( \frac{(F1l + F2l + F1r + F2r) * dy}{F_{total}} \right) \quad (3-11)$$



**Gambar 3.22** Penentuan Pusat Tekanan Terhadap Robot

Dari peletakan posisi pusat tersebut, maka kondisi robot saat berdiri akan dibagi dalam 4 kondisi dilihat dari kuadran posisi koordinat kartesian. Yang pertama yaitu saat di kuadran I yang menandakan bahwa robot cenderung miring ke kanan dan depan. Kuadran II yang menandakan bahwa robot cenderung miring ke kiri dan depan. Kuadran III yang menandakan bahwa robot cenderung miring ke kiri dan belakang. Dan kuadran IV yang menandakan bahwa robot cenderung miring ke kanan dan belakang. Gambar 3.23 menunjukkan letak masing-masing kuadran pada alas kaki robot untuk posisi pusat tekanan.

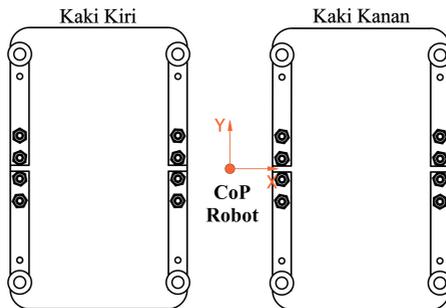


**Gambar 3.23** Pembagian Posisi Kuadran Pada Robot

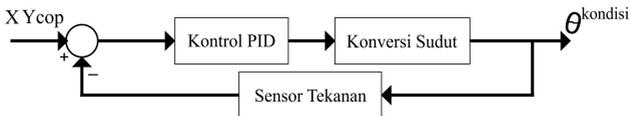
### 3.5 Penghitungan Sudut Kondisi Pusat Tekanan Robot

Posisi pusat tekanan robot dalam kondisi seimbang yaitu berada pada posisi koordinat  $(0, 0)$ . Pada kondisi tersebut robot berada pada kondisi titik pusat massa dan gravitasi robot. Sehingga titik koordinat  $(0, 0)$  merupakan nilai *setpoint* pada robot. Gambar 3.24 menunjukkan letak koordinat pusat untuk pusat tekanan robot.

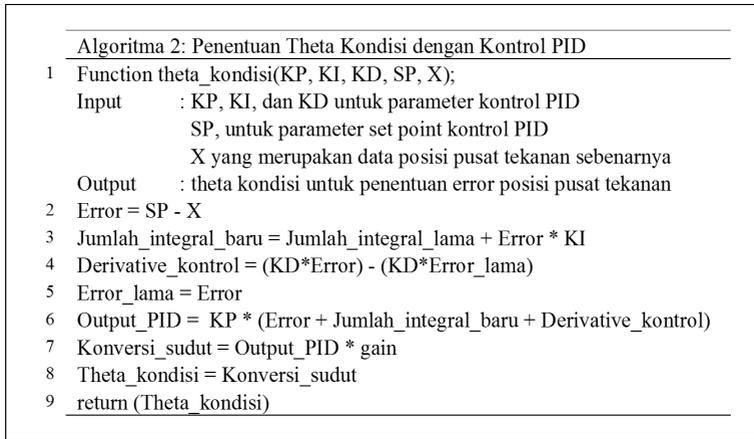
Saat posisi pusat tekanan robot tidak berada di posisi koordinat  $(0, 0)$ , maka robot akan berada di kondisi yang tidak seimbang. Sehingga perlu ditentukan  $\theta$  kondisi agar robot kembali pada posisi seimbang. Untuk mendapatkan  $\theta$  kondisi dapat diperhitungkan dengan menggunakan kontrol PID agar respon  $\theta$  kondisi yang diberikan menjadi lebih halus untuk pergerakan robot. Posisi pusat tekanan yang terbaca akan dikurangi dengan koordinat  $(0, 0)$  yang merupakan *setpoint* pada robot, sehingga didapatkan nilai error. Kontrol PID akan menentukan  $\theta$  kondisi yang kemudian akan ditambahkan dengan  $\theta$  asli untuk kontrol selanjutnya. Dalam kontrol PID dilakukan tuning  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  agar mendapatkan respon yang cepat mencapai *steady state*. Dalam tuning tersebut didapatkan  $K_p$  sebesar 0.001,  $K_i$  sebesar 0 dan  $K_d$  sebesar 0.001 pada bidang *frontal* un-



Gambar 3.24 Posisi Pusat Tekanan Robot



Gambar 3.25 Diagram Sistem Kontrol PID untuk Penentuan  $\theta$  kondisi



**Gambar 3.26** Algoritma Penghitungan  $\theta$  kondisi

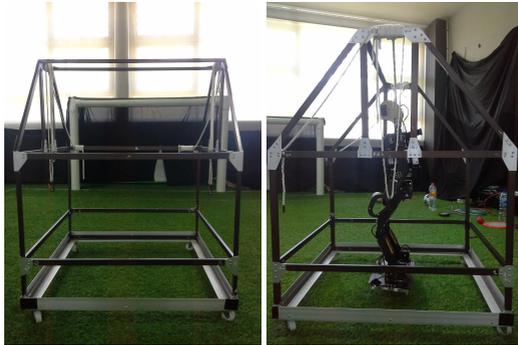
tuk koordinat x dan Kp sebesar 0.005, Ki sebesar 0 dan Kd sebesar 0.001 pada bidang *sagital* untuk koordinat y. Gambar 3.25 menunjukkan blok diagram kontrol PID untuk penentuan  $\theta$  kondisi. Algoritma untuk penghitungan  $\theta$  kondisi ada pada Gambar 3.26.

### 3.6 Pembangkitan Postur Berdiri Robot

Pembuatan postur berdiri robot merupakan hal dasar untuk pergerakan pada robot, karena berbagai tindakan aksi dari robot akan dimulai dengan postur berdiri robot dan diakhiri dengan postur berdiri lagi. Jika postur berdiri robot yang dibuat tidak berada pada kondisi yang tepat, maka akan menyebabkan kesulitan dalam mengerjakan aksi lainnya seperti kondisi berjalan ataupun menendang dan akan mudah terjatuh. Dalam mendapatkan postur berdiri robot dapat dilakukan dengan dua tahap, yaitu pembangkitan postur berdasarkan pusat massa robot dan pembangkitan postur dengan kontrol PID dari data posisi pusat tekanan.

#### 3.6.1 Pembangkitan Postur Berdasarkan Pusat Massa

Tahap pertama untuk pembangkitan postur berdiri yaitu pembangkitan postur berdasarkan pusat massa robot. Untuk melihat kondisi seperti ini akan sulit jika dilakukan secara kasat mata karena pusat massa robot ha-

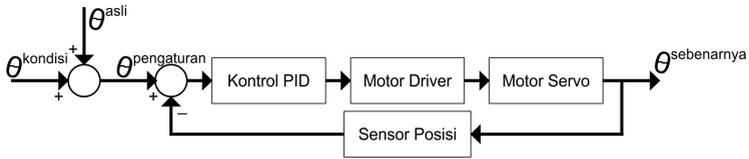


**Gambar 3.27** Pembuatan Postur Berdiri Robot Sebagai Dasar Awal

rus berada dalam pusat gravitasi robot. Untuk mendapatkan kondisi robot berada di dalam pusat massa robot dapat dilakukan dengan perhitungan, namun hal ini juga akan dapat berubah jika pada robot ditambahkan part atau elektronik. Untuk mempermudah hal tersebut, pembangkitan postur dapat dilakukan dengan bantuan rangka pembangkit postur. Dengan bantuan tersebut dapat diketahui kondisi pusat massa robot apakah tepat berada di pusat gravitasi. Lalu pembentukan postur robot dilakukan dengan metode *forward kinematics*. Nilai sudut pada setiap servo ditentukan nilainya hingga terbentuk posisi berdiri. Gambar 3.27 menunjukkan pembangkitan postur berdiri robot untuk melihat kondisi pusat massa robot.

### **3.6.2 Pembangkitan Postur Dengan Pusat Tekanan**

Tahap kedua untuk pembangkitan postur berdiri robot yaitu pembangkitan postur dengan kontrol PID dari data posisi pusat tekanan. Ketika postur berdiri robot telah dibuat dari kondisi pertama, robot diletakkan pada lantai untuk melihat posisi tekanan robot. Kondisi robot yang berdiri dengan tepat harus mempunyai posisi pusat tekanan yang berada di koordinat  $(0, 0)$ . Jika didapatkan posisi pusat tekanan robot yang tidak berada pada kondisi pusat koordinat, maka dilakukan penghitungan nilai error untuk mendapatkan  $\theta$  kondisi yang kemudian ditambahkan dengan  $\theta$  asli yang didapatkan pada pembangkitan postur yang pertama untuk mendapatkan postur baru. Saat kondisi tersebut, servo pada awalnya ak-



**Gambar 3.28** Diagram Sistem Kontrol PID untuk Pembangkitan Postur Baru

an mengirim data berupa posisi  $\theta_{sebenarnya}$  untuk dikurangi dengan  $\theta_{pengaturan}$ .  $\theta_{pengaturan}$  dapat berupa  $\theta_{asli}$  atau  $\theta_{asli}$  yang ditambahkan dengan  $\theta_{kondisi}$  dari data posisi pusat tekanan. Hasil pengurangan antara  $\theta_{pengaturan}$  dengan  $\theta_{sebenarnya}$  akan dijadikan nilai sinyal error untuk kontrol PID. Kontrol PID akan mengirimkan resolusi bit pada Motor Driver yang ada pada Servo Dynamixel. Motor Driver akan mengirimkan arus untuk menggerakkan posisi motor sesuai dengan resolusi bit yang dikirim. Resolusi bit pada motor Dynamixel memiliki nilai dari 0-4096 yang dikonversikan menjadi sudut yaitu dari 0-360. Pada motor dynamixel terdapat *contactless absolute encoder* untuk pembacaan posisi sebenarnya dari motor. Gambar 3.28 menunjukkan diagram blok kontrol PID untuk pembangkitan postur baru.

