



Buku Tugas Akhir

Perancangan dan Pengontrolan Sistem Pendulum Terbalik dengan Metoda Berbasis Energi

Jonathan Chandra
2015630028

Pembimbing:
Dr. Ir. Ali Sadiyoko, M.T.
Tua Agustinus Tamba, Ph.D.

Diajukan untuk memenuhi salah
satu syarat mendapatkan gelar
Sarjana Teknik

Agustus 2020

Perancangan dan Pengontrolan Sistem Pendulum Terbalik dengan Metoda Berbasis Energi

Jonathan CHANDRA
2015630028

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

Panitia Penguji :

Dr. Ir. Ali Sadiyoko, M.T., Pembimbing 1

Tua Agustinus Tamba, Ph.D., Pembimbing 2

Dr. Ir. Bagus M. Arthaya, M.Eng., Penguji 1

Faisal Wahab, S.Pd., M.T., Penguji 2

© 2020, Program Studi Sarjana Teknik Elektro (Konsentrasi Mekanika)– 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 Mekanika), 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 dan Pengontrolan Sistem Pendulum Terbalik dengan Metoda Berbasis Energi

oleh:

Jonathan Chandra

NPM : 2015630028

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, Agustus 2020

Ketua Program Studi Sarjana

Teknik Elektro Konsentrasi Mekatronika

Dr. Ir. Ali Sadiyoko, M.T.

Pembimbing Pertama,

Pembimbing Kedua,

Dr. Ir. Ali Sadiyoko, M.T.

Tua Augustinus Tamba, Ph.D.

PERNYATAAN TIDAK MENCONTEK ATAU MELAKUKAN TINDAKAN PLAGIAT

Saya yang bertandatangan dibawah ini,

JONATHAN CHANDRA

Dengan ini menyatakan bahwa Buku Tugas Akhir dengan judul:

**"PERANCANGAN DAN PENGONTROLAN SISTEM PENDULUM
TERBALIK DENGAN METODA BERBASIS ENERGI"**

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, 28 Agustus 2020

Jonathan Chandra

NPM: 2015630028

Lembar Persembahan

Tugas Akhir ini dipersembahkan untuk
orang tua, keluarga, guru, sahabat,
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

Sistem pendulum terbalik (SPT) adalah salah satu sistem yang sering digunakan untuk mendemonstrasikan permasalahan terkait perancangan sistem kontrol yang mencakup penentuan model dinamik dan implementasi metode kontrol untuk mendapatkan respons sistem yang sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Model matematika dari SPT diperoleh berdasarkan analisis mekanika *Euler-Lagrange* yang meninjau energi kinetik dan potensial dari sistem, sedangkan metode kontrol yang digunakan ditentukan berdasarkan analisis gradien energi total sistem dengan pendekatan berbasis analisis kestabilan Lyapunov. Algoritma kontrol yang diperoleh kemudian diimplementasikan pada model matematika SPT untuk menjaga posisi pendulum pada posisi tegak lurus terhadap arah gerak horizontal dari kereta.

Berdasarkan hasil respons dari SPT yang diperoleh dengan metode kontrol berbasis energi, dibutuhkan metode kontrol nonlinear untuk mengayun pendulum ke posisi vertikal tegak lurus keatas, serta metoda kontrol linear yang ditujukan untuk melakukan stabilisasi batang pendulum pada posisi tegak lurus terhadap arah gerak horizontal. Metode kontrol nonlinear yang digunakan adalah berbasis analisis kestabilan Lyapunov, sedangkan metode kontrol linear yang digunakan adalah metode LQR dengan meninjau model linearisasi dari SPT. Dokumen Tugas Akhir ini berfokus pada pengontrolan posisi kereta dan simpangan sudut batang pendulum SPT yang bertujuan untuk membawa batang pendulum pada $\theta = 0 \text{ rad}$. Purwarupa dari SPT dibuat sesuai dengan spesifikasi yang telah disimulasikan dan dapat membawa serta melakukan stabilisasi batang pendulum pada $\theta = 0 \text{ rad}$.

