



Buku Tugas Akhir

# **Perancangan Pengontrol Umpan Balik pada Manipulator Robot Tiga Derajat Kebebasan**

**Frans Cevin Hutabarat**

2017630012

Pembimbing:

Tua Agustinus Tamba, PhD.

Diajukan untuk memenuhi salah satu  
syarat mendapatkan gelar Sarjana  
Teknik

**Agustus 2021**



# **Perancangan Pengontrol Umpan Balik pada Manipulator Robot Tiga Derajat Kebebasan**

**Frans Cevin HUTABARAT**  
2017630012

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika, Universitas Katolik Parahyangan.

## **Panitia Penguji :**

Tua Agustinus Tamba, PhD., Pembimbing 1  
Dr. Ir. Bagus M. Arthaya, M.Eng., Penguji 1  
Levin Halim, S.T., M.T., Penguji 2

---

© 2021, Program Studi Sarjana Teknik Elektro (Konsentrasi Mekatronika)– Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit no 94, Bandung 40141, INDONESIA.

Dokumen ini dilindungi oleh undang-undang. Tidak diperkenankan mereproduksi seluruh ataupun sebagian isi dokumen ini dalam bentuk apa pun, baik secara cetak, photoprint, mikrofilm, elektronik, atau cara lainnya tanpa izin tertulis dari Program Studi Sarjana Teknik Elektro (Konsentrasi Mekatronika), Universitas Katolik Parahyangan.

All rights reserved. No part of the publication may be reproduced in any form by print, photoprint, microfilm, electronic or any other means without written permission from the Department of Electrical Engineering (Mechatronics), Parahyangan Catholic University.

# Lembar Persetujuan Selesai



Tugas Akhir berjudul:

## **Perancangan Pengontrol Umpan Balik pada Manipulator Robot Tiga Derajat Kebebasan**

oleh:

Frans Cevin Hutabarat

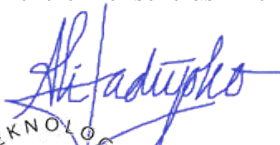

NPM : 2017630012


ini telah diujikan pada Sidang Tugas Akhir 2 (IME 184500) di Program Studi Sarjana Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan serta dinyatakan SELESAI.

**TANDA PERSETUJUAN SELESAI,**

Bandung, 8 September 2021

Ketua Program Studi Sarjana  
Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika

  
Dr. Ali Sadiyoko, M.T  
  
Ketua Program Studi Pertama,  
UNPAR

  
Tua Agustinus Tamba, PhD.



**PERNYATAAN TIDAK MENCONTEK ATAU  
MELAKUKAN TINDAKAN PLAGIAT**

Saya yang bertandatangan dibawah ini,

**FRANS CEVIN HUTABARAT**

Dengan ini menyatakan bahwa Buku Tugas Akhir dengan judul:

**"PERANCANGAN PENGONTROL UMPAN BALIK PADA MANIPULATOR  
ROBOT TIGA DERAJAT KEBEBASAN"**

adalah hasil pekerjaan Saya. Seluruh ide, pendapat atau materi dari sumber lain telah dikutip dengan cara penulisan referensi yang sesuai.

Pernyataan ini Saya buat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan ini tidak sesuai dengan kenyataan maka Saya bersedia menanggung sanksi yang akan dikenakan kepada Saya.

Bandung, 8 September 2021



**Frans Cevin Hutabarat**

NPM: 2017630012





# Lembar Persembahan

Tugas Akhir ini dipersembahkan untuk  
*almamater* tercinta,  
bangsa dan negara.



## **Pedoman Penggunaan Buku Tugas Akhir**

Buku Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan, terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Katolik Parahyangan, dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis dengan mengikuti aturan HaKI yang berlaku di Universitas Katolik Parahyangan. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau peringkasan hanya dapat dilakukan seizin penulis dan harus disertai dengan kaidah ilmiah untuk menyebutkan sumbernya.

Memperbanyak atau menerbitkan sebagian atau seluruh Buku Tugas Akhir haruslah seizin Ketua Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan.

Staf dosen dan mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Katolik Parahyangan dapat menggunakan Buku Tugas Akhir ini sebagai rujukan pada penelitian-penelitian yang akan dilakukan sesuai dengan rekomendasi yang dikeluarkan oleh Koordinator Tugas Akhir dan/atau Tim Dosen Pembimbing.



## Abstrak

Robot telah menjadi tren baru dalam operasional industri saat ini. Pekerjaan yang biasanya dilakukan manusia di dunia industri sekarang sudah banyak digantikan oleh robot. Salah satu jenis robot yang sering dipakai di industri adalah lengan robot. Seperti namanya, lengan robot didesain menyerupai lengan manusia yang secara umum bertujuan untuk memindahkan sebuah objek ke tempat yang diinginkan. Walaupun lengan robot telah menjadi telah banyak digunakan di dunia industri, proses pembelajaran mengenai lengan robot ini terbilang sulit. Umumnya materi dasar yang dipelajari pada pembelajaran terkait lengan robot adalah analisis kinematika robot dan metode kontrol yang mampu mengurangi nilai *error* dari pergerakan robot tersebut. Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika (TEKM) di Universitas Katolik Parahyangan (UNPAR) merupakan salah satu program studi yang mempelajari tentang ilmu robotika. Program studi ini juga sering mengilustrasikan lengan robot untuk tujuan penentuan model kinematika dan implementasi pengontrol. Pada tahun 2020, salah satu mahasiswa dari program studi TEKUN UNPAR telah merancang purwarupa lengan robot yang bertujuan menjadikan purwarupa tersebut sebagai alat peraga pada materi mengenai robotika itu sendiri. Namun penelitian tersebut masih berfokus perancangan perangkat keras maupun lunak dan belum memiliki modul pengontrol. Hal itu membuat pergerakan robot tersebut memiliki nilai *error* yang cukup besar. Berdasarkan purwarupa lengan robot yang telah dibangun tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan lebih lanjut purwarupa tersebut dalam aspek analisis kinematika maupun dinamika dan implementasi pengontrol. Analisis kinematika dibagi menjadi dua yaitu *forward* dan *inverse kinematics*. Sedangkan untuk implementasi pengontrol yang digunakan adalah metode kontrol Proportional-Integral-Derivative (PID). Ide utama dari metode kontrol PID ini adalah mengontrol nilai sudut pergerakan lengan robot yaitu  $\theta$  mendekati target berdasarkan kesalahan/*error* antara pose (posisi dan orientasi) yang diinginkan dengan pose aktual robot.