Dalam kontrol PID, dilakukan tuning pada  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  untuk mendapatkan respon yang cepat dan memiliki overshoot yang rendah. Dengan tuning tersebut didapatkan nilai  $K_p$  sebesar 30,  $K_i$  sebesar 3 dan  $K_d$  sebesar 2. Bagian *joint* yang mendapatkan  $\theta_{kondisi}$  untuk menyeimbangkan robot ada pada bagian pergelangan kaki yang mengarah pada kondisi *sagital* dan *frontal*. Dengan kontrol tersebut, maka robot dapat membentuk postur berdiri baru dengan kondisi yang seimbang. Algoritma untuk pembangkitan postur baru dari informasi posisi pusat tekanan ada pada Gambar 3.29.

```

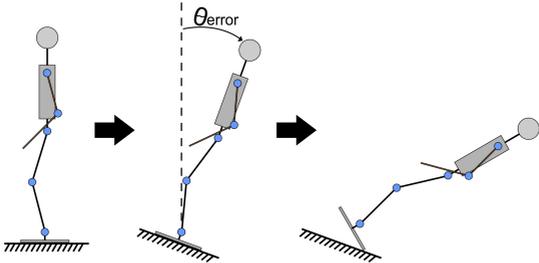
Algorithm 3: Pembangkitan Postur Dengan Kontrol PID Pusat Tekanan
1 Function theta_sebenarnya(KP, KI, KD, J, K);
Input      : KP, KI, dan KD untuk parameter kontrol PID
           : J yang merupakan data theta kondisi dari error posisi
           : K yang merupakan data theta asli yang dibentuk oleh servo
           : X yang merupakan data theta pengaturan sebagai set point
Output     : theta sebenarnya untuk pembangkitan postur baru
2 X = J + K
3 Error = SP - X
4 Jumlah_integral_baru = Jumlah_integral_lama + Error * KI
5 Derivative_kontrol = (KD*Error) - (KD*Error_lama)
6 Error_lama = Error
7 Output_PID = KP * (Error + Jumlah_integral_baru + Derivative_kontrol)
8 Konversi_Sudut = Output_PID * gain
9 Output_posisi_baru = Output_posisi_lama + (Arah_putar*Konversi_Sudut)
10 Theta_sebenarnya = Output_posisi_baru
11 return (Theta_sebenarnya)

```

**Gambar 3.29** Algoritma Pembangkitan Postur Baru

**3.7 Sistem Keseimbangan Robot**

Keseimbangan menjadi hal terpenting dalam robot untuk menjaga kondisi robot dalam mempertahankan posisi yang diinginkan. Robot harus mengetahui posisi tubuh robot apakah sedang dalam kondisi aman atau berada dalam kondisi yang akan jatuh. Jika robot tidak dapat mengetahui kon-

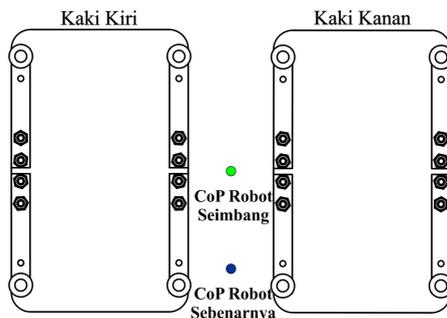


**Gambar 3.30** Kondisi Berdiri Robot Tanpa Menggunakan Kontrol Keseimbangan Saat Dimiringkan Dari Depan

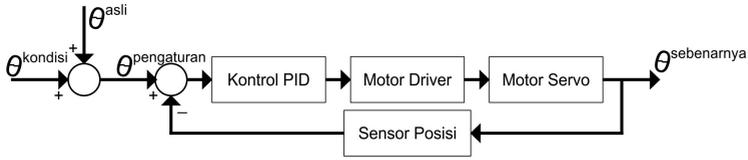
disi robot saat ini, maka saat ada gangguan gaya dari luar akan membuat robot mudah untuk jatuh. Gambar 3.30 menunjukkan contoh kondisi robot berdiri dengan sudut kemiringan dan tidak ada kontrol keseimbangan robot.

Dari gambar 3.30 terlihat bahwa pada kondisi awal, masing-masing servo mempertahankan nilai sudut posisi yang telah ditentukan dalam berdiri. Ketika lantai dimiringkan dari depan yang menyebabkan robot miring ke belakang, maka robot akan jatuh jika masing-masing servo tetap mempertahankan sudut posisi yang ditentukan dalam berdiri. Sehingga jika robot mengetahui kemiringannya saat ini yang dalam hal ini disebut dengan  $\theta_{error}$ , hal tersebut dapat digunakan untuk menyeimbangkan kondisi robot. Untuk mengetahui kemiringan robot dapat menggunakan sensor IMU.

Selain dengan informasi kemiringan dengan sensor IMU, robot dapat diketahui kondisinya melalui informasi dari pusat tekanan. Dengan menggunakan informasi data posisi pusat tekanan, robot akan dapat mengetahui secara pasti pada kondisi kaki bagian mana yang tekanannya terlalu besar apabila berada di lantai yang miring sehingga robot dapat membenarkan posisi agar didapatkan posisi pusat tekanan yang seimbang. Kondisi robot dikatakan seimbang apabila posisi pusat tekanan robot berada dalam koordinat  $(0, 0)$ . Jika kondisi tersebut seperti pada Gambar 3.30, maka posisi pusat tekanan akan berada di kuadran iii dan iv. Gambar 3.31 menunjukkan posisi pusat tekanan robot saat lantai dimiringkan dari depan.



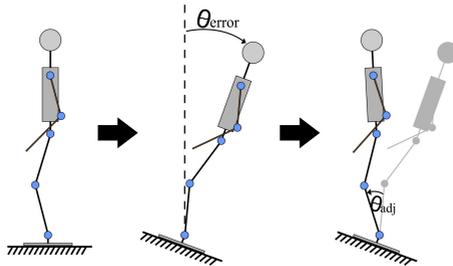
**Gambar 3.31** Posisi Pusat Tekanan Robot Saat dimiringkan dari Depan



**Gambar 3.32** Diagram Sistem Kontrol PID

Saat posisi pusat tekanan tidak pada kondisi seimbang, maka akan dilakukan penghitungan untuk mendapatkan  $\theta_{kondisi}$ .  $\theta_{kondisi}$  ditambahkan dengan  $\theta_{asli}$  yang merupakan *set point* lama posisi servo yang dibentuk oleh robot saat ini untuk didapatkan  $\theta_{pengaturan}$ .  $\theta_{pengaturan}$  ini merupakan *set point* baru untuk keseimbangan robot menggunakan kontrol PID. Diagram blok kontrol PID ada pada Gambar 3.32. Dalam blok tersebut,  $\theta_{pengaturan}$  akan dikurangi dengan  $\theta_{sebenarnya}$  untuk sinyal error yang akan digunakan pada kontrol PID.  $\theta_{sebenarnya}$  dapat dicari dengan menggunakan sensor posisi yang sudah ada dalam servo dynamixel menggunakan *contactless absolute encoder*. Kontrol PID akan mengeluarkan data resolusi bit kepada driver motor dan driver motor akan memberikan arus untuk menggerakkan servo robot ke sudut yang telah ditentukan. Dalam blok kontrol PID ditentukan nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  yang dicari dengan menggunakan metode tuning. Penentuan  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  ini agar didapatkan pergerakan robot yang cepat, halus dan dapat mencapai *steady-state*. Dari metode tuning tersebut, didapatkan nilai  $K_p$  sebesar 30,  $K_i$  sebesar 3 dan  $K_d$  sebesar 2.

Dalam menyeimbangkan kondisi tersebut, digunakan servo pada ba-



**Gambar 3.33** Keseimbangan Robot Pada Kemiringan Depan

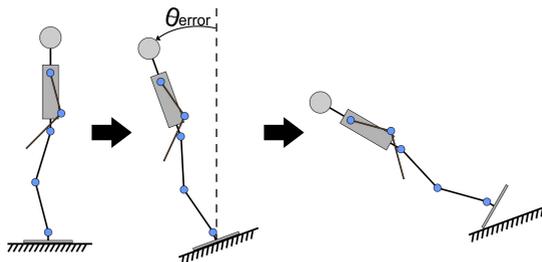
```

Algorithm 4: Keseimbangan Robot Dengan Kontrol PID Pusat Tekanan
1 Function theta_sebenarnya(KP, KI, KD, J, K);
Input      : KP, KI, dan KD untuk parameter kontrol PID
           : J yang merupakan data theta kondisi dari error posisi
           : K yang merupakan data theta asli yang dibentuk oleh servo
           : X yang merupakan data theta pengaturan sebagai set point
Output     : theta sebenarnya untuk pembangkitan keseimbangan robot
2 X = J + K
3 Error = SP - X
4 Jumlah_integral_baru = Jumlah_integral_lama + Error * KI
5 Derivative_kontrol = (KD*Error) - (KD*Error_lama)
6 Error_lama = Error
7 Output_PID = KP * (Error + Jumlah_integral_baru + Derivative_kontrol)
8 Konversi_Sudut = Output_PID * gain
9 Output_posisi_baru = Output_posisi_lama + (Arah_putar*Konversi_Sudut)
10 Theta_sebenarnya = Output_posisi_baru
11 return (Theta_sebenarnya)

```

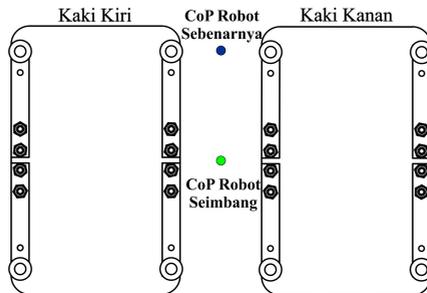
**Gambar 3.34** Algoritma Keseimbangan Robot

gian kaki untuk ditarik ke depan. Tujuan hal ini adalah untuk menarik posisi pusat tekanan robot agar semua telapak kaki mendapatkan tekanan yang sama, sehingga didapatkan posisi koordinat yang seimbang. Gambar 3.33 menunjukkan kondisi berdiri robot dengan menyeimbangkan diri saat lantai di kondisi miring. Algoritma untuk keseimbangan robot ada pada Gambar 3.34.

