

**PERBANDINGAN SISTEM KENDALI INVERTED  
PENDULUM MENGGUNAKAN *PROPORTIONAL – INTEGRAL*  
– *DERIVATIVE (PID)* DAN *PROPORTIONAL – INTEGRAL (PI)***



**SKRIPSI**

**Dibuat Untuk Memenuhi Syarat Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik Pada  
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya**

**Oleh**

**RENI SAMARA  
03041181419047**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA  
2019**

# LEMBAR PENGESAHAN

## PERBANDINGAN SISTEM KENDALI *INVERTED PENDULUM* MENGGUNAKAN *PROPORTIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVE (PID)* DAN *PROPORTIONAL – INTEGRAL (PI)*



### SKRIPSI

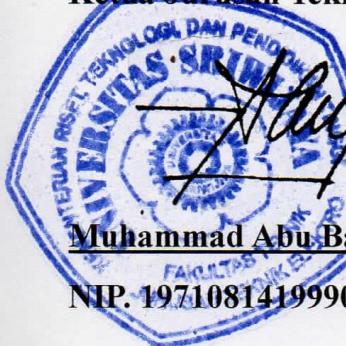
Dibuat Untuk Memenuhi Syarat Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik Pada  
Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

OLEH

RENI SAMARA  
03041181419047

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro



Muhammad Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 197108141999031005

Palembang, Juli 2019

Menyetujui,

Pembimbing Utama

A blue ink signature of Dr. Bhakti Yudho Suprapto, S.T., M.T. is placed over his printed name and NIP number.

Dr. Bhakti Yudho Suprapto, S.T., M.T.

NIP. 197502112003121002

Saya sebagai pembimbing dengan ini menyatakan bahwa saya telah membaca dan menyetujui skripsi ini dan dalam pandangan saya skop dan kualitas skripsi ini mencukupi sebagai skripsi mahasiswa sarjana strata satu (S1)

Tanda Tangan



Pembimbing Utama : Dr. Bhakti Yudho Suprapto, S.T., M.T.

Tanggal

: 23 / Juli / 2019

## **HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS**

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Reni Samara  
NIM : 03041181419047  
Fakultas : Teknik  
Jurusan/Prodi : Teknik Elektro  
Universitas : Sriwijaya

Menyatakan bahwa karya ilmiah dengan judul “Perbandingan Sistem Kendali *Inverted Pendulum* Menggunakan *Proportional – Integral – Derivative* (PID) dan *Proportional – Integral* (PI)” merupakan karya sendiri dan benar keasliannya. Apabila ternyata dikemudian hari karya ilmiah ini merupakan hasil plagiat atas karya ilmiah orang lain, maka saya bersedia bertanggung jawab dan menerima sanksi yang sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa paksaan.

Palembang, Juli 2019



**Reni Samara**

**NIM. 03041181419047**

## KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warrahmatullah Wabarakatuh.

Puji syukur penulis panjatkan atas Rahmat dan Karunia Allah SWT penulis dapat menyelesaikan Penulisan Tugas Akhir dengan judul "**PERBANDINGAN SISTEM KENDALI INVERTED PENDULUM MENGGUNAKAN PROPORTIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVE (PID) DAN PROPORTIONAL – INTEGRAL (PI)**". Proposal Tugas Akhir ini disusun sebagai syarat untuk mengerjakan Tugas Akhir program Strata-1 Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari terdapat bantuan dari banyak pihak. Ucapan terima kasih tak terhingga penulis sampaikan kepada:

1. Allah SWT atas izin dan kemudahannya dalam penyelesaian segala urusan perkuliahan selama ini.
2. Orang tua beserta keluarga besar, tanpa keyakinan, doa serta pengorbanan yang besar selama ini.
3. Bapak Muhammad Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya.
4. Ibu Dr. Herlina, S.T., M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dr. Bhakti Yudho Suprapto, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing skripsi atas bimbingan, arahan dan nasihat selama penggerjaan skripsi.
6. Ibu Dr. Eng. Suci Dwijayanti, S.T., M.S. yang telah memberikan pemahaman, penjelasan serta dukungan untuk selama penulisan skripsi berjalan.
7. Bapak Ir. Aryulius Jasuan, M.S. selaku dosen pembimbing akademik.
8. Serta semua pihak yang telah membantu dalam proses penyusunan dan penyelesaian tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap bahwa skripsi yang ditulis ini bisa memberikan manfaat dan wawasan kepada pembaca walaupun dalam penulisannya masih terdapat kekurangan karena

keterbatasan Penulis. Maka dengan itu, Penulis sangat berharap atas kritik dan saran yang membangun dari para pembaca. Terima kasih.

Wassalamualaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.

Palembang, Juli 2019

Penulis

## ABSTRAK

### PERBANDINGAN SISTEM KENDALI INVERTED PENDULUM MENGGUNAKAN PROPORTIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVE (PID) DAN PROPORTONAL – INTEGRAL (PI)

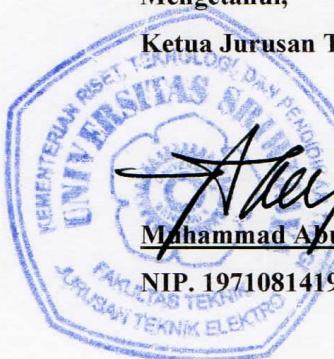
(Reni Samara, 03041181419047, 2019)

Pendulum Terbalik merupakan suatu sistem yang bekerja untuk mengendalikan keseimbangan suatu alat dengan titik massa berada diatas titik poros serta bersifat non-linear, memiliki banyak variabel, tidak menentu dan memiliki konfigurasi yang kurang terkendali atau jumlah input kendali lebih sedikit dibandingkan jumlah degree of freedom yang dapat dikendalikan. Salah satu cara untuk menyelesaikan permasalahan ini dengan menggunakan PID atau Proportional – Integral – Derivative. PID sering dijadikan banding dengan sistem kendali lain seperti Fuzzy, LQR atau Neural Network namun sedikit ditemukan penelitian mengenai sistem kendali antar PID (P dengan PID, PI dengan PD, PID dengan PI) pada Inverted Pendulum. Penelitian ini mencari parameter PID optimum yang sesuai dengan cara kerja alat Inverted Pendulum dan membandingkan hasil kerja sistem kendali PID dengan PI terhadap hasil kerja enkoder dalam bentuk sudut dan PWM (Pulse Width Modulation) motor untuk mencari sistem kendali yang terbaik. Hasil dari penelitian ini ditemukan parameter PID yang optimum adalah  $K_p = 9.95$ ,  $K_i = 8.10$ ,  $K_d = 8.10$  serta parameter PI yang optimum adalah  $K_p = 8.15$  dan  $K_i = 11.55$ . Hasil kerja enkoder dan PWM yang dihasilkan dari kedua sistem kendali tersebut menunjukkan bahwa sistem kendali PID lebih mampu mencapai dan menjaga keseimbangan pendulum menggunakan PWM yang cukup dengan rata-rata sebesar 98.47 dibandingkan sistem kendali PI.

**Kata Kunci:** *Inverted Pendulum; PID; PI; PWM; Enkoder, Pendulum Terbalik*

Mengetahui,

Ketua Jurusan Teknik Elektro

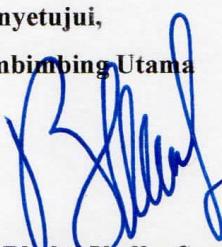
  
Mohammad Abu Bakar Sidik, S.T., M.Eng., Ph.D.

NIP. 197108141999031005

Palembang, Juli 2019

Menyetujui,

Pembimbing Utama

  
Dr. Bhakti Yudho Suprapto, S.T., M.T.

NIP. 197502112003121002

## **ABSTRACT**

### **COMPARISON OF INVERTED PENDULUM CONTROL SYSTEM USING *PROPORTIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVE (PID)* AND *PROPORTIONAL – INTEGRAL (PI)***

(Reni Samara, 03041181419047, 2019)

---

Inverted Pendulum is a system that works to control balance of a tool which has its point of mass above its rotating point. It is non-linear, has multiple variables, uncertain with single input multiple output (SIMO) characteristics. One of possible solutions to this problem is PID or Proportional – Integral – Derivative control system. PID is commonly used as a comparator to other control systems such as Fuzzy Logic Controller, LQR or Neural Network yet less is found about PID control work system results compared with each other (P with PID, PI with PD, PID with PI) towards Inverted Pendulum. This research discusses PID's optimum parameter search toward Inverted Pendulum's system and compares PID with PI by encoder's work results which is shown from the pendulum's angle shift and motor's PWM (Pulse Width Modulation) to find which control system is best. The result of this research from both control systems shows PID control is more capable to reach and maintain the pendulum's balance with the right amount of PWM with an average value of 98.47 rather than using PI control system.