## Abstract

In this new industrial era, robots are undeniably becoming a new trend that started to substitute human labor. One of the most common robots used in industry is the robotic arms. Robotics arm was designed based on human arms to pick a certain object and place it in the desired position. Although the robotics arm was commonly used in industry, it's difficult to study the robotics arm. Kinematics and control systems are the most fundamental approach to reduce the position error of the robotics arm. Department of Mechatronics Engineering in Parahyangan Catholics University is one of many departments that focused on studying robotics. In this department, the robotics arm was also commonly used to illustrate kinematics and control systems. In 2020, one of the Department of Mechatronics Engineering students made a prototype of a robotics arm. This prototype was made as a tool to understand robotics. Unfortunately, the design was focused solely on hardware and software components and there is no controller installed. That caused a significant error in the robot's movement. Based on the previous prototype design, this research will be directed on dynamics, kinematics, and control. The kinematics were divided into two categories, which are forward and inverse kinematics. Also, the method used for control is Proportional-Integral-Derivative (PID). The main idea of the PID controller is to control the angular movement of the robotics arm refers to the target based on an error between actual pose and desired pose.





# Kata Pengantar

Puji dan Syukur pada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan anugerah-Nya penulisan laporan Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Menyadari hal itu juga, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua saya H.A Parulian Hutabarat dan Kertina Sagala serta saudara saya Grace Kelly Hutabarat, Jonathan Hutabarat, dan Juan Hutabarat yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
2. Bapak Tua Agustinus Tamba, PhD., selaku pembimbing penulis dalam memberikan arahan mengenai materi dan juga memberikan dukungan yang telah diberikan.
3. Jonathan Chandra yang telah mengajari dan memberikan saran kepada penulis.
4. Idham Hanif yang telah memberikan purwarupa lengan robot sehingga penulis dapat mengimplementasikan sistem kontrol pada lengan robot tersebut.
5. Glenn Bonaventura Wijaya yang telah memberikan dukungan serta memberikan saran kepada penulis.
6. Stephen Ivannda Gulo yang telah mengajari dan memberikan saran atau pendapat kepada penulis.
7. Farhan Trirama, Erwin Setiawan, dan Patrick Santosa yang telah membantu dalam memberikan alat-alat mereka sehingga implementasi lengan robot dapat dilakukan.

Akhir kata, mohon maaf yang sebesar-besarnya jika ada kekurangan maupun hal-hal yang tidak berkenan pada penyusunan Buku Tugas Akhir ini. Semoga Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan dari semua pihak yang telah membantu dan besar harapan saya, agar Buku Tugas Akhir ini akan berguna dalam perkembangan Program Studi Sarjana Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika Universitas Katolik Parahyangan pada khususnya serta khazanah keilmuan Teknik Mekatronika pada umumnya.



# Daftar Isi

Abstrak	ix
Abstract	xi
Kata Pengantar	xiii
Daftar Isi	xv
Daftar Tabel	xix
Daftar Gambar	xxiii
Daftar Simbol dan Variabel	xxv
Daftar Singkatan	xxvii
<b>1 Pendahuluan</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah . . . . .	1
1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah. . . . .	2
1.3 Batasan Masalah dan Asumsi . . . . .	3
1.4 Tujuan Tugas Akhir . . . . .	3
1.5 Manfaat Tugas Akhir . . . . .	3
1.6 Metodologi Tugas Akhir . . . . .	4
1.7 Sistematika Penulisan . . . . .	5
<b>2 Tinjauan Pustaka</b>	<b>7</b>
2.1 Lengan Robot . . . . .	7
2.2 <i>Rotational and Orientation Kinematics</i> . . . . .	7
2.3 Kinematika Maju ( <i>Forward Kinematics</i> ) . . . . .	8
2.3.1 Contoh Kinematika Lengan Robot dengan Dua Derajat Kebebasan. . . . .	11