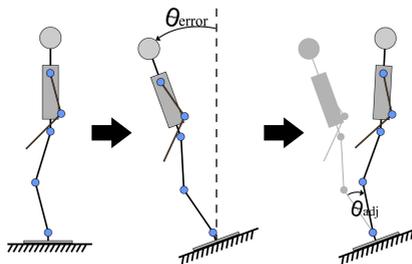


**Gambar 3.35** Kondisi berdiri robot tanpa menggunakan kontrol keseimbangan Saat dimiringkan dari Belakang

Hal tersebut juga berlaku saat kondisi robot dimiringkan dari belakang seperti pada Gambar 3.35. Saat kondisi tersebut, robot akan cenderung condong ke arah depan dan akan mudah jatuh jika tanpa menggunakan keseimbangan. Jika sensor keseimbangan robot menggunakan data IMU, maka robot akan bisa kembali ke kondisi awal robot, namun kondisi telapak kaki yang menyentuh ke lantai belum tentu merata. Sehingga digunakan sensor tekanan sebagai penentuan kemiringan robot. Posisi pusat tekanan jika dimiringkan dari belakang akan terlihat seperti pada Gambar 3.36. Gambar 3.37 menunjukkan respon keseimbangan robot saat dimiringkan dari belakang. Dengan kondisi tersebut, maka robot akan mempertahankan kondisi berdiri robot saat dilantai yang miring tanpa jatuh.



**Gambar 3.36** Posisi Pusat Tekanan Robot Saat dimiringkan dari Belakang



**Gambar 3.37** Keseimbangan Robot Pada Kemiringan Belakang

## BAB 4

### PENGUJIAN DAN ANALISA

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil pengujian dan analisa dari perancangan dan implementasi yang telah didesain sebelumnya. Tujuan dari pengujian ini untuk mengetahui apakah perancangan sistem tersebut berjalan dengan baik atau tidak dan dilakukan analisa data dari hasil yang diperoleh. Pengujian yang dibahas dalam hal ini yaitu pengujian massa pada masing-masing loadcell, pengujian pusat tekanan pada alas kaki dan terhadap robot, pengujian postur berdiri robot dan pengujian keseimbangan robot.

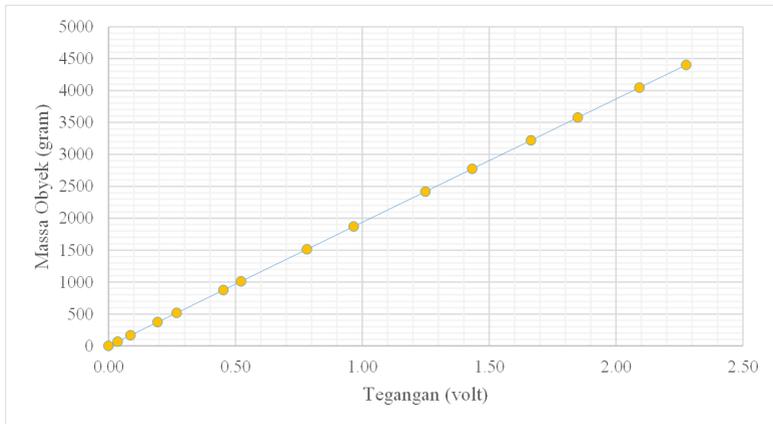
#### 4.1 Pengujian Karakterisasi Loadcell

Pada pengujian ini, dilakukan proses karakterisasi pada masing-masing loadcell. Meskipun spesifikasi loadcell diketahui, namun perlu dilakukan pengecekan pada tiap karakteristik dari loadcell karena hal tersebut dapat berubah akibat perancangan secara mekanik. Salah satu hal yang perlu diketahui dari karakteristik loadcell tersebut adalah sifat *nonlinear*. Proses untuk mengetahui karakterisasi tersebut dilakukan dengan pengambilan data dengan berbagai variasi obyek untuk mengetahui hubungan antara massa obyek dengan tegangan yang dihasilkan. Tabel 4.1 menunjukkan data hubungan antara massa obyek dengan tegangan yang dihasilkan oleh loadcell.

Hasil dari data tabel tersebut dibuat dalam grafik untuk didapatkan hubungan keduanya. Gambar 4.1 menunjukkan grafik hubungan antara obyek massa dengan tegangan yang dihasilkan oleh loadcell dengan sumbu x merupakan tegangan dalam satuan volt dan sumbu y merupakan massa obyek dalam satuan gram. Dari grafik tersebut dilakukan pendekatan dengan Polynomial Regresi untuk didapatkan persamaan. Penentuan orde pada Polynomial regresi dilakukan dengan memperhatikan *Root Mean Square* (RMS) Error terendah. Hasil pengujian Polynomial Regresi pada setiap orde ada pada tabel 4.2. Dari tabel tersebut, terlihat bahwa pada orde 3 memiliki RMS error rendah dan orde selanjutnya memiliki selisih yang dekat, sehingga orde yang digunakan dalam polynomial re-

**Tabel 4.1** Hasil Percobaan Hubungan Massa Obyek Dengan Tegangan Pada loadcell

No.	Massa Obyek (gram)	Tegangan (volt)
1	0	0.00
2	69	0.04
3	168	0.09
4	375	0.19
5	519	0.27
6	876	0.45
7	1012	0.52
8	1513	0.78
9	1870	0.97
10	2418	1.25
11	2774	1.43
12	3222	1.67
13	3579	1.85
14	4046	2.09
15	4402	2.28



**Gambar 4.1** Grafik Hubungan Antara Massa Obyek Dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Alas Kaki Kanan 1

gresi menggunakan orde 3, dan didapatkan persamaan 4-1 dengan nilai  $y$  adalah massa obyek dan nilai  $x$  adalah tegangan yang dikeluarkan oleh loadcell yang dikonversi dalam bentuk data digital dengan *resolusi* 24 bit.

**Tabel 4.2** Hasil Pengujian Massa pada tiap orde dalam Polynomial Regresi

No.	Massa Sebenarnya (gram)	Massa Pengujian Dengan Polynomial Regresi				
		Orde 1	Orde 2	Orde 3	Orde 4	Orde 5
1	0	0.778	-0.279	0.141	0.016	-0.098
2	69	69.615	68.705	69.007	68.942	68.911
3	168	168.826	168.116	168.265	168.271	168.323
4	375	375.123	374.799	374.695	374.790	374.908
5	519	519.006	518.925	518.691	518.812	518.919
6	876	876.389	876.818	876.408	876.506	876.500
7	1012	1011.248	1011.834	1011.405	1011.473	1011.421
8	1513	1512.251	1513.258	1512.925	1512.861	1512.727
9	1870	1870.119	1871.266	1871.112	1870.979	1870.896
10	2418	2415.833	2416.936	2417.111	2416.981	2417.052
11	2774	2773.046	2773.953	2774.310	2774.251	2774.380
12	3222	3221.205	3221.679	3222.140	3222.212	3222.283
13	3579	3578.233	3578.212	3578.600	3578.754	3578.690
14	4046	4047.048	4046.175	4046.173	4046.283	4046.113
15	4402	4404.279	4402.603	4402.018	4401.868	4401.975
RMS Error		1.036	0.568	0.457	0.445	0.435

$$y = -1.70465976431 \cdot 10^{-17} x^3 + 1.27800250252 \cdot 10^{-11} x^2 + 4.61327720978 \cdot 10^{-3} x - 8.93328510285 \cdot 10^{-2} \quad (4-1)$$

Dikarenakan setiap loadcell memiliki karakteristik yang berbeda walaupun dengan merek yang sama, jika persamaan 4-1 di implementasikan ke loadcell lain, maka akan mengakibatkan hasil error yang besar, sehingga perlu dilakukan pengecekan karakterisasi pada setiap loadcell. Tabel 4.3 menunjukkan data hubungan massa obyek dengan tegangan yang dihasilkan pada semua loadcell.

Dalam data tersebut terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan oleh loadcell berbeda-beda meskipun massa obyek yang diberikan sama. Sehingga jika persamaan 4-1 diberlakukan sama dengan loadcell lain, maka akan terjadi error yang besar pada pembacaan massa obyek.