Abstract

The inverted pendulum system (IPS) is one of the many systems that is often used to demonstrate the problems in control system design relating to the modeling and control synthesis procedures to acquire the desired system performance. This document first develops the IPS' dynamic model using Euler-Lagrange method and then derives a nonlinear swing up control law based on Lyapunov's stability analysis. The control law is then applied into the dynamic model of the IPS to show its capability to bring the IPS to the neighborhood of the unstable equilibrium point.

Based on the observed system responses under the proposed nonlinear control law, it was suggested that an additional linear stabilizing control law is needed to maintain the pendulum rod at its vertical unstable equilibrium point. For this purpose, a linear quadratic regulator is used. This document is focused on controlling the IPS states with the intention to bring and stabilize the pendulum rod on its unstable equilibrium point. The IPS prototype was made with the given specification, and the control laws that were implemented into the prototype were able to stabilize the pendulum rod on its unstable equilibrium point.

Kata Pengantar

Puji dan syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan rahmat-Nya, Buku Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Buku Tugas Akhir yang berjudul "Perancangan dan Pengontrolan Sistem Pendulum Terbalik dengan Metoda Berbasis Energi" disusun untuk memenuhi salah satu syarat mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Sarjana Teknik Elektro (Konsentrasi Mekatronika) Universitas Katolik Parahyangan. Disadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, penulisan Buku Tugas Akhir ini tidak akan terselesaikan. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ali Sadiyoko, M.T. dan Tua Agustinus Tamba, Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah membantu menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir;
2. Bapak dan Ibu Chandra selaku orang tua yang telah memberikan bantuan secara materil dan moral serta dukungan terus menerus;
3. Kepada seluruh dosen serta tata usaha Teknik Elektro (Konsentrasi Mekatronika) Universitas Katolik Parahyangan yang telah membantu serta memberikan dukungan;
4. Idham Hanif Ayega, Lisuarung Satria Ekapaksi Pasande, dan Kevin Sagita yang telah memberikan dorongan serta hasil diskusi yang bermanfaat saat penyusunan Laporan Tugas Akhir ini,
5. Serta rekan-rekan yang mengambil mata kuliah Tugas Akhir II yang telah membantu dan menuangkan ide untuk pembuatan Laporan Tugas Akhir.

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	xvii
Daftar Gambar	xix
Daftar Simbol dan Variabel	xxi
Daftar Singkatan	xxiii
1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah.	3
1.3 Batasan Masalah dan Asumsi	3
1.4 Tujuan Tugas Akhir	4
1.5 Manfaat Tugas Akhir	4
1.6 Metodologi Tugas Akhir	4
1.7 Sistematika Penulisan	6
2 TEORI DASAR	7
2.1 Sistem Pendulum Terbalik	7
2.2 Mekanika <i>Euler-Lagrange</i>	8