2.4	Kinematika Mundur ( <i>Inverse Kinematics</i> ) . . . . .	12
2.4.1	<i>Solvability</i> . . . . .	13
2.4.2	Adanya Solusi . . . . .	13
2.4.3	Solusi Berganda . . . . .	13
2.4.4	Perbandingan Metode Aljabar dengan Metode Geometri . . . . .	14
2.5	Matriks Jacobian dari Model Manipulator . . . . .	15
2.5.1	Kecepatan Pergerakan . . . . .	15
2.5.2	Metode Iteratif <i>Inverse</i> Jacobian . . . . .	17
2.6	Dinamika Lengan Robot . . . . .	18
2.7	Metode Euler-Lagrange . . . . .	19
2.8	Pengontrol PID . . . . .	19
2.8.1	Desain Kontrol PID pada Lengan Robot . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Perancangan Sistem</b>	<b>23</b>
3.1	<i>Forward Kinematics</i> . . . . .	23
3.2	<i>Inverse Kinematics</i> . . . . .	31
3.3	Matriks Jacobian . . . . .	34
3.3.1	Metode Iteratif <i>Inverse</i> Jacobian . . . . .	36
3.4	Simulasi Pengontrol PID pada Lengan Robot . . . . .	39
3.4.1	Metode Ziegler-Nichols untuk Penalaan Pengontrol PID . . . . .	40
3.4.2	Simulasi Penalaan PID dengan Metode Ziegler-Nichols . . . . .	43
3.5	Perangkat Implementasi . . . . .	45
3.5.1	Konfigurasi Perangkat Implementasi . . . . .	46
<b>4</b>	<b>Analisis Sistem</b>	<b>49</b>
4.1	Properti Lengan Robot . . . . .	49
4.1.1	Dimensi Komponen Lengan Robot . . . . .	49
4.1.2	<i>Working Envelope</i> . . . . .	50
4.1.3	Parameter DH Lengan Robot . . . . .	51
4.2	Kamera Pixy2 . . . . .	52
4.3	Implementasi Pengontrol PID pada Lengan Robot . . . . .	54
4.3.1	Penalaan Konstanta PID pada <i>Link</i> Satu . . . . .	55
4.3.2	Penalaan Konstanta PID pada <i>Link</i> Dua . . . . .	56
4.3.3	Penalaan Konstanta PID pada <i>Link</i> Tiga . . . . .	56
4.4	Implementasi Pengontrol PID . . . . .	57
4.4.1	Diagram Blok Lengan Robot . . . . .	57
4.4.2	Implementasi Pengontrol PID dengan Penalaan Manual . . . . .	58
4.4.3	Implementasi Pengontrol PID dengan Penalaan Hasil Simulasi . . . . .	62
4.5	Perbandingan Penalaan Manual dengan Penalaan Simulasi saat Implementasi . . . . .	65
4.5.1	Perbandingan Penalaan Manual dengan Simulasi pada <i>Link</i> Satu . . . . .	65
4.5.2	Perbandingan Penalaan Manual dengan Simulasi pada <i>Link</i> Dua . . . . .	67
4.5.3	Perbandingan Penalaan Manual dengan Simulasi pada <i>Link</i> Tiga . . . . .	69

<b>5</b>	<b>Simpulan dan Saran</b>	<b>71</b>
5.1	Simpulan . . . . .	71
5.2	Saran . . . . .	72
	<b>Daftar Pustaka</b>	<b>73</b>
	<b>Lampiran A Penjelasan Matriks Jacobian dan Persamaan Dinamika</b>	<b>76</b>
A.1	Penjelasan Matriks Jacobian . . . . .	76
A.2	Model Persamaan Dinamika Lengan Robot . . . . .	77
A.2.1	Analisis Euler-Lagrange . . . . .	77
	<b>Lampiran B Data Penalaan PID dan Data Implementasi pada Lengan Robot</b>	<b>86</b>
B.1	Data Penalaan PID <i>Link</i> Satu . . . . .	86
B.1.1	Penalaan Konstanta P . . . . .	86
B.1.2	Penalaan Konstanta D . . . . .	88
B.1.3	Penalaan Konstanta I . . . . .	91
B.2	Data Penalaan PID <i>Link</i> Dua . . . . .	92
B.2.1	Penalaan Konstanta P . . . . .	92
B.2.2	Penalaan Konstanta D . . . . .	94
B.2.3	Penalaan Konstanta I . . . . .	96
B.3	Data Penalaan PID <i>Link</i> Tiga . . . . .	98
B.3.1	Penalaan Konstanta P . . . . .	98
B.3.2	Penalaan Konstanta D . . . . .	100
B.4	Data Implementasi dengan Penalaan Manual . . . . .	102
B.4.1	Data Implementasi <i>Link</i> Satu . . . . .	102
B.4.2	Data Implementasi <i>Link</i> Dua . . . . .	104
B.4.3	Data Implementasi <i>Link</i> Tiga . . . . .	105
B.5	Data Implementasi dengan Penalaan Simulasi . . . . .	106
B.5.1	Data Implementasi <i>Link</i> Satu . . . . .	106
B.5.2	Data Implementasi <i>Link</i> Dua . . . . .	108
B.5.3	Data Implementasi <i>Link</i> Tiga . . . . .	109



# Daftar Tabel

2.1	Ilustrasi Tabel DH . . . . .	9
2.2	Tabel DH pada robot dua derajat kebebasan . . . . .	11
3.1	Tabel DH pada lengan robot empat DOF . . . . .	23
3.2	Tabel DH dari implementasi lengan robot . . . . .	29
3.3	Tabel menentukan matriks Jacobian . . . . .	35
3.4	Metode Ziegler-Nichols berdasarkan respon step [1]. . . . .	42
3.5	Metode Ziegler-Nichols berdasarkan respon frekuensi [1]. . . . .	42
3.6	Parameter nilai $K_{cr}$ saat kondisi <i>neutral stability</i> setiap <i>link</i> . . . . .	43
3.7	Tabel nilai konstanta pengontrol setiap <i>link</i> . . . . .	44
4.1	Dimensi komponen lengan robot. . . . .	49
4.2	Parameter DH dari Implementasi Lengan Robot . . . . .	52
4.3	Tabel perbandingan spesifikasi kamera. . . . .	53
4.4	Nilai parameter pengontrol <i>link</i> satu. . . . .	67
4.5	Nilai parameter pengontrol <i>link</i> dua. . . . .	69
4.6	Nilai parameter pengontrol <i>link</i> tiga. . . . .	69
B.1	Tabel Penalaan $K_p = 1$ . . . . .	86
B.2	Lanjutan Tabel Penalanan $K_p = 1$ . . . . .	87
B.3	Lanjutan Tabel Penalanan $K_p = 1$ . . . . .	87
B.4	Tabel Penalanan $K_p = 5$ . . . . .	87
B.5	Lanjutan Tabel Penalanan $K_p = 5$ . . . . .	87
B.6	Lanjutan Tabel Penalanan $K_p = 5$ . . . . .	87
B.7	Tabel Penalanan $K_p = 6$ . . . . .	88
B.8	Lanjutan Tabel Penalanan $K_p = 6$ . . . . .	88
B.9	Lanjutan Tabel Penalanan $K_p = 6$ . . . . .	88
B.10	Tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 1$ . . . . .	88
B.11	Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 1$ . . . . .	89
B.12	Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 1$ . . . . .	89
B.13	Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 1$ . . . . .	89
B.14	Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 1$ . . . . .	89
B.15	Tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 5$ . . . . .	89