Setiap loadcell dilakukan proses pengecekan karakterisasi yang sama seperti proses sebelumnya, lalu dibuat dalam grafik dan dilakukan pendekatan dengan polynomial regresi orde 3. Cara perhitungan regresi polynomial orde 3 terlampir dalam buku ini. Persamaan 4-2 hingga Persamaan

**Tabel 4.3** Hasil Percobaan Hubungan Massa Obyek Dengan Tegangan yang Dihasilkan pada Semua Loadcell

No.	Massa Obyek (gram)	Tegangan (volt)							
		Kaki Kanan				Kaki Kiri			
		Loadcell 1	Loadcell 2	Loadcell 3	Loadcell 4	Loadcell 1	Loadcell 2	Loadcell 3	Loadcell 4
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	69	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04
3	168	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09
4	375	0.19	0.20	0.19	0.19	0.19	0.21	0.20	0.19
5	519	0.27	0.27	0.26	0.26	0.27	0.28	0.28	0.27
6	876	0.45	0.46	0.44	0.44	0.45	0.48	0.48	0.45
7	1012	0.52	0.53	0.50	0.51	0.52	0.55	0.55	0.52
8	1513	0.78	0.80	0.75	0.76	0.78	0.83	0.82	0.77
9	1870	0.97	0.98	0.93	0.94	0.97	1.02	1.02	0.96
10	2418	1.25	1.27	1.20	1.21	1.25	1.32	1.31	1.24
11	2774	1.43	1.46	1.38	1.39	1.43	1.52	1.51	1.42
12	3222	1.67	1.69	1.60	1.61	1.66	1.76	1.75	1.65
13	3579	1.85	1.88	1.78	1.79	1.85	1.96	1.95	1.83
14	4046	2.09	2.13	2.01	2.02	2.09	2.22	2.21	2.07
15	4402	2.28	2.32	2.19	2.20	2.28	2.41	2.41	2.25

4–8, menunjukkan persamaan dari pendekatan regresi polynomial orde 3 untuk loadcell kiri 2, 3 dan 4 serta loadcell kanan 1, 2, 3, dan 4. Grafik hasil pada setiap loadcell terlampir dalam buku ini.

$$y = 7.10786929774.10^{-18}x^3 - 1.99932011989.10^{-11}x^2 + 4.54419955920.10^{-3}x - 3.78110640466.10^{-1} \quad (4-2)$$

$$y = -2.26773406125.10^{-17}x^3 + 2.30432520851.10^{-11}x^2 + 4.79282534967.10^{-3}x - 2.33562106886.10^{-1} \quad (4-3)$$

$$y = -4.76762832266.10^{-17}x^3 + 6.23330998483.10^{-11}x^2 + 4.74781330974.10^{-3}x + 4.16110564404.10^{-1} \quad (4-4)$$

$$y = -5.13157348021.10^{-18}x^3 + 7.66642551546.10^{-12}x^2 + 4.61041037817.10^{-3}x + 3.37123466034.10^{-1} \quad (4-5)$$

$$y = 2.16986673064.10^{-17}x^3 - 3.29646353458.10^{-11}x^2 + 4.36881679293.10^{-3}x - 3.62795308952.10^{-1} \quad (4-6)$$

$$y = -6.9931770820.10^{-17}x^3 + 4.65820884584.10^{-11}x^2 + 4.38047530869.10^{-3}x + 7.48930121638.10^{-2} \quad (4-7)$$

$$y = 6.51496437340.10^{-18}x^3 - 2.16497197601.10^{-12}x^2 + 4.65713787879.10^{-3}x - 3.94452447735.10^{-1} \quad (4-8)$$

## 4.2 Pengujian Massa Pada Loadcell

Pengujian selanjutnya yaitu pengujian massa pada masing-masing loadcell di alas kaki kanan. Pada pengujian ini, diberikan variasi obyek dengan massa yang berbeda. Hasil yang terukur pada loadcell dilakukan perhitungan galat dengan massa obyek yang terukur sebenarnya. Obyek massa yang digunakan dalam pengujian yaitu obyek yang memiliki massa antara 50 gram sampai 1500 gram. Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengujian

**Tabel 4.4** Hasil pengujian massa pada masing-masing loadcell di kaki kanan

No.	Massa	Uji Massa (gr)				Galat			
	Sebenarnya (gr)	Loadcell 1	Loadcell 2	Loadcell 3	Loadcell 4	Loadcell 1	Loadcell 2	Loadcell 3	Loadcell 4
1	51	51	51	51	51	0.000	0.000	0.000	0.000
2	99	99	98	101	99	0.000	1.010	2.020	0.000
3	151	150	151	153	151	0.662	0.000	1.325	0.000
4	206	206	206	207	206	0.000	0.000	0.485	0.000
5	258	257	257	259	257	0.388	0.388	0.388	0.388
6	502	501	500	502	500	0.199	0.398	0.000	0.398
7	553	553	553	553	551	0.000	0.000	0.000	0.362
8	994	994	995	994	992	0.000	0.101	0.000	0.201
9	1045	1046	1046	1044	1044	0.096	0.096	0.096	0.096
10	1495	1495	1494	1493	1494	0.000	0.067	0.134	0.067
Galat rata-rata						0.134	0.206	0.445	0.151

**Tabel 4.5** Hasil Pengujian Massa Pada Masing-Masing Loadcell di Kaki Kiri

No.	Massa Sebenarnya (gr)	Uji Massa (gr)				Galat			
		Loadcell 1	Loadcell 2	Loadcell 3	Loadcell 4	Loadcell 1	Loadcell 2	Loadcell 3	Loadcell 4
1	51	51	51	51	51	0.000	0.000	0.000	0.000
2	99	99	99	99	99	0.000	0.000	0.000	0.000
3	151	150	151	150	150	0.662	0.000	0.662	0.662
4	206	206	206	206	206	0.000	0.000	0.000	0.000
5	258	257	258	257	258	0.388	0.000	0.388	0.000
6	502	502	501	501	501	0.000	0.199	0.199	0.199
7	553	552	553	552	553	0.181	0.000	0.181	0.000
8	994	994	994	994	994	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1045	1044	1046	1046	1045	0.096	0.096	0.096	0.000
10	1495	1494	1494	1497	1496	0.067	0.067	0.134	0.067
Galat rata-rata						0.139	0.036	0.166	0.093

massa pada setiap loadcell di kaki kanan dan Tabel 4.5 menunjukkan hasil pengujian massa pada setiap loadcell di kaki kiri.

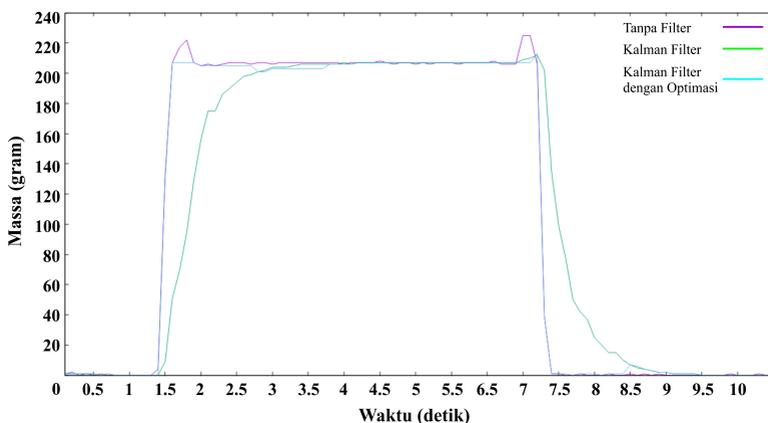
Dari hasil pengujian dalam Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 didapatkan tingkat akurasi dari sensor tersebut dengan menghitung RMS Error yaitu sebesar 0.457. Hal ini menunjukkan bahwa data yang didapatkan dari pengukuran dengan data yang terukur sebenarnya memiliki akurasi yang tinggi.

### 4.3 Pengujian Kalman Filter

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi data jika tanpa menggunakan filter dan dengan menggunakan filter. Penggunaan filter ini bertujuan agar data yang dikeluarkan menjadi stabil dan tidak berubah-ubah akibat *noise* pengukuran. Gambar 4.2 menunjukkan grafik data tanpa menggunakan filter dan dengan menggunakan kalman filter.

Dari pengujian tersebut, terlihat bahwa jika tanpa menggunakan kalman filter, informasi data yang terbaca menjadi berubah-ubah akibat adanya *noise*. Dengan penggunaan kalman filter, informasi data menjadi stabil dan tidak berubah-ubah. Namun, penggunaan kalman filter memperlambat proses dalam pembacaan data. Terlihat bahwa saat objek massa diam-bil, informasi data yang tanpa menggunakan kalman filter dapat merespon dengan cepat sedangkan dengan kalman filter terdapat delay 2 detik.

Untuk mengatasi hal ini, dilakukan perubahan algoritma pada kalman filter dengan mengkombinasikan tanpa filter. Ketika terdapat perbedaan pengukuran yang jauh antara data yang di filter dengan data yang tanpa filter, maka akan dilakukan pemilihan data. Sehingga saat kondisi tersebut, respon data akan cepat dan saat kondisi pembacaan sensor dalam



**Gambar 4.2** Grafik Pengujian Data tanpa Filter dan dengan Kalman Filter

kondisi diam, data informasi tetap stabil. Hal itu terlihat pada Grafik 4.2 pada *line 3*.

#### 4.4 Pengujian Pusat Tekanan

Pada tahap ini dilakukan pengujian pusat tekanan pada berbagai kondisi. Kondisi pertama adalah kondisi pengujian pusat tekanan terhadap satu alas kaki secara terpisah, yaitu untuk kaki kanan dan kaki kiri. Lalu pengujian pusat tekanan terhadap kedua alas kaki, namun dalam kondisi robot tidak aktif berdiri.

##### 4.4.1 Pengujian Pusat Tekanan Pada Satu Alas Kaki

Pengujian pusat tekanan pada satu alas kaki dalam hal ini untuk membandingkan data pusat tekanan yang diperoleh dengan data pusat tekanan yang didapatkan melalui perhitungan pada Persamaan 3–8 dan Persamaan 3–9. Pengujian dalam bagian ini dilakukan dengan meletakkan obyek pada masing-masing loadcell yang telah diketahui tekanannya. Lalu dihitung galat antara hasil perhitungan dengan hasil yang didapatkan. Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 menunjukkan hasil pengujian pusat tekanan pada satu alas kaki kanan dan kiri.