2.3	Gaya Gesek	9
2.4	Energi Total Sistem	10
2.5	Analisis Kestabilan Lyapunov	10
2.6	Orbit Homoklinik	11
2.7	<i>Linear Quadratic Regulator</i>	12
3	PERANCANGAN SISTEM PENDULUM TERBALIK	15
3.1	Model Matematika Sistem Pendulum Terbalik	15
3.1.1	Model Linear SPT	19
3.1.2	Model Persamaan Ruang Keadaan	20
3.2	Simulasi Dinamika SPT	21
3.3	Perancangan Kontrol	23
3.3.1	Kestabilan Lyapunov	24
3.3.2	Perumusan Kontrol	25
3.3.3	Kontrol Linear SPT	27
3.4	Desain Sistem	29
3.4.1	Desain Perangkat Keras SPT	29
3.4.2	Desain Perangkat Lunak SPT	36
4	ANALISIS SISTEM	42
4.1	Hasil Rancang Bangun SPT	42
4.2	Data Hasil Pengujian	45
4.2.1	Pulsa Keluaran Sensor <i>Rotary Encoder</i>	45
4.2.2	Pulsa Sensor <i>Rotary Encoder 2</i>	45
4.3	Implementasi Sinyal Kontrol pada Purwarupa SPT	47
4.3.1	Pengujian Implementasi Kontrol Berbasis Energi	47
4.3.2	Pengujian Implementasi Kontrol Linear LQR	49
4.3.3	Pengujian Implementasi Kontrol Berbasis Energi dan Kontrol Linear	52
5	KESIMPULAN DAN SARAN	54
5.1	Kesimpulan	54
5.2	Saran	55
	Daftar Pustaka	57
	Lampiran A Kode Program	61
	Lampiran B Gambar Teknik Komponen	82
	Lampiran C Hasil Pengukuran	92

Daftar Tabel

3.1	Parameter mekanik SPT	22
3.2	Rincian biaya perancangan purwarupa sistem pendulum terbalik	36
C.1	Hasil pengukuran ω motor DC	93
C.2	Hasil pengukuran τ motor DC	95
C.3	Hasil pengukuran perangkat keras SPT	96

Daftar Gambar

1.1	Ilustrasi SPT linear	2
1.2	Metodologi Penelitian SPT	5
2.1	SPT rotari	7
2.2	SPT linear	7
2.3	<i>limit cycle</i> stabil	11
2.4	<i>limit cycle</i> tidak stabil	11
3.1	Ilustrasi model mekanika SPT	16
3.2	Komponen X dan Y dari pendulum	17
3.3	Simulasi SPT dengan input bernilai $u= 1N$	22
3.4	Ilustrasi SPT dengan input bernilai $u= 1N$	23
3.5	Simulasi SPT dengan input dengan kontrol (3.45).	27
3.6	Simulasi SPT dengan input kontrol (3.45) dan kontrol linear (3.54).	28
3.7	Desain kereta SPT dengan komponennya.	30
3.8	Desain jalur kereta SPT.	31
3.9	Desain SPT dengan komponennya.	31
3.10	Tampak depan desain SPT.	32
3.11	Tampak atas desain SPT.	32
3.12	Alur data perangkat keras SPT	34
3.13	Skematik rangkaian elektrik SPT	35
3.14	Desain tampilan plot grafik variabel SPT	37
3.15	Diagram Alir SPT	40
3.16	Diagram Alir SPT	41
4.1	Hasil Rancang Bangun SPT	43
4.2	Hasil rancang bangun SPT	43
4.3	Hasil rancang Bangun SPT	44
4.4	Hasil rangkaian elektrik rancang bangun SPT	44
4.5	Grafik posisi kereta terhadap waktu	46
4.6	Grafik sudut batang pendulum terhadap waktu	46

4.7	Hasil simulasi kontrol berbasis energi (pengujian pertama) . . .	47
4.8	Hasil implementasi kontrol berbasis energi (pengujian kedua) .	48
4.9	Hasil implementasi kontrol berbasis energi (pengujian ketiga) .	49
4.10	Grafik sudut terhadap waktu dengan implementasi kontrol linear	50
4.11	Grafik sudut terhadap waktu dengan implementasi kontrol linear(Pengujian 2)	51
4.12	Grafik sudut terhadap waktu dengan implementasi kontrol linear(Pengujian 2)	51
4.13	Grafik hasil pengukuran variabel keadaan SPT dengan implementasi kontrol non-linear dan linear.	52
4.14	Grafik Energi SPT	52
4.15	Grafik sudut terhadap waktu dengan implementasi kontrol non-linear dan linear.	53
B.1	Komponen <i>Mounting Rotary Encoder</i>	83
B.2	Alas Kereta SPT.	84
B.3	Komponen <i>mounting</i> poros putar pendulum	85
B.4	Komponen <i>bearing</i> untuk menahan poros putar pendulum . . .	86
B.5	Batang pendulum SPT	87
B.6	<i>Mounting</i> jalur kereta SPT	88
B.7	<i>Linear slider SCS10uu</i>	89
B.8	Hasil <i>assembly</i> kereta SPT dengan batang pendulum	90
C.1	Ilustrasi pengukuran torsi motor DC	94
C.2	Ilustrasi pengujian gaya gesek	97
C.3	Hasil pengukuran sudut batang pendulum guna pengujian gaya gesek	98
C.4	Batas eksponensial pada pergerakan batang pendulum	99