B.16 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 5$ . . . . .	90
B.17 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 5$ . . . . .	90
B.18 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ dan $K_d = 5$ . . . . .	90
B.19 Tabel penalaan konstanta $K_p = 5$ dan $K_d = 0,5$ . . . . .	90
B.20 Lanjutan tabel penalaan konstanta $K_p = 5$ dan $K_d = 0,5$ . . . . .	90
B.21 Lanjutan tabel penalaan konstanta $K_p = 5$ dan $K_d = 0,5$ . . . . .	91
B.22 Lanjutan tabel penalaan konstanta $K_p = 5$ dan $K_d = 0,5$ . . . . .	91
B.23 Tabel penalaan $K_p = 5$ , $K_d = 0,5$ , dan $K_i = 1$ . . . . .	91
B.24 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ , $K_d = 0,5$ , dan $K_i = 1$ . . . . .	91
B.25 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ , $K_d = 0,5$ , dan $K_i = 1$ . . . . .	91
B.26 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 5$ , $K_d = 0,5$ , dan $K_i = 1$ . . . . .	92
B.27 Tabel penalaan $K_p = 0,1$ . . . . .	92
B.28 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,1$ . . . . .	92
B.29 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,1$ . . . . .	92
B.30 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,1$ . . . . .	93
B.31 Tabel penalaan $K_p = 0,2$ . . . . .	93
B.32 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,2$ . . . . .	93
B.33 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,2$ . . . . .	93
B.34 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,2$ . . . . .	93
B.35 Tabel penalaan $K_p = 0,09$ . . . . .	94
B.36 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ . . . . .	94
B.37 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ . . . . .	94
B.38 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ . . . . .	94
B.39 Tabel penalaan $K_p = 0,09$ dan $K_d = 0,1$ . . . . .	95
B.40 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ dan $K_d = 0,1$ . . . . .	95
B.41 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ dan $K_d = 0,1$ . . . . .	95
B.42 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ dan $K_d = 0,1$ . . . . .	95
B.43 Tabel penalaan $K_p = 0,09$ dan $K_d = 0,2$ . . . . .	95
B.44 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ dan $K_d = 0,2$ . . . . .	96
B.45 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ dan $K_d = 0,2$ . . . . .	96
B.46 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ dan $K_d = 0,2$ . . . . .	96
B.47 Tabel penalaan $K_p = 0,09$ , $K_d = 0,1$ , dan $K_i = 0,1$ . . . . .	96
B.48 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ , $K_d = 0,1$ , dan $K_i = 0,1$ . . . . .	97
B.49 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ , $K_d = 0,1$ , dan $K_i = 0,1$ . . . . .	97
B.50 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ , $K_d = 0,1$ , dan $K_i = 0,1$ . . . . .	97
B.51 Tabel penalaan $K_p = 0,09$ , $K_d = 0,1$ , dan $K_i = 0,2$ . . . . .	97
B.52 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ , $K_d = 0,1$ , dan $K_i = 0,2$ . . . . .	97
B.53 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ , $K_d = 0,1$ , dan $K_i = 0,2$ . . . . .	98
B.54 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,09$ , $K_d = 0,1$ , dan $K_i = 0,2$ . . . . .	98
B.55 Tabel penalaan $K_p = 0,005$ . . . . .	98
B.56 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,005$ . . . . .	98
B.57 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,005$ . . . . .	99
B.58 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,005$ . . . . .	99
B.59 Tabel penalaan $K_p = 0,004$ . . . . .	99
B.60 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,004$ . . . . .	99



B.61 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,004$ . . . . .	99
B.62 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,004$ . . . . .	100
B.63 Tabel penalaan $K_p = 0,006$ . . . . .	100
B.64 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ . . . . .	100
B.65 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ . . . . .	100
B.66 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ . . . . .	100
B.67 Tabel penalaan $K_p = 0,006$ dan $K_d = 0,5$ . . . . .	101
B.68 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ dan $K_d = 0,5$ . . . . .	101
B.69 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ dan $K_d = 0,5$ . . . . .	101
B.70 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ dan $K_d = 0,5$ . . . . .	101
B.71 Tabel penalaan $K_p = 0,006$ dan $K_d = 0,3$ . . . . .	101
B.72 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ dan $K_d = 0,3$ . . . . .	102
B.73 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ dan $K_d = 0,3$ . . . . .	102
B.74 Lanjutan tabel penalaan $K_p = 0,006$ dan $K_d = 0,3$ . . . . .	102
B.75 Data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	102
B.76 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	102
B.77 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	103
B.78 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	103
B.79 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	103
B.80 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	103
B.81 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	103
B.82 Data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	104
B.83 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	104
B.84 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	104
B.85 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	104
B.86 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	104
B.87 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	105
B.88 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	105
B.89 Data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	105
B.90 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	105
B.91 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	105
B.92 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	106
B.93 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	106
B.94 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	106
B.95 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	106
B.96 Data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	106
B.97 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	107
B.98 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	107
B.99 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	107
B.100 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	107
B.101 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	107
B.102 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> satu . . . . .	108
B.103 Data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	108
B.104 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	108
B.105 Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	108