Dari hasil pengujian dalam Tabel 4.6 dan Tabel 4.7, didapatkan bahwa galat rata-rata yang diperoleh sebesar 0.661 untuk koordinat x dan 1.276

**Tabel 4.6** Hasil Pengujian Pusat Tekanan Pada Kaki Kanan

No.	Titik Uji (N)				Hasil Perhitungan		Has il Pengujian		Galat	
	F1	F2	F3	F4	x	y	x	y	x	y
1	0	0	0	0	0.00	0.00	0	0	0.000	0.000
2	0.78	0	0	0	6.00	172.00	6	171	0.000	0.581
3	0	0.68	0	0	114.00	172.00	113	171	0.877	0.581
4	0	0	0.73	0	6.00	18.00	6	17	0.000	5.556
5	0	0	0	0.79	114.00	18.00	113	17	0.877	5.556
6	0.77	0.64	0	0	55.00	172.00	55	171	0.000	0.581
7	0.78	0	0.78	0	6.00	95.00	6	96	0.000	1.053
8	0.78	0	0	0.81	61.00	94.00	60	93	1.639	1.064
9	0	0.65	0.65	0	60.00	95.00	60	95	0.000	0.000
10	0	0.65	0	0.72	114.00	91.00	113	92	0.877	1.099
11	0	0	0.66	0.66	60.00	18.00	60	18	0.000	0.000
12	0.73	0.63	0.6	0	41.00	125.00	41	124	0.000	0.800
13	0.72	0.66	0	0.65	76.00	123.00	74	124	2.632	0.813
14	0	0.64	0.67	0.61	76.00	69.00	77	70	1.316	1.449
15	0.68	0.65	0.63	0.6	59.00	98.00	58	98	1.695	0.000
Galat rata-rata									0.661	1.276

**Tabel 4.7** Hasil Pengujian Pusat Tekanan Pada Kaki Kiri

No.	Titik Uji (N)				Has il Perhitungan		Has il Pengujian		Galat	
	F1	F2	F3	F4	x	y	x	y	x	y
1	0	0	0	0	0.00	0.00	0	0	0.000	0.000
2	0.75	0	0	0	6.00	172.00	6	171	0.000	0.581
3	0	0.65	0	0	114.00	172.00	113	171	0.877	0.581
4	0	0	0.8	0	6.00	18.00	6	18	0.000	0.000
5	0	0	0	0.7	114.00	18.00	113	17	0.877	5.556
6	0.75	0.65	0	0	56.00	172.00	57	171	1.786	0.581
7	0.75	0	0.8	0	6.00	93.00	6	91	0.000	2.151
8	0.75	0	0	0.7	58.00	98.00	58	97	0.000	1.020
9	0	0.65	0.9	0	51.00	83.00	51	83	0.000	0.000
10	0	0.65	0	0.7	114.00	92.00	113	90	0.877	2.174
11	0	0	0.85	0.7	55.00	18.00	54	18	1.818	0.000
12	0.75	0.6	0.9	0	35.00	110.00	35	111	0.000	0.909
13	0.75	0.6	0	0.7	74.00	119.00	74	119	0.000	0.000
14	0	0.6	0.9	0.7	70.00	60.00	69	60	1.429	0.000
15	0.7	0.6	0.9	0.7	54.00	87.00	54	87	0.000	0.000
Galat rata-rata									0.511	0.904

untuk koordinat y pada alas kaki kanan, sedangkan galat rata-rata untuk kaki kiri yaitu sebesar 0.511 untuk koordinat x dan 0.904 untuk koordinat y. Hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa hasil pusat tekanan memiliki tingkat akurasi yang baik. Pada pembacaan data tekanan pada setiap loadcell memiliki nilai yang berbeda, hal ini dikarenakan pembacaan data yang presisi pada loadcell sebesar 0.01 gram, sedangkan dengan timbangan digital memiliki kemampuan pembacaan presisi sebesar 1 gram.

#### 4.4.2 Pengujian Pusat Tekanan Pada Dua Alas Kaki

Pengujian pusat tekanan pada dua alas kaki memiliki pengujian yang sama dengan pengujian pada satu alas kaki. Namun pada kondisi ini, obyek diletakkan pada kedua alas kaki dan pengukuran pusat tekanan yang didapatkan, dibandingkan dengan perhitungan pusat tekanan menggunakan Persamaan 3–10 dan Persamaan 3–11. Obyek yang diletakkan dalam pengujian ini memiliki massa yang sama. Tabel 4.8 menunjukkan hasil pengujian pusat tekanan pada dua alas kaki. Dari hasil pengujian, didapatkan galat rata-rata sebesar 0.733 untuk koordinat x dan 0.267 untuk koordinat y. Dari hasil pengujian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengujian pusat tekanan yang diperoleh melalui hasil percobaan dengan hasil perhitungan memiliki tingkat akurasi yang tinggi.

**Tabel 4.8** Pengujian Pusat Tekanan Pada Dua Alas Kaki

No.	Posisi Uji Tekanan								Hasil Posisi Pusat Tekanan				Galat	
	Kiri				Kanan				Perhitungan		Pengujian			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4	Xcop	Ycop	Xcop	Ycop	Xcop	Ycop
1	x	x	x	x	x	x	x	x	0	0	0	0	0	0
2	√	x	x	x	x	x	x	x	-168	77	-168	77	0	0
3	√	x	√	x	x	x	x	x	-168	0	-168	-1	0	1
4	x	x	x	x	x	√	x	x	168	77	167	77	1	0
5	x	x	x	x	x	√	x	√	168	0	167	-1	1	1
6	√	x	√	x	x	√	x	√	0	0	-1	1	1	1
7	√	x	x	√	x	√	√	x	0	0	-2	0	2	0
8	√	√	x	x	√	√	x	x	0	77	-1	76	1	1
9	x	x	√	√	x	x	√	√	0	-77	-3	-77	3	0
10	√	√	√	√	√	√	√	√	0	0	-2	0	2	0

## 4.5 Pengujian Postur Berdiri Robot

Pada bagian ini dilakukan pengujian postur berdiri robot yang menapak di lantai yang tidak beraturan. Lantai yang tidak beraturan menggunakan rumput sintetis yang memiliki panjang rumput sebesar 30 mm. Robot diletakkan pada rumput sintetis dalam kondisi berdiri lalu diamati posisi pusat tekanan. Tabel 4.9 menunjukkan kondisi postur robot saat berdiri saat tanpa adanya koreksi dan koreksi dari pusat tekanan robot.

Dari tabel tersebut, dapat diamati bahwa kondisi robot dalam postur berdiri saat diletakkan pada rumput sintetis berada pada kondisi yang tidak seimbang dan lebih condong ke depan samping kiri. Hal ini terlihat dari posisi pusat tekanan berada di koordinat  $(-56, 24)$ . Hal yang menyebabkan robot mengalami kemiringan seperti itu dikarenakan part aluminium robot antara bagian kanan dan kiri berbeda saat proses pencetakan part. Hal tersebut akan membebankan salah satu robot. Dengan kondisi robot yang berdiri tersebut, dilakukan koreksi pusat tekanan dengan penambahan  $\theta$  pengaturan untuk mengatur kembali posisi yang tepat pada masing-masing *joint*. Sehingga robot akan membuat postur berdiri baru secara otomatis dan mencoba mendekati posisi pusat robot yang seimbang. Dari tabel tersebut, terlihat robot dapat berdiri dengan koreksi pusat tekanan berada pada koordinat  $(-5, 4)$  yang mendekati posisi seimbang robot.

**Tabel 4.9** Pengujian Postur Berdiri Robot

Postur Berdiri	Tanpa Koreksi		Dengan Koreksi	
	Xcop	Ycop	Xcop	Ycop
	-56	24	-5	4

## 4.6 Pengujian Keseimbangan Robot

Pengujian selanjutnya yaitu pengujian keseimbangan robot. Pengujian dalam hal ini untuk mengetahui apakah robot mampu menyeimbangkan diri ketika berada dalam kondisi bidang yang miring dan tidak rata. Pada penelitian sebelumnya telah dilakukan keseimbangan robot dengan menggunakan sensor IMU. *Feedback* yang digunakan untuk mengontrol keseimbangan robot terletak pada tangan. Hal ini dikarenakan respon tangan lebih efisien untuk membuat robot stabil dalam berjalan tanpa mengganggu perencanaan gerak kaki dalam berjalan. Pada kondisi tersebut dilakukan pengujian robot dalam berdiri di kondisi bidang miring. Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 menunjukkan hasil pengujian kondisi robot saat berada di bidang miring dengan tanpa keseimbangan dan dengan keseimbangan tangan saat dimiringkan ke arah depan dan belakang.