Daftar Simbol dan Variabel

\mathcal{L}	<i>Lagrangian</i>
x	Posisi kereta
θ	Sudut simpangan batang
F_M	Gaya yang disebabkan oleh motor
F_f	Gaya gesek
L	Panjang batang pendulum SPT
l	Setengah panjang batang pendulum SPT
\mathcal{L}	<i>lagrangian</i>
E_K	Energi kinetik
E_P	Energi potensial
m_b	Massa benda
v	Kecepatan benda
g	gravitasi
h	Tinggi benda dari Sumbu horizontal sistem
$\frac{d}{dt}$	Turunan terhadap waktu
q	Koordinat umum
\dot{q}	Turunan pertama koordinat umum terhadap waktu
\ddot{q}	Turunan kedua koordinat umum terhadap waktu
F	Gaya eksternal yang diberikan pada sistem
F_{ges}	Gaya gesek pada sistem
F_1	Gaya eksternal yang diberikan pada Kereta
F_2	Gaya eksternal yang diberikan pada Batang Pendulum
F_c	Gaya Gesek coulomb
F_v	Gaya Gesek viskos
F_N	Gaya normal
$M(q)$	Matriks inersial sistem
$C(q, \dot{q})$	Matriks koriolis sistem
D	Matriks gangguan
$G(q)$	Matriks gravitasi
$f_1(q, \dot{q})$	Matriks sistem
$f_2(q)$	Matriks kontrol
γ	Koefisien gesek viskos
$E(q, \dot{q})$	Matriks energi total sistem
V	Fungsi Lyapunov
\dot{V}	Turunan pertama fungsi Lyapunov
x_{pend}	komponen x batang SPT
y_{pend}	komponen y batang SPT
\dot{x}_{pend}	Turunan pertama x_{pend} terhadap waktu

\dot{y}_{pend}	Turunan pertama y_{pend} terhadap waktu
E_K^{Kereta}	Energi kinetik kereta SPT
E_K^{pend}	Energi kinetik batang pendulum SPT
E_P^{pend}	Energi potensial batang pendulum SPT
E_P^{Kereta}	Energi potensial kereta SPT
E_K^{Total}	Energi kinetik total SPT
E_P^{Total}	Energi potensial total SPT
M	Massa kereta SPT
\bar{M}	Massa Kereta SPT rata-rata
m	Massa batang pendulum SPT
\bar{m}	Massa batang pendulum SPT rata-rata
u	Sinyal kontrol sistem
$\dot{M}(q)$	Turunan pertama $M(q)$ terhadap waktu
N	Newton
kg	Kilogram
m	meter
\dot{E}	Laju perubahan energi
K_E	konstanta Energi
K_v	konstant Kecepatan
K_x	konstanta posisi
R	Resistansi elektrik
\bar{R}	Resistansi elektrik rata-rata
Ω	ohm
ω	kecepatan sudut
V	Tegangan elektrik
V	Satuan tegangan elektrik (volt)
$\frac{K_e}{K_e}$	Konstanta tegangan EMF motor DC
$\frac{K_e}{K_e}$	Konstanta tegangan EMF motor DC rata-rata
$\frac{K_t}{K_t}$	Konstanta torsi motor DC
$\frac{K_t}{K_t}$	Konstanta torsi motor DC rata-rata
τ	Torsi
Q	Matriks pemberat variabel ruang keadaan
R	Matriks pemberat input sistem
A	Matriks variabel ruang keadaan sistem
B	Matriks masukan sistem
C	Matriks keluaran sistem
J	Indeks performansi kuadratik
P	Matriks penyelesaian ARE
ω_n	Frekuensi natural
ω_d	Frekuensi natural teredam
ζ	Rasio redaman sistem