**Keywords:** Inverted Pendulum; PID; PI; PWM; Encoder

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING .....	iii
LEMBAR PERNYATAAN INTEGRITAS .....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
ABSTRAK .....	vii
<i>ABSTRACT</i> .....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR RUMUS .....	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
NOMENKLATUR.....	xvii

### BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Keaslian Penelitian .....	4
1.6 Sistematika Penulisan .....	6

### BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Kendali.....	8
2.2 Pendulum Terbalik ( <i>Inverted Pendulum</i> ).....	10

2.2.1	Studi Pustaka <i>Inverted Pendulum</i> .....	10
2.2.2	Penelitian yang Pernah dilakukan pada <i>Inverted Pendulum</i> .....	12
2.3	Proportional – Integral – Derivative (PID).....	15
2.3.1	Studi Pustaka <i>Proportional – Integral – Derivative</i> .....	15
2.3.2	Penelitian yang Pernah dilakukan pada PID .....	19
2.4	Prinsip Umum Robotika .....	23
2.4.1	Sistem Elektronika .....	23
2.4.2	Sistem Mekanika.....	25

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Diagram Alir Penelitian .....	27
3.2	Metode Penelitian .....	28
3.3	Perancangan Mekanika <i>Inverted Pendulum</i> .....	29
3.4	Perancangan Program <i>Inverted Pendulum</i> menggunakan PID .....	31
3.5	Pengambilan Data.....	35
3.6	Teknik Analisa Data.....	37

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik menggunakan PID .....	40
4.1.1	Respon Sistem Enkoder .....	40
4.1.2	Hasil Pembacaan Nilai <i>Pulse Width Modulation</i> .....	42
4.2	Hasil Pengujian Pendulum Terbalik menggunakan PI .....	43
4.2.1	Respon Sistem Enkoder .....	43
4.2.2	Hasil Pembacaan Nilai <i>Pulse Width Modulation</i> .....	44
4.3	Perbandingan Respon Sistem <i>Inverted Pendulum</i> dengan PID dan PI .....	45

### BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan .....	47
5.2	Saran .....	47

**DAFTAR PUSTAKA**

**LAMPIRAN**

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar</b>	<b>Halaman</b>
Gambar 2.1 Sistem Kendali Lup Terbuka Sederhana.....	8
Gambar 2.2 Sistem Kendali Lup Terbuka .....	9
Gambar 2.3 Sistem Kendali Lup Tertutup .....	9
Gambar 2.4 <i>Free Body Diagram Inverted Pendulum</i> .....	11
Gambar 2.5 <i>Root Locus</i> dari Pendulum dan Motor .....	13
Gambar 2.6 Hasil Uji Coba Kestabilan dengan <i>Root Locus</i> .....	14
Gambar 2.7 Diagram Blok Pengendali PID .....	17
Gambar 2.8 Diagram Blok <i>Non-Interacting Form</i> .....	18
Gambar 2.9 Diagram Blok <i>Interacting Form</i> .....	18
Gambar 2.10 <i>Root Locus</i> dari Penelitian [8] .....	19
Gambar 2.11 Respon Sistem saat $K_p = 0$ , $K_i = 0$ dan $K_d = 0$ .....	20
Gambar 2.12 Respon Sistem saat $K_p = 15$ , $K_i = 0$ dan $K_d = 0$ .....	21
Gambar 2.13 Respon Sistem saat $K_p = 30$ , $K_i = 0$ dan $K_d = 0$ .....	21
Gambar 2.14 Respon Sistem saat $K_p = 15$ dan $K_i = 5$ .....	22
Gambar 2.15 Respon Sistem saat $K_p = 15$ , $K_i = 5$ dan $K_d = 5$ .....	22
Gambar 2.16 <i>Reaction Wheel</i> .....	23
Gambar 2.17 Prinsip Umum Robotika .....	24
Gambar 2.18 Contoh Sensor.....	24
Gambar 2.19 Desain Mikrokontroler .....	25
Gambar 2.20 Contoh Aktuator.....	26
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	27
Gambar 3.2 Desain Alat <i>Inverted Pendulum</i> .....	29
Gambar 3.3 Diagram Alir Inisialisasi Pergerakan <i>Inverted Pendulum</i> .....	32
Gambar 3.4 Diagram Alir Pergerakan Berayun <i>Inverted Pendulum</i> .....	33
Gambar 3.5 Diagram Alir Inisialisasi PID pada <i>Inverted Pendulum</i> .....	34
Gambar 3.6 Tampilan <i>Raw Data</i> pada <i>Serial Monitor Arduino</i> .....	37