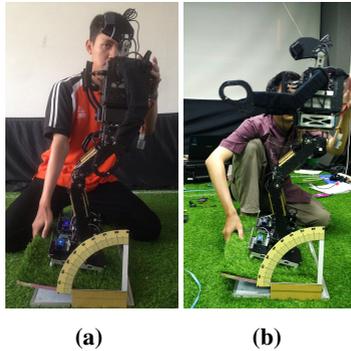
Dari hasil pengujian tersebut, terlihat bahwa pada kondisi tanpa keseimbangan, robot hanya dapat berdiri sampai pada sudut kemiringan 5 derajat. Pada kondisi dengan keseimbangan IMU, robot hanya dapat berdiri sampai pada sudut kemiringan 10 derajat. Dari data tersebut, dilakukan perubahan respon robot menggunakan respon kaki. Setelah itu dilakukan pengujian kemiringan robot dengan keseimbangan yang menggunakan sensor IMU dan dengan keseimbangan dari informasi posisi pusat tekan-

**Tabel 4.10** Hasil Pengujian Keseimbangan Robot dari depan dengan Tanpa Keseimbangan dan Dengan IMU

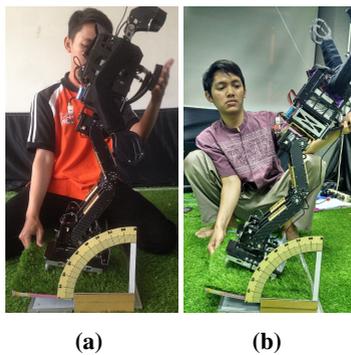
No.	Sudut Kemiringan (derajat)	Kondisi	
		Tanpa Keseimbangan	Dengan Keseimbangan IMU
1	0	Tidak Jatuh	Tidak Jatuh
2	5	Jatuh	Tidak Jatuh
3	10	Jatuh	Jatuh

**Tabel 4.11** Hasil Pengujian Keseimbangan Robot dari belakang dengan Tanpa Keseimbangan dan Dengan IMU

No.	Sudut Kemiringan (derajat)	Kondisi	
		Tanpa Keseimbangan	Dengan Keseimbangan IMU
1	0	Tidak Jatuh	Tidak Jatuh
2	5	Jatuh	Tidak Jatuh
3	10	Jatuh	Jatuh



**Gambar 4.3** Respon Keseimbangan Robot Dari Depan, (a) Tanpa Keseimbangan, (b) Dengan Keseimbangan IMU



**Gambar 4.4** Respon Keseimbangan Robot Dari Belakang, (a) Tanpa Keseimbangan, (b) Dengan Keseimbangan IMU

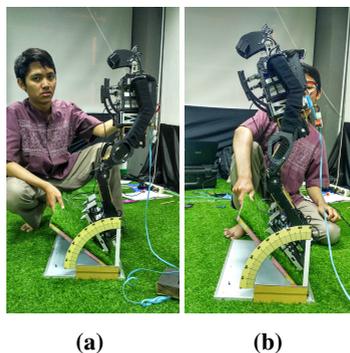
an. Tabel 4.12 menunjukkan perbandingan hasil pengujian respon keseimbangan robot dengan menggunakan keseimbangan IMU dan dengan keseimbangan dari informasi posisi pusat tekanan yang dimiringkan dari depan.

Dari tabel tersebut, terlihat bahwa robot yang menggunakan keseimbangan IMU dengan respon kaki dapat berdiri sampai sudut kemiringan 35 derajat, sedangkan robot yang menggunakan keseimbangan dari informasi pusat tekanan dapat berdiri sampai sudut kemiringan 50 derajat.

**Tabel 4.12** Hasil Pengujian Keseimbangan Robot dari depan dengan IMU dan Dengan Pusat Tekanan

No.	Sudut Kemiringan (derajat)	Dengan Keseimbangan IMU			Dengan Keseimbangan Pusat Tekanan		
		Xcop	Ycop	Kondisi	Xcop	Ycop	Kondisi
1	5	-18	0	Tidak Jatuh	-10	0	Tidak Jatuh
2	10	0	-6	Tidak Jatuh	-5	-2	Tidak Jatuh
3	15	0	-7	Tidak Jatuh	-3	-3	Tidak Jatuh
4	20	10	-19	Tidak Jatuh	0	-3	Tidak Jatuh
5	25	15	-23	Tidak Jatuh	3	-5	Tidak Jatuh
6	30	37	-39	Tidak Jatuh	3	-6	Tidak Jatuh
7	35	40	-77	Jatuh	4	-6	Tidak Jatuh
8	40	999	999	Jatuh	3	-9	Tidak Jatuh
9	45	999	999	Jatuh	3	-13	Tidak Jatuh
10	50	999	999	Jatuh	3	-15	Tidak Jatuh

Pada sudut kemiringan selanjutnya robot masih dapat berdiri, namun karena sudut tersebut terlalu miring mengakibatkan kaki robot tergelincir ke bawah. Dari hasil tersebut, terlihat juga bahwa semakin besar kemiringan robot yang dibuat, nilai pusat tekanan yang ada pada keseimbangan dengan menggunakan IMU semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa robot tidak dalam kondisi seimbang. Nilai 999 pada tabel tersebut menunjukkan bahwa kedua kaki sedang tidak menapak yang berarti dalam kondisi jatuh. Namun jika dilakukan pengujian keseimbangan robot de-



**Gambar 4.5** Respon Keseimbangan Robot dari Depan, (a) Dengan Keseimbangan IMU, (b) Dengan Keseimbangan Pusat Tekanan

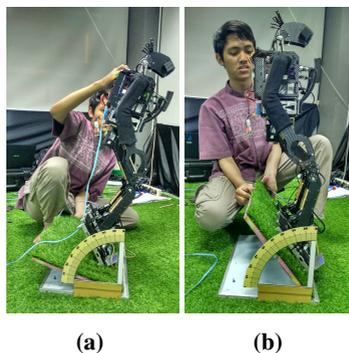
**Tabel 4.13** Hasil Pengujian Keseimbangan Robot dari Belakang Dengan IMU dan Dengan Pusat Tekanan

No.	Sudut Kemiringan (derajat)	Dengan Keseimbangan IMU			Dengan Keseimbangan Pusat Tekanan		
		Xcop	Ycop	Kondisi	Xcop	Ycop	Kondisi
1	5	-56	24	Tidak Jatuh	-15	3	Tidak Jatuh
2	10	-61	36	Tidak Jatuh	-10	4	Tidak Jatuh
3	15	-53	50	Tidak Jatuh	-10	4	Tidak Jatuh
4	20	-43	59	Tidak Jatuh	-12	7	Tidak Jatuh
5	25	999	999	Jatuh	-8	8	Tidak Jatuh
6	30	999	999	Jatuh	-4	11	Tidak Jatuh
7	35	999	999	Jatuh	5	11	Tidak Jatuh
8	40	999	999	Jatuh	5	13	Tidak Jatuh
9	45	999	999	Jatuh	7	17	Tidak Jatuh
10	50	999	999	Jatuh	7	18	Tidak Jatuh

ngan informasi dari posisi pusat tekanan, nilai pusat tekanan cenderung mendekati ke nilai kondisi seimbang robot, sehingga robot dapat berdiri dan tidak membebankan ke salah satu motor servo robot.

Pengujian selanjutnya yaitu dengan pengujian yang sama, namun dilakukan dengan posisi kemiringan dari belakang. Tabel 4.13 menunjukkan hasil pengujian respon robot saat dimiringkan dengan keseimbangan IMU dan dengan keseimbangan dari informasi posisi pusat tekanan robot.

Dari hasil pengujian tersebut, saat dimiringkan dari belakang, robot



**Gambar 4.6** Respon Keseimbangan Robot dari Depan, (a) Dengan Keseimbangan IMU, (b) Dengan Keseimbangan Pusat Tekanan

yang memiliki keseimbangan dengan IMU dapat berdiri pada sudut kemiringan 25 derajat, sedangkan dengan keseimbangan dari pusat tekanan dapat berdiri hingga sudut kemiringan 50 derajat. Untuk robot dengan keseimbangan IMU pada kemiringan 30 derajat bernilai 999 yang menandakan pada kondisi tersebut kedua telapak kaki tidak menapak pada lantai dan berada pada kondisi jatuh. Sedangkan pada robot dengan keseimbangan dari pusat tekanan, informasi nilai pusat tekanan selalu mencapai nilai dari pusat robot.

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Pada tugas akhir ini telah berhasil dilakukan implementasi sensor tekanan pada alas kaki untuk pembangkitan postur dan keseimbangan robot. Implementasi tersebut telah digunakan dalam Kontes Robot Sepak Bola Indonesia dan digunakan sebagai dasar dalam penentuan perencanaan gerakan yang lainnya. Dari tugas akhir ini, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Robot humanoid telah berhasil dirancang dengan mengikuti regulasi robocup (<https://www.robocuphumanoid.org>) yang dapat masuk pada kelas *kid size* dan *teen-size* dan sensor tekanan telah berhasil di implementasikan pada kaki robot,
2. Penggunaan loadcell sebagai sensor tekanan memiliki pembacaan akurasi tinggi dengan RMS error sebesar 0.457 dengan menggunakan pendekatan polynomial regresi orde 3,
3. Pembacaan pusat tekanan memiliki galat sebesar 0.733 untuk koordinat x dan 0.267 untuk koordinat y,
4. Robot dapat membentuk kondisi postur berdiri baru dengan posisi pusat tekanan di koordinat  $(-5, 4)$ ,
5. Robot dapat berdiri dan menyeimbangkan diri saat berada di bidang miring sampai pada sudut kemiringan  $\pm 50$  derajat dengan menggunakan informasi posisi pusat tekanan robot.

#### **5.2 Saran**

Untuk pengembangan lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, disarankan untuk melakukan beberapa langkah lanjutan:

1. Pengiriman data nilai tekanan pada masing-masing loadcell dikirim melalui protocol dxl melalui servo agar kabel menjadi tertata rapi dan tidak mengganggu pergerakan kaki robot,
2. Kombinasi sensor tekanan dengan sensor IMU untuk kontrol keseimbangan robot pada kondisi berjalan,

*Halaman ini sengaja dikosongkan.*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Gerndt, D. Seifert, J. H. Baltes, S. Sadeghnejad, and S. Behnke, "Humanoid robots in soccer: Robots versus humans in robocup 2050," *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 22, pp. 147–154, Sept 2015.
- [2] RoboCup Soccer Humanoid League Rules and Setup.
- [3] M. Vukobratović and B. Borovac, "Zero-moment point - thirty five years of its life," *International Journal of Humanoid Robotics*, vol. 1, no. 1, pp. 157–173, 2005.
- [4] G. G. Muscolo, C. T. Recchiuto, C. Laschi, P. Dario, K. Hashimoto, and A. Takanishi, "A method for the calculation of the effective center of mass of humanoid robots," in *2011 11th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pp. 371–376, Oct 2011.
- [5] I. Ha, Y. Tamura, H. Asama, J. Han, and D. W. Hong, "Development of open humanoid platform darwin-op," in *SICE Annual Conference 2011*, pp. 2178–2181, Sept 2011.
- [6] Muhammad Arifin, Muhammad Ardi Pradana, Uti Solichah. "ICHIRO Kid-Size 2016 Team Description Paper". Intelligence Robot Laboratory ITS, Surabaya. 2016.
- [7] M. Schwarz, J. Pastrana, P. Allgeuer, M. Schreiber, S. Schueller, M. Missura, and S. Behnke. "Humanoid TeenSize Open Platform NimbRo-OP". pp. 568–575. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [8] G. Passault, Q. Rouxel, L. Hofer, S. N'Guyen, and O. Ly, "Low-cost force sensors for small size humanoid robot," in *2015 IEEE-RAS 15th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 1148–1148, Nov 2015.