B.106	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	108
B.107	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	109
B.108	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	109
B.109	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> dua . . . . .	109
B.110	Data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	109
B.111	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	109
B.112	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	110
B.113	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	110
B.114	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	110
B.115	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	110
B.116	Lanjutan data implementasi pada <i>link</i> tiga . . . . .	110

# Daftar Gambar

1.1	Diagram alir dari metodologi Tugas Akhir. . . . .	5
2.1	Ilustrasi <i>frame</i> B yang merupakan hasil rotasi dari <i>frame</i> G. . . . .	8
2.2	Ilustrasi Parameter DH [2]. . . . .	9
2.3	Ilustrasi lengan robot dengan dua derajat kebebasan. . . . .	11
2.4	Ilustrasi lengan robot dengan dua DOF. . . . .	12
2.5	Ilustrasi solusi berganda pada lengan robot dengan tiga DOF. . . . .	14
2.6	Ilustrasi gerak relatif pada dua titik. . . . .	16
2.7	Diagram blok dari pengontrol PID. . . . .	20
2.8	Detail diagram blok dari pengontrol PID. . . . .	20
3.1	Model kinematika lengan robot empat DOF. . . . .	24
3.2	Simulasi lengan robot dilihat dari sumbu-Z robot . . . . .	27
3.3	Simulasi lengan robot dilihat dari sumbu-Y robot . . . . .	27
3.4	Simulasi lengan robot dengan kombinasi nilai $\theta=90^\circ$ . . . . .	29
3.5	Implementasi model lengan robot . . . . .	30
3.6	Proyeksi lengan robot empat DOF [3]. . . . .	31
3.7	Hasil proyeksi menggunakan pandangan atas. . . . .	32
3.8	Hasil proyeksi menggunakan pandangan samping. . . . .	32
3.9	Hasil proyeksi menggunakan pandangan samping. . . . .	33
3.10	Hasil nilai $\theta$ menggunakan metode <i>inverse kinematics</i> . . . . .	36
3.11	Metode <i>forward kinematics</i> dari hasil metode <i>inverse kinematics</i> . . . . .	37
3.12	Diagram alir dari metode iteratif <i>inverse</i> Jacobian . . . . .	38
3.13	Metode <i>forward kinematics</i> dengan nilai $\theta$ dari iterasi <i>inverse</i> Jacobian. . . . .	39
3.14	Model dinamika lengan robot. . . . .	40
3.15	Kurva Respon dari Metode Pertama Ziegler-Nichols. . . . .	41
3.16	Grafik yang diperoleh saat kondisi nilai kritis ( $K_{cr}$ ). . . . .	42
3.17	Grafik penalaan <i>link</i> satu (kiri atas), grafik penalaan <i>link</i> dua (kanan atas) dan grafik penalaan <i>link</i> tiga (tengah bawah). . . . .	43
3.18	Grafik nilai <i>error</i> sudut <i>link</i> satu . . . . .	44
3.19	Grafik nilai <i>error</i> sudut <i>link</i> dua . . . . .	44
3.20	Grafik nilai <i>error</i> sudut <i>link</i> tiga . . . . .	45
3.21	Komponen-komponen yang digunakan dalam implementasi lengan robot. . . . .	46

3.22	Alur data konfigurasi perangkat keras lengan robot. . . . .	47
4.1	Dimensi pada lengan robot (milimeter). . . . .	50
4.2	<i>Working envelope</i> lengan robot . . . . .	50
4.3	Batas pengerjaan implementasi pengontrol lengan robot. . . . .	51
4.4	Ilustrasi layar dari kamera Pixy2. . . . .	52
4.5	Ilustrasi segmentasi gambar dari Pixy2. . . . .	53
4.6	Posisi titik tengah dari segmentasi gambar. . . . .	54
4.7	Ilustrasi pengaruh cahaya pada kamera Pixy2. . . . .	54
4.8	Grafik penalaan PID <i>link</i> satu. . . . .	56
4.9	Grafik penalaan PID <i>link</i> dua. . . . .	56
4.10	Grafik penalaan PID <i>link</i> tiga. . . . .	57
4.11	Diagram blok pengontrol PID pada lengan robot. . . . .	58
4.12	(a)ilustrasi pose awal lengan robot dan (b) ilustrasi pose yang diinginkan. 58	
4.13	(a) posisi awal lengan robot dari kamera dan (b) posisi akhir lengan robot dari kamera. . . . .	59
4.14	Grafik pergerakan sudut aktual <i>link</i> satu terhadap waktu. . . . .	60
4.15	Grafik sinyal kontrol dan nilai eror <i>link</i> satu terhadap waktu. . . . .	60
4.16	Grafik pergerakan sudut aktual <i>link</i> dua terhadap waktu. . . . .	60
4.17	Grafik sinyal kontrol dan nilai eror <i>link</i> dua terhadap waktu. . . . .	61
4.18	Grafik pergerakan sudut aktual <i>link</i> tiga terhadap waktu. . . . .	61
4.19	Grafik sinyal kontrol dan nilai eror <i>link</i> tiga terhadap waktu. . . . .	61
4.20	Grafik sudut aktual dari <i>link</i> satu terhadap waktu. . . . .	63
4.21	Grafik sudut aktual dari <i>link</i> dua terhadap waktu. . . . .	63
4.22	Grafik sudut aktual dari <i>link</i> tiga terhadap waktu. . . . .	63
4.23	Grafik $\tau_1$ dan $e_1$ terhadap waktu. . . . .	64
4.24	Grafik $\tau_2$ dan $e_2$ terhadap waktu. . . . .	64
4.25	Grafik $\tau_2$ dan $e_2$ terhadap waktu. . . . .	64
4.26	Grafik $\theta_1$ aktual dari hasil penalaan manual pada <i>link</i> satu. . . . .	65
4.27	Grafik $\theta_1$ aktual dari hasil penalaan simulasi pada <i>link</i> satu. . . . .	66
4.28	Grafik $\tau_1$ dari hasil penalaan manual pada <i>link</i> satu. . . . .	66
4.29	Grafik $\tau_1$ dari hasil penalaan simulasi pada <i>link</i> satu. . . . .	66
4.30	Grafik $\theta_2$ aktual dari hasil penalaan manual pada <i>link</i> dua. . . . .	67
4.31	Grafik $\theta_2$ aktual dari hasil penalaan simulasi pada <i>link</i> dua. . . . .	68
4.32	Grafik $\tau_2$ dari hasil penalaan manual pada <i>link</i> dua. . . . .	68
4.33	Grafik $\tau_2$ dari hasil penalaan simulasi pada <i>link</i> dua. . . . .	68
4.34	Grafik $\theta_3$ aktual dari hasil penalaan manual pada <i>link</i> tiga. . . . .	69
4.35	Grafik $\theta_3$ aktual dari hasil penalaan simulasi pada <i>link</i> tiga. . . . .	70
4.36	Grafik $\tau_3$ dari hasil penalaan manual pada <i>link</i> tiga. . . . .	70
4.37	Grafik $\tau_3$ dari hasil penalaan simulasi pada <i>link</i> tiga. . . . .	70