Gambar 4.1	Alat <i>Inverted Pendulum</i> .....	38
Gambar 4.2	Grafik Pembacaan Nilai Enkoder menggunakan PID Optimum..	41
Gambar 4.3	Grafik Pembacaan Nilai PWM menggunakan PID Optimum.....	42
Gambar 4.4	Grafik Pembacaan Nilai Enkoder menggunakan PI Optimum.....	43
Gambar 4.5	Grafik Pembacaan PWM menggunakan PI Optimum.....	44
Gambar 4.6	Perbandingan Hasil Kerja PID dengan PI Terhadap Sudut .....	45
Gambar 4.7	Perbandingan Hasil Kerja PID dengan PI Terhadap PWM .....	45

## **DAFTAR TABEL**

	<b>Halaman</b>
Tabel 3.1	Spesifikasi <i>Inverted Pendulum</i> .....
Tabel 3.2	30
Tabel 3.3	Spesifikasi Troli .....
Tabel 3.4	30
	Spesifikasi Platform dan Rel .....
	30
	Spesifikasi Alas (Base) .....
	31

## DAFTAR RUMUS

	<b>Halaman</b>
Rumus 2.1 Perhitungan Pergerakan Troli .....	11
Rumus 2.2 Perhitungan Pergerakan Rotasi Batang Pendulum.....	12
Rumus 2.3 Model Matematis Troli <i>Inverted Pendulum</i> .....	12
Rumus 2.4 Model Matematis Pendulum .....	12
Rumus 2.5 Perhitungan Nilai $u$ Mekanisme Umpan Balik .....	15
Rumus 2.6 Fungsi Alih Pengendali <i>Proportional</i> .....	16
Rumus 2.7 Transformasi <i>Laplace</i> Fungsi Alih Pengendali <i>Proportional</i> .....	16
Rumus 2.8 Fungsi Alih Pengendali <i>Integral</i> .....	16
Rumus 2.9 Transformasi <i>Laplace</i> Fungsi Alih Pengendali <i>Integral</i> .....	16
Rumus 2.10 Fungsi Alih Pengendali PID .....	17
Rumus 2.11 Transformasi <i>Laplace</i> Fungsi Alih PID .....	17

## **DAFTAR LAMPIRAN**

	<b>Halaman</b>
1. Peningkatan Upaya Kendali Terhadap Rasio Massa Pendulum dengan Massa Troli .....	50
2. Perancangan Elektrikal Alat <i>Inverted Pendulum</i> .....	52
3. Program Arduino Mega Alat <i>Inverted Pendulum</i> .....	53
4. Program Arduino Mega untuk Pengaturan Enkoder .....	62
5. Percobaan Parameter PID saat <i>Trial &amp; Error</i> terhadap Nilai Enkoder yang dihasilkan .....	66
6. Percobaan Parameter PID saat <i>Trial &amp; Error</i> terhadap Nilai PWM yang dihasilkan.....	66
7. Percobaan Parameter PI saat <i>Trial &amp; Error</i> terhadap Nilai Enkoder yang dihasilkan .....	67
8. Percobaan Parameter PI saat <i>Trial &amp; Error</i> terhadap Nilai PWM yang dihasilkan.....	67
8. Gantt Chart .....	68