- [9] R. Fabre, H. Gimbert, L. Gondry. “Rhuban Football Club Team – Description Paper Humanoid KidSize League, Robocup 2016 Leipzig”. Robocup 2016, Leipzig.
- [10] Jung-Hoon Kim, Jung-Yup Kim and Jun-Ho Oh. “Adjustment of Home Posture of a Biped Humanoid Robot Using an Inertial Sensor and Force Torque Sensors”. International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, USA, Nov 2007.
- [11] Pranav Kuber, Sahil Kolhe, Pawan Kulkarni, Prajyot Kulkarni. Estimation of Zero Moment Point using Centre of Gravity based Method. ,”in International Journal of Engineering Research & Technology Vol. 5, issue 10, Oct 2016.
- [12] Basilio, J.C. dan Matos, S.R., “Design of PI and PID Controllers with Transient Performance Specification”, IEEE Transaction on Education, vol. 45 – no.4, pp. 364-370, November, 2002.

## LAMPIRAN

### A. Perhitungan Polynomial Regresi Orde 3

Diketahui data loadcell yang ada pada tabel 1 dibawah ini dengan x merupakan massa obyek dalam satuan kilogram dan y merupakan nilai ADC.

**Tabel 1.** Pengambilan Data Massa Obyek Pada Loadcell

x	y
0	5
0.069	14888
0.168	36140
0.375	81357
0.519	112566
0.876	190045
1.012	219116
1.513	327987
1.87	405464
2.418	523838
2.774	601328
3.222	698287
3.579	776046
4.046	876698
4.402	954261

Fungsi pendekatan dalam regresi polynomial orde 3 ada pada persamaan 1.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (1)$$

Dari persamaan tersebut, maka dilakukan pencarian  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  dan  $a_3$  yang didapatkan hubungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
na_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_3 &= \sum_{i=1}^n y_i \\
\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_3 &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \\
\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5\right)a_3 &= \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\
\left(\sum_{i=1}^n x_i^3\right)a_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^4\right)a_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^5\right)a_2 + \left(\sum_{i=1}^n x_i^6\right)a_3 &= \sum_{i=1}^n x_i^3 y_i
\end{aligned}$$

Dari persamaan diatas diubah dalam bentuk matrix seperti pada dibawah ini.

$$\begin{bmatrix}
n & \sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 \\
\sum x_i & \sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 \\
\sum x_i^2 & \sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 \\
\sum x_i^3 & \sum x_i^4 & \sum x_i^5 & \sum x_i^6
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
a_0 \\
a_1 \\
a_2 \\
a_3
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
\sum y_i \\
\sum x_i y_i \\
\sum x_i^2 y_i \\
\sum x_i^3 y_i
\end{bmatrix}$$

Dari matrix tersebut, terlihat beberapa koefisien yang dibutuhkan agar dapat dilakukan perhitungan koefisien untuk  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  dan  $a_3$ . Pencarian nilai masing-masing yang dibutuhkan pada data  $x$  dan  $y$  yang dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

**Tabel 2.** Nilai Pangkat Pada Data Input

No.	$x_i$	$y_i$	$x_i^2$	$x_i^3$	$x_i^4$	$x_i^5$	$x_i^6$
1	0	5	0	0	0	0	0
2	0.069	14888	0.0048	0.0003	$2.26 \cdot 10^{-5}$	$1.56 \cdot 10^{-6}$	$1.07 \cdot 10^{-7}$
3	0.168	36140	0.0282	0.0047	0.000797	0.000134	$2.24 \cdot 10^{-5}$

4	0.375	81357	0.1406	0.0527	0.0198	0.0074	0.0028
5	0.519	112566	0.2694	0.1398	0.0726	0.0377	0.0195
6	0.876	190045	0.7674	0.6722	0.5889	0.5158	0.4519
7	1.012	219116	1.0241	1.0364	1.0489	1.0615	1.0742
8	1.513	327987	2.2892	3.4635	5.2403	7.9286	11.9959
9	1.87	405464	3.4969	6.5392	12.2283	22.8669	42.7612
10	2.418	523838	5.8467	14.1374	34.1842	82.6574	199.8655
11	2.774	601328	7.6951	21.3461	59.2142	164.2602	455.6577
12	3.222	698287	10.3813	33.4485	107.7711	347.2383	1118.8020
13	3.579	776046	12.8092	45.8443	164.0767	587.2303	2101.6974
14	4.046	876698	16.3701	66.2335	267.9807	1084.2499	4386.8751
15	4.402	954261	19.3776	85.3002	375.4915	1652.9137	7276.1263
$\Sigma$	26.843	5818026	80.5006	278.2190	1027.91	3950.967	15595.32

**Tabel 3.** Nilai Pengali antara Data Masukan dan Keluaran

No.	$x_i$	$y_i$	$x_i y_i$	$x_i^2 y_i$	$x_i^3 y_i$
1	0	5	0	0	0
2	0.069	14888	1027.272	70.88177	4.890841992
3	0.168	36140	6071.52	1020.015	171.3625805
4	0.375	81357	30508.88	11440.83	4290.310547
5	0.519	112566	58421.75	30320.89	15736.54208
6	0.876	190045	166479.4	145836	127752.3114
7	1.012	219116	221745.4	224406.3	227099.2127
8	1.513	327987	496244.3	750817.7	1135987.139
9	1.87	405464	758217.7	1417867	2651411.405
10	2.418	523838	1266640	3062736	7405696.148
11	2.774	601328	1668084	4627265	12836032.17
12	3.222	698287	2249881	7249116	23356650.66
13	3.579	776046	2777469	9940560	35577265.1
14	4.046	876698	3547120	14351648	58066767.63
15	4.402	954261	4200657	18491292	81398666.37
$\Sigma$	26.843	5818026	17448567	60304396	222803531.3

Nilai masing-masing tersebut dimasukkan pada matrix, sehingga didapatkan matrix pada dibawah ini.

$$\begin{bmatrix} 15 & 26.84 & 80.5 & 278.22 \\ 26.84 & 80.5 & 278.22 & 1027.92 \\ 80.5 & 278.22 & 1027.92 & 3950.97 \\ 278.22 & 1027.92 & 3950.97 & 15595.33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5818026.00 \\ 17448566.78 \\ 60304396.16 \\ 222803531.26 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan eliminasi gauss, maka akan didapatkan koefisien  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  dan  $a_3$  yaitu :

$$a_0 = 22.12454732$$

$$a_1 = 216951.2439$$

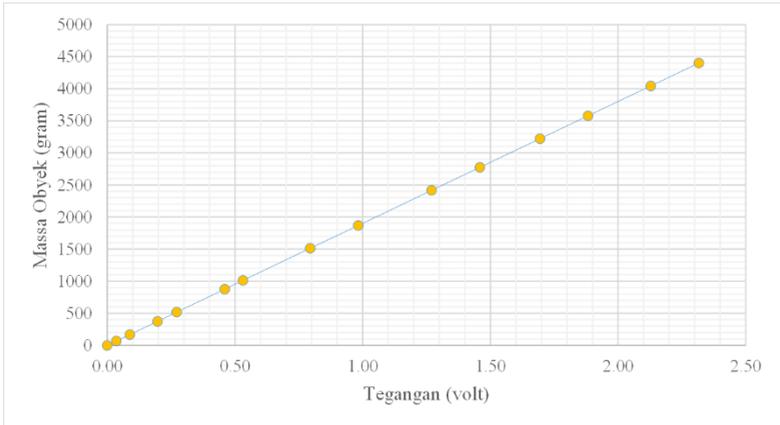
$$a_2 = -150.8161529$$

$$a_3 = 24.66912859$$

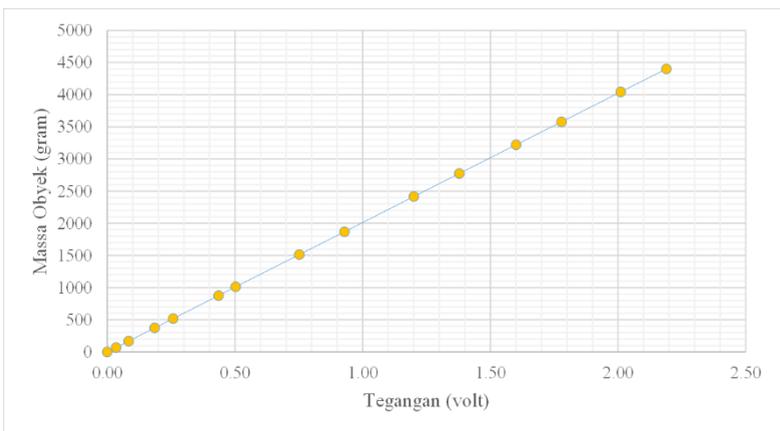
Dari hal tersebut, maka didapatkan persamaan polynomial regresi orde 3 pada dibawah ini.