## Daftar Simbol dan Variabel

$l_1$	panjang <i>link</i> 1
$l_2$	panjang <i>link</i> 2
$l_3$	panjang <i>link</i> 3
$0_n^T$	matriks transformasi homogenous
$R$	matriks rotasi
$q$	variabel umum
$\omega$	kecepatan sudut
$v$	kecepatan linier
$J$	matriks jacobian
$J^+$	inverse matriks menggunakan pseudocode
$J^T$	matriks transpose jacobian
$I$	matriks identitas
$O_n$	posisi <i>end effector</i>
$O_i$	posisi <i>link</i> yang ditinjau
$\mathcal{L}$	Lagrangian sistem
$\theta$	nilai sudut pada <i>link</i>
$\tau$	sinyal kontrol lengan robot
$K_p$	nilai konstanta pengontrol proporsional
$K_d$	nilai konstanta pengontrol <i>derivative</i>
$K_i$	nilai konstanta pengontrol integral
$T_i$	waktu integral dari sistem
$T_d$	waktu turunan dari sistem
$K_{cr}$	konstanta yang menghasilkan kondisi <i>neutral stability</i>
$P_{cr}$	waktu antara titik puncak 1 ke titik puncak lainnya
$e$	eror sudut lengan robot
$T$	konstanta waktu
$L$	waktu tunda



## Daftar Singkatan

TEKM	Teknik Elektro konsentrasi Mekanika
UNPAR	Universitas Katolik Parahyangan
Pose	posisi dan orientasi
DH	Denavit-Hartenberg
DOF	<i>degree of freedom</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>





# Bab 1

## Pendahuluan

Bab ini berisi mengenai latar belakang masalah pada penelitian perancangan pengontrol umpan balik pada lengan robot empat derajat kebebasan, dan motivasi penelitian mengenai topik tersebut. Bab ini juga berisikan identifikasi dan perumusan masalah, batasan masalah dan asumsi yang digunakan dalam penelitian, manfaat Tugas Akhir, serta metodologi Tugas Akhir.

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Saat ini, industri robot sedang menarik perhatian dari berbagai bidang penelitian dan perkembangan teknologi karena pesatnya kemajuan teknologi di berbagai bidang seperti bidang mekatronika, teknologi informasi, sistem kontrol modern, dan teknologi terkait pada bidang otomotif dan kedirgantaraan [4]. Tujuan diciptakannya robot adalah sebagai alat yang dapat membantu pekerjaan manusia, baik dalam hal pekerjaan yang berbahaya, *repetitive* atau berulang-ulang, maupun pekerjaan yang membutuhkan tingkat kepresisian dan ketelitian yang tinggi. Tujuan lain yang ingin dicapai adalah untuk robot dapat meningkatkan produktivitas serta efisiensi dibandingkan dengan pekerjaan yang dilakukan oleh manusia.

Pada industri manufaktur terutama industri otomotif, robot memiliki peran penting setelah manusia, misalnya pada pabrik mobil dimana secara umum robot digunakan untuk membuat badan mobil, mengelas, mengangkat dan pekerjaan berat yang lainnya. Hal ini diakibatkan karena robot memiliki kecepatan, akurasi, dan keandalan yang relatif lebih baik dibandingkan dengan manusia. Saat ini, jenis robot yang paling banyak digunakan di industri adalah lengan robot atau manipulator robot. Lengan robot didesain dengan tujuan untuk menggantikan posisi manusia dalam mengerjakan pekerjaan yang berat dan berulang-ulang sehingga resiko cedera yang dialami manusia menjadi sedikit. Selain pada industri otomotif saja, lengan robot juga diterapkan pada industri manufaktur yang lain misalnya industri makanan,

minuman, dan industri tekstil. Pada industri tersebut peran lengan robot banyak digunakan sebagai alat pemindah barang atau memposisikan barang ke tempat yang diinginkan.