## NOMENKLATUR

$M$	: Massa Troli
$l$	: Panjang Pendulum
$m$	: Massa Pendulum
$g$	: Gaya Gravitasi Bumi
$H$	: Arah Gerak Horizontal
$V$	: Arah Gerak Vertikal
$u$	: Gaya Dorong
$x$	: Absis / Jarak
$y$	: Ordinat
$\theta$	: Tetha (Derajat)
$\ddot{\theta}$	: Percepatan Sudut
$\ddot{x}$	: Percepatan Jarak
$\dot{\theta}$	: Kecepatan Sudut
$u(t)$	: Sinyal Masuk Kontroler / <i>Input</i>
$Gain$	: Bobot
<i>Steady State Error</i>	: Galat Keadaan Tunak
<i>Settling Time</i>	: Waktu Tunak
<i>Overshoot</i>	: Loncatan Sinyal
<i>Timer</i>	: Penunda Waktu
<i>Infrared</i>	: Infra Merah

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Teknologi telah berkembang pesat seiring berjalannya waktu, dibutuhkan suatu sistem agar teknologi yang kita gunakan dapat bekerja lebih baik, cepat dan semakin mudah untuk digunakan. Salah satu teknologi yang berkembang dan sistem teknologi yang sering digunakan adalah *Inverted Pendulum* atau Pendulum Terbalik. Pendulum Terbalik merupakan suatu sistem yang bekerja untuk mengendalikan keseimbangan suatu alat dengan titik massa berada diatas titik poros. Salah satu contoh dari pengaplikasian teknik Pendulum Terbalik terdapat pada *Segway* [1], *Drone* [2], *Balancing Robot* [3] dan Roket [4].

*Inverted Pendulum* merupakan sistem yang sulit dikendalikan. Hal ini dikarenakan sifatnya yang tidak menentu, non-linear dan memiliki banyak variable, sehingga menjadi salah satu tantangan dalam proses pengendalian. Terdapat bermacam sistem kendali pada *Inverted Pendulum*, diantaranya adalah menggunakan *Fuzzy Logic Controller*, *LQR* (*Linear Quadratic Regulator*), *Neural Network* dan *PID* (*Proportional – Integral – Derivative*). Pada [5], digunakan metode *Fuzzy Logic Controller* untuk menguji kemampuan *Inverted Pendulum* dalam mengatasi gangguan (*noise*). Pada [6], *Fuzzy Logic Controller* digunakan untuk mengurangi pemodelan matematis rumit dengan tujuan menghindar error dari pemodelan. Digunakan *Wheeled Inverted Pendulum* (WIP) yang tidak menggunakan model matematis yakni [7] dengan metode *Adaptive Neural Network* dan kompensator, dimana kompensator tersebut bersifat dinamis linear untuk mencapai

kestabilan dan pelacakan posisi WIP. Penelitian-penelitian tersebut kebanyakan tidak menggunakan suatu pemodelan matematis dalam perancangan sistem kendali Pendulum Terbalik karena beberapa parameter sulit untuk didapatkan dan pada penelitian lainnya, ada juga peneliti yang membandingkan PID dengan *Neural Network Fractional PID* dimana nilai bobot K<sub>p</sub>, K<sub>i</sub> dan K<sub>d</sub> ditentukan berdasarkan *Neural Network*. PID sering digunakan pada *Inverted Pendulum*, perlu dilakukan analisa menggunakan *Root Locus* pada [8] untuk *Reaction Wheel Inverted Pendulum*. Dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols, dibuktikan bahwa beban nilai K<sub>p</sub> tidak dapat berdiri sendiri dan membutuhkan K<sub>i</sub> dan atau K<sub>d</sub> untuk dapat menyeimbangkan *Inverted Pendulum*.

Penelitian lain juga menggunakan gabungan dua metode seperti *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dengan *Proportional – Integral – Derivative* (PID) pada [9] dengan tujuan untuk membandingkan kedua metode tersebut. LQR lebih baik digunakan untuk pengendalian posisi linear sementara PID lebih baik digunakan untuk menentukan momentum sudut dari *Inverted Pendulum* tersebut. Penelitian lain menggabungkan dua metode yaitu PID dengan PID atau PI dan membandingkannya dengan LQR [10].