Daftar Singkatan

FTI	Fakultas Teknologi Industri
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
KBBI	Kamus Besar Bahasa Indonesia
LQR	<i>Linear Quadratic Regulator</i>
SPT	<i>Sistem Pendulum Terbalik</i>
PID	<i>Proporsional Integral Derivatif</i>
EOM	<i>Equation of Motion</i>
PPR	<i>Pulse Per Revolution</i>
RPM	<i>Revolution Per Minute</i>
UNPAR	Universitas Katolik Parahyangan

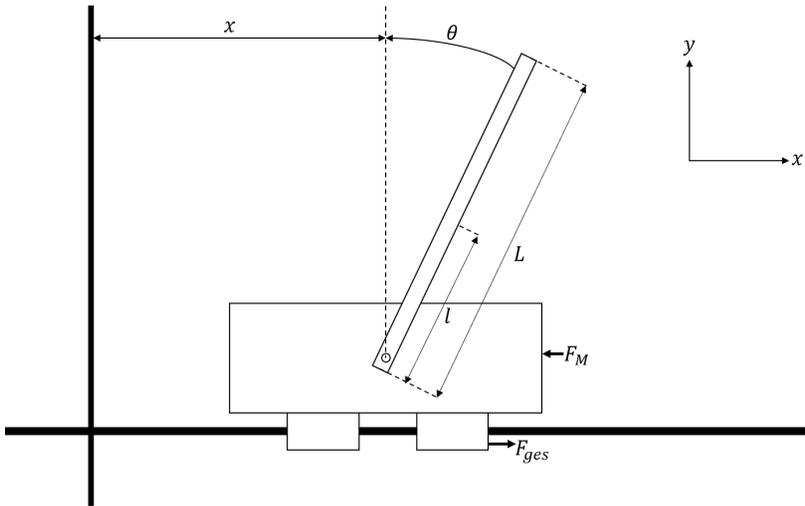
Bab 1

PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang masalah dalam penelitian sistem pendulum terbalik (SPT) dalam hal penentuan model matematika serta implementasi kontrol. Bab 1 juga berisi identifikasi dan permasalahan dengan batasan dan asumsi yang digunakan pada penelitian SPT. Tujuan, manfaat, metodologi serta sistematika penulisan Buku Tugas Akhir juga dipaparkan pada bab ini.

1.1 Latar Belakang Masalah

SPT adalah salah satu sistem yang sering digunakan untuk mendemonstrasikan model dinamika sistem dan implementasi sistem kontrol [1]. Secara umum, permasalahan perancangan sistem kontrol mencakup penentuan model dinamika dari sistem yang ditinjau untuk kemudian digunakan sebagai basis penerapan metode kontrol dengan tujuan mendapatkan respons sistem sesuai dengan spesifikasi yang diinginkan. Pengontrolan SPT sering digunakan sebagai salah satu tolak ukur pada penerapan teori kontrol. Tolak ukur dari teori kontrol yang dimaksud adalah (i) penggunaan model matematika yang telah ditentukan dan (ii) validasi terhadap efisiensi serta performansi dari metode kontrol yang telah diimplementasikan pada sistem yang ditinjau [2]. Stabilisasi batang pendulum pada posisi vertikal dan tegak lurus terhadap bidang horizontal merupakan salah satu permasalahan yang dapat dijadikan tolak ukur dan penilaian keberhasilan penerapan teori kontrol [3].