Lengan robot umumnya memiliki tiga bagian utama yaitu *joint* atau sambungan, *link*, dan *end effector* [5]. *Joint* adalah sambungan yang menghubungkan *link* satu dengan *link* yang lainnya. *Joint* memiliki dua tipe yaitu *prismatic* atau sering disebut juga dengan translasi dan *revolute* atau disebut juga dengan rotasional. *Link* adalah benda tegar yang terhubung dengan *joint*. *Link* juga sering disebut dengan lengan. Sedangkan *end effector* merupakan bagian lengan robot yang berada pada ujung lengan robot tersebut. Sederhananya *end effector* adalah *gripper* yang biasanya memiliki dua gerakan yaitu membuka dan menutup. Walaupun lengan robot merupakan salah satu robot yang sering digunakan dalam dunia industri, proses pembelajaran mengenai lengan robot ini cukup sulit [6].

Salah satu topik pembelajaran di TEKM UNPAR adalah ilmu robotika [7]. Pembelajaran pada program studi ini sering mengilustrasikan lengan robot sebagai objek dalam proses penentuan model kinematika dan dinamika serta implementasi pengontrol sehingga keberadaan purwarupa alat peraga yang mendukung pembelajaran perkuliahan tersebut sangatlah penting [6]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Idham Hanif Ayega [6], perancangan purwarupa lengan robot yang dilakukan berfokus pada perancangan perangkat keras maupun lunak dan belum memiliki modul pengontrol. Hal ini membuat pergerakan dari lengan robot tersebut menjadi kurang presisi jika dibandingkan menggunakan kontrol umpan balik. Untuk itu, dibutuhkan perancangan sistem kontrol umpan balik yang mampu memperkecil *error* dari pergerakan lengan robot tersebut. Perancangan pengontrol PID merupakan salah satu metode yang mampu mengurangi nilai *error* dari pergerakan robot tersebut.

## 1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah.

Berdasarkan latar belakang pada subbab 1.1, identifikasi masalah mengenai penelitian ini terdiri dari penentuan model kinematika dan dinamika pada lengan robot dan implementasi pengontrol menggunakan pengontrol PID. Dari latar belakang dan identifikasi masalah yang telah diuraikan, perumusan masalah dari penelitian lengan robot ini terdiri dari:

1. Bagaimana cara menentukan model kinematika dan dinamika lengan robot?
2. Bagaimana cara melakukan analisis *forward kinematics* dan *inverse kinematics* pada suatu lengan robot?
3. Bagaimana cara memperoleh persamaan umum dinamika pada lengan robot?
4. Bagaimana cara memperoleh nilai *error* dari pergerakan lengan robot?
5. Bagaimana cara merancang pengontrol untuk meminimalkan *error* dari pergerakan lengan robot tersebut?

6. Bagaimana cara merancang pengontrol PID pada lengan robot?
7. Bagaimana cara memperoleh nilai sudut orientasi ( $\theta$ ) dari masing-masing *link* dalam waktu riil?

### 1.3 Batasan Masalah dan Asumsi

Untuk menjawab masalah pada subbab 1.2, terdapat beberapa batasan masalah pada Tugas Akhir sebagai berikut:

1. Pemodelan hanya meliputi analisis kinematika dan dinamika lengan robot serta implementasi pengontrol pada lengan robot.
2. Analisis kinematika yang dilakukan menggunakan metode tabel Denavit-Hartenberg (DH).
3. Analisis dinamika lengan robot menggunakan metode Euler-Lagrange.
4. Implementasi pengontrol menggunakan pengontrol PID.
5. Simulasi kinematika lengan robot dan dinamika lengan robot menggunakan perangkat lunak MATLAB 2019.
6. Perangkat lunak yang dipakai dalam mengimplementasikan pengontrol pada lengan robot menggunakan perangkat lunak ARDUINO IDE.
7. Implementasi lengan robot hanya bergerak pada satu kuadran.
8. Pergerakan *link* satu robot hanya mampu  $90^\circ$  yaitu dari  $0^\circ$  sampai  $90^\circ$ .
9. Pergerakan *link* dua dan *link* tiga robot hanya mampu bergerak  $180^\circ$  yaitu dari  $-90^\circ$  hingga  $90^\circ$ .

Selain batasan masalah pada Tugas Akhir, terdapat juga beberapa asumsi yang digunakan yaitu:

1. Momen inersia pada lengan robot diabaikan.
2. Massa lengan robot ditinjau pada *joint* lengan robot.
3. Gaya sentrifugal pada robot diabaikan.

### 1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari Tugas Akhir adalah melakukan analisis *forward* dan *inverse kinematics* serta merancang pengontrol PID pada purwarupa manipulator lengan robot.

### 1.5 Manfaat Tugas Akhir

Adapun manfaat dari Tugas Akhir yaitu:

1. Mahasiswa memiliki pengetahuan dan kemampuan untuk mengimplementasikan penurunan model kinematika dan dinamika serta perancangan pengontrol pada lengan robot.
2. Pengembangan purwarupa lengan robot untuk kegiatan pembelajaran robotika dan implementasi pengontrol.
3. Kepada pembaca, menjadi sarana informasi dan pengetahuan mengenai penurunan model kinematika dan dinamika serta metode kontrol menggunakan pengontrol PID.