Oleh karena itu, Penulis tertarik untuk membandingkan kedua kendali, PID dan PI, yang digunakan di sistem *Inverted Pendulum*, sehingga Penulis memiliki topik “PERBANDINGAN SISTEM KENDALI INVERTED PENDULUM MENGGUNAKAN PROPORTIONAL – INTEGRAL – DERIVATIVE (PID) DAN PROPORTIONAL – INTEGRAL (PI)”.

## 1.2. Perumusan Masalah

*Inverted Pendulum* bersifat non-linear, memiliki banyak variabel, tidak menentu dan memiliki konfigurasi yang kurang teratur (jumlah input kendali lebih sedikit dibandingkan jumlah *degree of freedom* yang dapat dikendalikan). Terdapat berbagai cara untuk menyelesaikan permasalahan ini, diantaranya adalah penelitian [1] yang menggunakan perhitungan tunggal dengan berbagai macam perubahan sudut pendulum yang dinamakan “*Single Control Law*”. *Single Control Law* digunakan untuk menghasilkan gaya pada troli menggunakan kecepatan troli, posisi dan kecepatan pendulum serta menggunakan satu

parameter yaitu  $k$  yang merupakan rasio massa troli dengan pendulum. Hukum pengendali yang diberikan berhasil mengendalikan sistem pendulum terbalik dengan massa pendulum yang lebih kecil daripada massa troli. Penelitian lain yang memberikan solusi menggunakan sistem kendali PID seperti penelitian [8] dengan nilai gain PID yang didapatkan menggunakan metode Ziegler-Nichols. Tidak terdapat perhitungan matematis untuk menentukan komponen mana yang harus ditingkatkan agar sistem dapat bekerja dengan baik. Namun hasil yang didapatkan dari metode tersebut memiliki *settling time* yang cepat dengan sedikit osilasi. Pada penelitian [9], PI digunakan sebagai pembanding pertama karena kemampuannya untuk menstabilkan sistem, meningkatkan *transient response* (respon peralihan), menghilangkan osilasi dan mengurangi *steady state error*. Sementara pada [10], PI digabungkan dengan PID menggunakan metode *pole placement* untuk mendapatkan nilai gain PID. Metode ini menghasilkan sistem dengan minim osilasi namun memiliki *overshoot* dan *undershoot* yang besar. Ditunjukkan juga bahwa sistem kendali PI dengan PID dapat mengatasi gangguan (*noise*) lebih baik dibandingkan sistem kendali PID dengan PID walaupun tidak berakhir stabil dan masih berosilasi. Hal ini dijadikan pertimbangan untuk menentukan metode mana yang lebih baik untuk mengendalikan *Inverted Pendulum*.

### 1.3. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian yang akan dibahas pada pembuatan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Alat merupakan hasil Tugas Akhir pada tahun 1996
2. Alat yang bersangkutan merupakan pendulum yang terikat dengan troli pada rel tali konveyor dan dikendalikan menggunakan motor DC, enkoder dan *limit switch*.
3. Memperbaharui sistem kendali lama yang terdapat pada alat yang bersangkutan
4. Menggunakan motor DC, enkoder dan *limit switch* yang terdapat pada alat
5. Sistem kendali yang diperbaharui menggunakan Arduino Uno, *Motor Driver* L298N dan baterai aki Panasonic 12 V.
6. Alat yang bersangkutan memulai kerja dengan posisi titik massa berada dibawah titik poros dan dapat mencapai titik keseimbangan dengan titik massa berada diatas titik poros.

7. Menggunakan PID dan PI untuk mengendalikan motor DC
8. Perhitungan PID akan dibantu menggunakan MATLAB 2016b
9. Validasi hasil kerja PID dan PI terhadap Pendulum Terbalik dengan waktu mencapai titik keseimbangan.

#### **1.4. Tujuan Penelitian**

Berdasarkan rumusan masalah diatas, tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk membandingkan hasil kerja *Proportional – Integral – Derivative* (PID) dengan *Proportional – Integral* (PI) sebagai sistem pengendali Pendulum Terbalik.