$$y = 22.1245 + 216951.2439x - 150.8161x^2 + 24.6691x^3$$

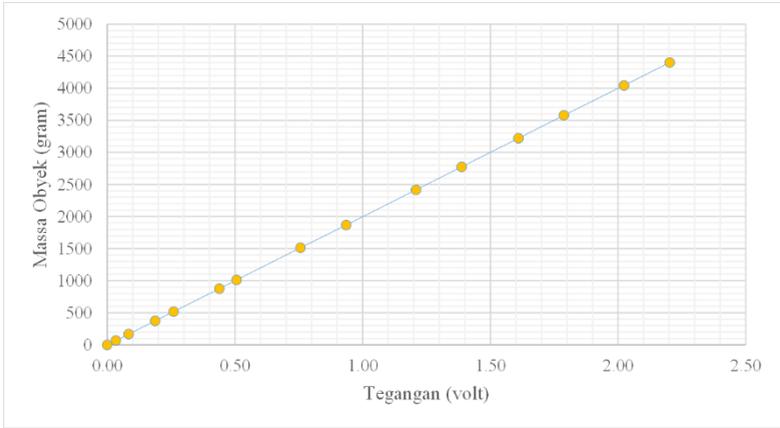
## B. Grafik Hubungan Antara Massa Obyek dengan Tegangan



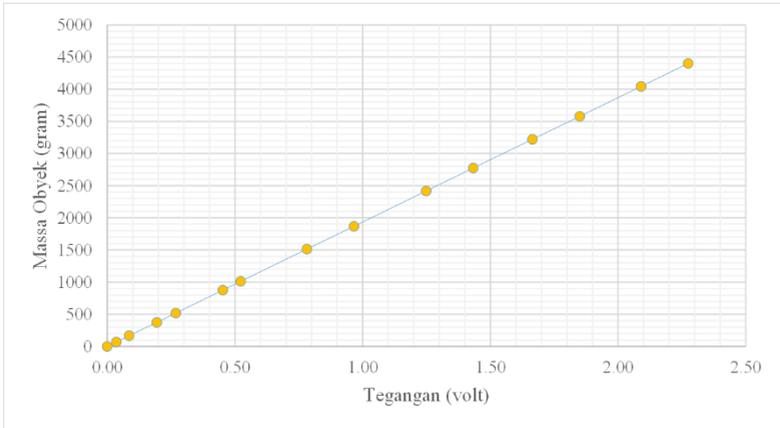
**Gambar 1.** Grafik Hubungan Antara Massa Obyek dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Kaki Kanan 2



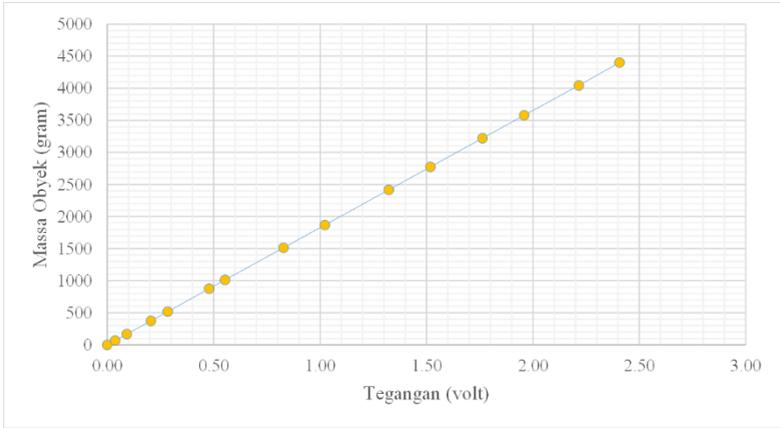
**Gambar 2.** Grafik Hubungan Antara Massa Obyek dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Kaki Kanan 3



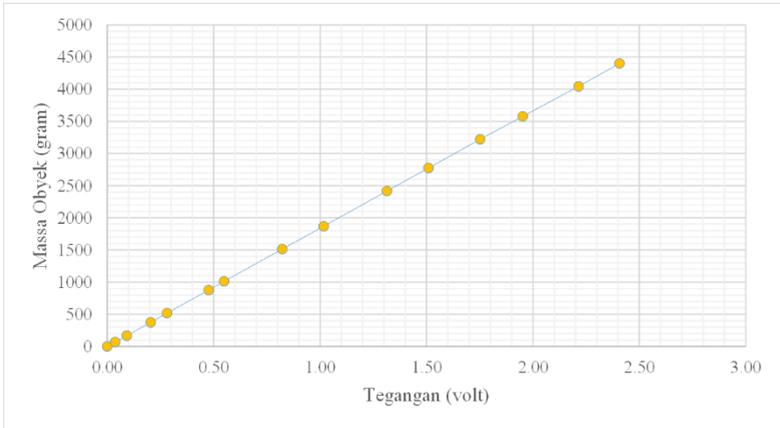
**Gambar 3.** Grafik Hubungan Antara Massa Obyek dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Kaki Kanan 4



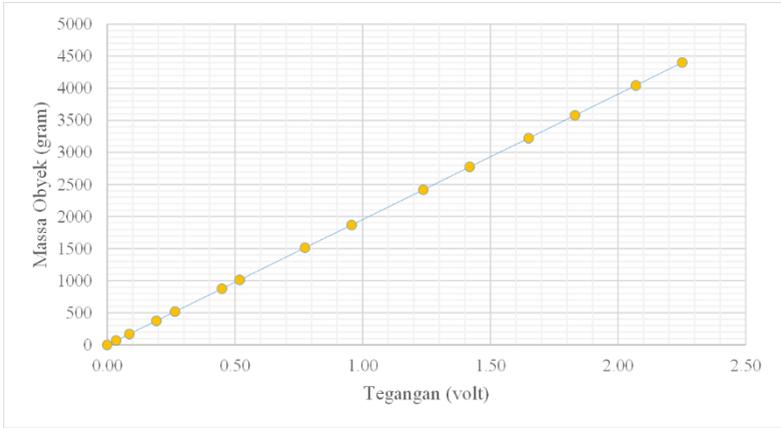
**Gambar 4.** Grafik Hubungan Antara Massa Obyek dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Kaki Kiri 1



**Gambar 5.** Grafik Hubungan Antara Massa Obyek dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Kaki Kiri 2



**Gambar 6.** Grafik Hubungan Antara Massa Obyek dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Kaki Kiri 3



**Gambar 7.** Grafik Hubungan Antara Massa Obyek dengan Tegangan yang Dihasilkan Pada Loadcell Kaki Kiri 4

### C. Respon Perbandingan Pengujian Robot Saat Tanpa Keseimbangan dan Dengan Keseimbangan IMU dengan Tangan

**Tabel 2.** Respon Pengujian Keseimbangan Robot dari kemiringan depan

No.	Sudut Kemiringan (derajat)	Tanpa Keseimbangan		Dengan Keseimbangan IMU	
		Respon Robot	Kondisi	Respon Robot	Kondisi
1	0		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
2	5		Jatuh		Tidak Jatuh
3	10		Jatuh		Jatuh

**Tabel 3.** Respon Pengujian Keseimbangan Robot dari kemiringan belakang

No.	Sudut Kemiringan (derajat)	Tanpa Keseimbangan		Dengan Keseimbangan IMU	
		Respon Robot	Kondisi	Respon Robot	Kondisi
1	0		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
2	5		Jatuh		Tidak Jatuh
3	10		Jatuh		Jatuh

**D. Respon Perbandingan Pengujian Robot Saat Dengan Keseimbangan IMU dan Dengan Keseimbangan Pusat Tekanan**

**Tabel 4.** Respon Pengujian Keseimbangan Robot dari Kemiringan Depan dengan Keseimbangan IMU dan Pusat Tekanan

No.	Sudut Kemiringan (derajat)	Keseimbangan IMU		Keseimbangan Pusat Tekanan	
		Respon Robot	Kondisi	Respon Robot	Kondisi
1	5		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
2	10		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
3	15		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
4	20		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh

5	25		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
6	30		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
7	35		Jatuh		Tidak Jatuh
8	40		Jatuh		Tidak Jatuh
9	45		Jatuh		Tidak Jatuh

10	50		Jatuh		Tidak Jatuh
----	----	---	-------	---	-------------

**Tabel 5.** Respon Pengujian Keseimbangan Robot dari Kemiringan Belakang dengan Keseimbangan IMU dan Pusat Tekanan

No.	Sudut Kemiringan (derajat)	Keseimbangan IMU		Keseimbangan Pusat Tekanan	
		Respon Robot	Kondisi	Respon Robot	Kondisi
1	5		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
2	10		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
3	15		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh

4	20		Tidak Jatuh		Tidak Jatuh
5	25		Jatuh		Tidak Jatuh
6	30		Jatuh		Tidak Jatuh
7	35		Jatuh		Tidak Jatuh
8	40		Jatuh		Tidak Jatuh

9	45		Jatuh		Tidak Jatuh
10	50		Jatuh		Tidak Jatuh

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BIODATA PENULIS



Muhammad Arifin lahir pada 15 Agustus 1994 di Kota Gresik, Jawa Timur. Penulis lulus dari SMP Muhammadiyah 1 Sidoarjo pada tahun 2009 dan dari SMA Negeri 1 Sidoarjo pada tahun 2013. Saat ini penulis menempuh pendidikan strata satu Teknik Elektro, bidang studi Elektronika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

Saat di bangku kuliah, penulis aktif dalam organisasi UKM Robotika ITS untuk tahun kepengurusan 2014/2015 serta pernah menjabat sebagai Kepala Departemen Pengembangan

Sumber Daya Mahasiswa dalam organisasi Klub Keilmiah ITS untuk tahun kepengurusan 2015/2016. Selain itu, penulis juga aktif dalam Tim Robot ICHIRO ITS sejak tahun 2014 sampai dengan tahun 2017. Sejalan dengan semua kegiatan itu, penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Elektronika B202. Penulis sangat tertarik dengan kegiatan riset mengenai robotika, kontrol dan visi komputer.

Email:

[muh.arifin.300cc@gmail.com](mailto:muh.arifin.300cc@gmail.com)