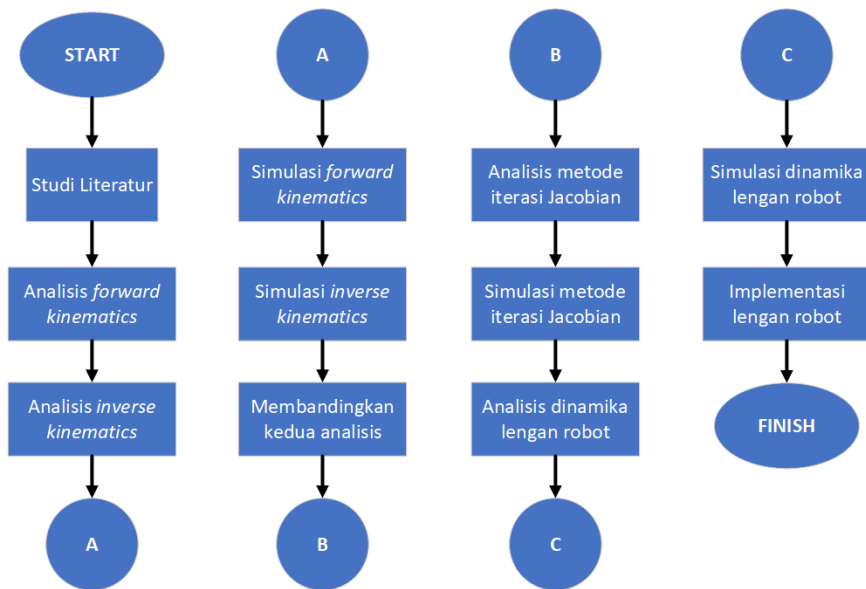
## 1.6 Metodologi Tugas Akhir

Langkah pertama dalam pengembangan lengan robot empat derajat kebebasan adalah melakukan studi literatur, dimana penulis mempelajari jurnal atau makalah dan buku terkait penurunan metode kinematika dan dinamika serta implementasi pengontrol pada lengan robot. Dari hasil studi literatur tersebut diperoleh bahwa analisis kinematika lengan robot terbagi menjadi dua jenis yaitu *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. Langkah selanjutnya adalah melakukan analisis *forward kinematics* menggunakan analisis DH. Dari analisis DH diperoleh matriks transformasi homogenous masing-masing *link* yang membuat pose *end effector* diperoleh. Setelah menyelesaikan metode *forward kinematics*, dilanjutkan dengan analisis *inverse kinematics* menggunakan metode geometri. Dari kedua analisis tersebut maka langkah selanjutnya adalah membandingkan hasil simulasi dari *forward kinematics* dan *inverse kinematics* dengan menggunakan MATLAB. Setelah melakukan perbandingan menggunakan MATLAB, maka ditemukan nilai *error* dari kedua analisis tersebut.

Dari hasil perbandingan itu, dibutuhkannya metode pengontrol yang mampu mengurangi nilai *error* yang dihasilkan oleh analisis *inverse kinematics*. Langkah berikutnya adalah mengurangi nilai *error* dengan menggunakan metode iteratif *inverse Jacobian*. Setelah mampu mengurangi *error* dengan menggunakan iteratif *inverse Jacobian*, maka langkah selanjutnya adalah mengimplementasikan metode iteratif *inverse Jacobian* dengan mensimulasikannya pada MATLAB. Untuk mengimplementasikan metode tersebut hal pertama yang dilakukan adalah menentukan matriks Jacobian yang diperoleh dari hasil analisis *forward kinematics*.

Dengan menemukan matriks Jacobian dari lengan robot tersebut, maka metode selanjutnya adalah metode iterasi *inverse Jacobian* dimana metode ini menggunakan matriks Jacobian dan matriks tersebut harus di-*inverse*-kan sehingga memenuhi metode kontrol yang digunakan. Kemudian metode iterasi tersebut disimulasikan menggunakan MATLAB. Selanjutnya, metode yang dilakukan adalah membandingkan hasil dari analisis *inverse kinematics* dan metode iterasi *inverse Jacobian*. Setelah membandingkan hasil iterasi, maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisis dinamika yang dilanjutkan juga mensimulasikan analisis dinamika tersebut ke pengontrol PID. Untuk langkah terakhir yang dilakukan pada penelitian Tugas

Akhir ini adalah mengimplementasikan dasar teori pada lengan robot. Gambar 1.1 merupakan diagram alir dari metodologi Tugas Akhir.



Gambar 1.1. Diagram alir dari metodologi Tugas Akhir.

## 1.7 Sistematika Penulisan

Laporan ini dibagi menjadi lima bab, yakni sebagai berikut:

1. **Bab 1 Pendahuluan.** Dalam bab ini dijelaskan mengenai latar belakang masalah, identifikasi dan perumusan masalah, batasan masalah dan asumsi, tujuan Tugas Akhir, manfaat Tugas Akhir, metodologi Tugas Akhir serta sistematika penulisan .
2. **Bab 2 Tinjauan Pustaka.** Bab ini berisikan tentang teori manipulator robot yaitu *rotational and orientation kinematics*, *forward kinematics*, *inverse kinematics*, matriks Jacobian, dinamika lengan robot dan pengontrol PID. Teori-teori tersebut dijadikan sebagai acuan dalam melakukan simulasi, implementasi dan analisis dari Laporan Tugas Akhir. Teori-teori dasar diperoleh melalui proses menelaah pustaka yang direkomendasikan oleh dosen pembimbing.
3. **Bab 3 Perancangan Sistem.** Dalam bab ini dipaparkan mengenai hasil dari simulasi mengenai teori-teori yang ada pada bab dasar teori. Untuk *software* yang digunakan pada simulasi adalah MATLAB. Bab ini juga menjelaskan analisa dari hasil yang diperoleh dari simulasi tersebut.

4. **Bab 4 Implementasi dan Analisa.** Pada bab ini dipaparkan mengenai properti lengan robot pada saat implementasi, penalaan secara manual pengontrol PID pada implementasi lengan robot, dan perbandingan hasil penalaan secara manual dengan hasil penalaan dari simulasi.
5. **Bab 5 Kesimpulan dan Saran.** Pada bab ini dipaparkan kesimpulan untuk menjawab identifikasi masalah dan tujuan dari Tugas Akhir dan terdapat beberapa saran dalam mengembangkan purwarupa lengan robot.