#### **1.5. Keaslian Penelitian**

Penelitian ini berpacu pada beberapa referensi, diantaranya adalah terdapat penelitian [1] yang menggunakan *Single Control Law* atau hukum control tunggal. *Single Control Law* menggunakan persamaan tunggal yang dapat mengatasi pengendalian yang bergantung pada perubahan sudut pendulum, metode ini diterapkan pada pendulum yang terikat dengan troli yang bergerak secara horizontal. Hal ini dilakukan agar pendulum dapat mencapai posisi tegak dengan posisi troli sama seperti saat awal bergerak. Hukum kendali yang diberikan didapatkan dari penurunan perhitungan pemodelan matematis pendulum terbalik yang diajukan, persamaan yang didapatkan menggunakan rasio massa troli dengan massa pendulum sebagai satu-satunya parameter fisik yang terdapat pada persamaan troli yang diberikan. Hasil yang diberikan menandakan bahwa sistem dapat bekerja dengan baik jika pendulum ringan dan troli yang berat.

Penelitian lain yang mengajukan pengaplikasian sistem terhadap sebuah alat terdapat pada penelitian [8], *Inverted Pendulum* terbuat dari sebuah batang pendulum yang digerakkan menggunakan dua roda yang berarah vertikal dan horizontal, roda tersebut dinamakan *Reaction Wheel*. PID diaplikasikan pada alat untuk mengendalikan sudut dari pendulum agar pendulum tetap tegak (posisi vertikal), pengaturan

menggunakan metode Ziegler-Nichols dikarenakan metode ini tidak memerlukan sebuah model matematis dari pendulum. Hasil yang ditampilkan menunjukkan bahwa sistem bekerja dengan baik dan dapat mengatasi perubahan sudut pendulum yang berubah-ubah secara konstan menggunakan aplikasi MATLAB, namun hasil yang diberikan tidak menunjukkan secara langsung hasil dan pergerakan dari *reaction wheel* dan pendulum untuk mencapai titik keseimbangan.

Penelitian yang mengaplikasikan teori dari *Inverted Pendulum* dan sistem kendali diantaranya adalah [10]. Penelitian tersebut menggunakan sebuah pendulum dengan troli pada rel dan PID dengan PI untuk mengendalikan posisi perpindahan dan sudut pendulum. Hasil dari simulasi menunjukkan bahwa dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk mengendalikan pendulum dan mencapai kondisi seimbang (posisi pendulum vertikal) menggunakan dua metode pengendalian dan sangat rentan terhadap gangguan (*noise*).

Selain penelitian tersebut, referensi lain yang menggunakan sistem kendali ialah [11]. Penelitian tersebut menggunakan PID, *Fractional PID* dan *Neural Network Fractional PID*. Tujuan dari penelitian tersebut ialah untuk membandingkan dan menentukan metode mana yang paling baik berdasarkan hasil *overshoot*, *settling time* dan waktu naik (*rise time*). *Neural Network Fractional PID* dibuktikan mampu menstabilkan sistem *Inverted Pendulum* dengan waktu yang singkat.

Penelitian [12] menganalisa kestabilan sistem *Inverted Pendulum* dengan model matematis yang tidak stabil, permasalahan ini membuat penulis dari penelitian tersebut untuk menambahkan kompensator, integrator dan *positive feedback* pada sistem *Inverted Pendulum* dan menghandalkan penyimpangan pergerakan motor hasil perubahan model matematis sistem untuk menyeimbangkan pendulum. Hal ini dikarenakan penulis dari peneliti tidak menggunakan sebuah sistem kendali seperti PID atau *Neural Network* untuk mempermudah pengendalian motor.

## **1.6. Sistematika Penulisan**

Sistematika Penulisan akhir ini adalah sebagai berikut:

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini membahas mengenai latar belakang penelitian tugas akhir, tujuan dari penelitian, perumusan masalah peneltian, ruang lingkup penelitian dan sistematika penulisan tugas akhir.

### **BAB II TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini membahas tentang teori yang berkaitan dengan cara kerja *Inverted Pendulum*, menjelaskan teori dari metode *Proportional – Integral – Derivative* (PID), menjelaskan pengaplikasian metode PID terhadap *Inverted Pendulum* dengan mengkaji referensi penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

Bab ini merupakan penjelasan dari perancangan sistem pengendali dalam diagram blok dan *flowchart*. Terdapat dua macam perancangan yaitu perancangan perangkat keras sistem pengendali yang terdiri dari penjelasan kebutuhan dan langkah pembuatan perangkat keras dan dilanjutkan dengan perancangan program sistem pengendali yang terdiri dari program Arduino, program PID dan PI yang digunakan pada Arduino, data-data yang dibutuhkan dan prosedur pengambilan data yang dibutuhkan.

### **BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menampilkan dan mengkaji hasil kerja *Inverted Pendulum* sebelum dan sesudah menggunakan PID dan PI, data yang didapatkan dari metode PID dan PI serta membandingkan hasil yang didapatkan dari metode PID dan PI dengan melihat kelebihan dan kekurangan dari kedua metode terhadap *Inverted Pendulum*.

## **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada bab ini akan berisi kesimpulan dari seluruh pembahasan sebelumnya dan pendapat Penulis berdasarkan hasil penelitian sebagai saran guna penelitian kedepannya.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Özbey, E. Uzal, and H. Yildiz, "Nonlinear Control of an Inverted Pendulum on a Cart by a Single Control Law," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, pp. 279-284.
- [2] D. S. Maughan, I. T. Erikson, and R. Sharma, "Flying Inverted Pendulum Trajectory Control on Robust Intelligent Sensing and Control Multi-Agent Analysis Platform," in *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 1279-1284.
- [3] H. Lee and S. Jung, "Balancing and navigation control of a mobile inverted pendulum robot using sensor fusion of low cost sensors," *Mechatronics*, vol. 22, pp. 95-105, 2012.
- [4] F. J. Gomez and R. Miikkulainen, "Active guidance for a finless rocket using neuroevolution," in *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2003, pp. 2084-2095.
- [5] H. A. Suthar and K. B. Pandya, "Designing Fuzzy Logic Controller for Inverted Pendulum," in *IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations*, 2005, pp. 61-68.
- [6] Z. Li and C. Xu, "Adaptive fuzzy logic control of dynamic balance and motion for wheeled inverted pendulums," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 160, pp. 1787-1803, 2009.
- [7] Z. Li and C. Yang, "Neural-adaptive output feedback control of a class of transportation vehicles based on wheeled inverted pendulum models," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 20, pp. 1583-1591, 2012.

- [8] Y. Y. Lim, C. L. Hoo, and Y. M. F. Wong, "Stabilising an Inverted Pendulum with PID Controller," in *MATEC Web of Conferences*, 2018, p. 02009.
- [9] A. Nasir, M. Ahmad, and R. R. Ismail, "The control of a highly nonlinear two-wheels balancing robot: A comparative assessment between LQR and PID-PID control schemes," *World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 70, pp. 227-232, 2010.
- [10] S. Chakraborty, "An experimental study for stabilization of inverted pendulum," 2014.
- [11] Q. Wang and Z. Shen, "Control Comparison of Inverted Pendulum System Based on PID," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, p. 052065.
- [12] K. Lundberg, "The Inverted Pendulum System," 2002.
- [13] K. Ogata. *Modern Control Engineering, 5<sup>th</sup> Edition*: Pearson Prentice Hall New Jersey, 2010.
- [14] N. S. Nise. *Control System Engineering, 6<sup>th</sup> Edition*: John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- [15] Dorf R.C., Bishop R.H. *Modern control systems*: Addison-Wesley, 1998.
- [16] W. S. M. Sanjaya. *Panduan Praktis Membuat Robot Cerdas Menggunakan Arduino dan MATLAB*: Penerbit ANDI, 2016.
- [17] F. Saftari. *Proyek Robotik Keren dengan Arduino*: Gramedia, 2015.
- [18] H. Andrianto. *Mikrokontroler AVR ATmega16*: Informatika Bandung, 2015.
- [19] K.J. Åström, T. Hägglund. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2<sup>nd</sup> Edition*: Instrument Society of America Research Triangle Park, NC, 1995.

- [20] K. Ogata. *Modern Control Engineering, Eastern Economy Edition*: Prentice-Hall International, Inc, 1970.