Gambar 1.1. Ilustrasi SPT linear

Konfigurasi umum dari SPT terdiri dari sebuah batang pendulum dengan panjang L yang dapat berotasi pada sumbu putarnya dan diletakkan pada sebuah kereta seperti pada Gambar 1.1. Untuk mengayunkan batang pendulum tersebut, sebuah motor listrik akan menggerakkan sabuk (*belt*) yang terhubung dengan kereta sehingga kereta dapat bergerak pada sumbu horizontal [4].

Hingga saat ini, terdapat beberapa pengaplikasian SPT pada instrumen maupun alat yang digunakan dalam kehidupan nyata diantaranya adalah, *two-wheeled self-balancing robot* yang digunakan sebagai moda transportasi manusia dan kontrol keseimbangan badan roket pada mesin pendorong saat roket hendak lepas landas maupun mendarat [5–7]. Terlepas dari beberapa pengaplikasian SPT, teori kontrol dan implementasinya pada sistem robotika khususnya SPT relatif sulit untuk dipahami [8]. Akademisi serta peneliti yang berminat dalam mendalami teori kontrol dan implementasinya pada sistem robotika memerlukan sebuah purwarupa untuk memverifikasi dan membandingkan teori yang dipelajari dengan masalah yang dihadapi pada kehidupan nyata [9, 10].

Pada berbagai literatur terdapat beberapa metode kontrol yang telah diimplementasikan pada SPT. Beberapa literatur yang telah ditelaah telah mengimplementasi beberapa metode kontrol, metode kontrol yang dipakai antara lain adalah (i) LQR (*Linear Quadratic Regulator*), (ii) PID (*Proportional Derivative Integrative*), (iii) logika fuzzy, dan (iv) *energy based control*. Kontrol LQR dan kontrol PID yang diajukan oleh Prasad [11] dan Nasir [12] memperlihatkan implementasi kedua kontrol tersebut dengan model linearisasi

dari SPT. Secara khusus, simulasi yang dilakukan memperlihatkan bahwa hasil pengontrol dengan kedua metoda tidak menghasilkan kesalahan tunak (*steady state error*), dimana metode kontrol LQR menghasilkan respons dan *settling time* yang lebih cepat dibandingkan hasil yang diperoleh dengan menggunakan metode kontrol PID. Metode logika fuzzy yang diajukan oleh Yamakawa dan Takeshi [13] memperlihatkan kontrol SPT dengan memperkenalkan 15 rangkaian logika yang digunakan sebagai aturan kontrol dan memastikan batang pendulum berada pada posisi tegak lurus terhadap bidang horizontal. Fantoni [14] mengajukan pendekatan dimana total energi dari sistem untuk mengayunkan batang dari SPT dengan analisis kestabilan Lyapunov sebagai basis metode kontrol. Dengan meninjau literatur terkait, empat metode tersebut memiliki masalah yang selalu muncul saat meninjau SPT, yaitu metode kontrol untuk membawa batang pendulum terbalik dari $\theta = 180^\circ$ ke $\theta = 0^\circ$.

1.2 Identifikasi dan Perumusan Masalah.

Berdasarkan uraian latar belakang masalah pada subbab 1.1, dapat diidentifikasi masalah pada rancang bangun SPT terdiri dari penentuan model matematika SPT, pengontrolan pendulum pada posisi vertikal dengan simpangan awal yang besar ($\theta = 180^\circ$ atau 3.14 rad) dan implementasi nyata metode kontrol pada SPT. Dari identifikasi masalah yang telah diuraikan, perumusan masalah dalam penelitian SPT pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana cara memperoleh model matematika dari SPT?
2. Bagaimana cara mengontrol SPT agar batang pendulum dapat dibawa menuju posisi vertikal tegak lurus keatas dengan simpangan awal maksimal dari SPT yaitu $\theta = 3.14 \text{ rad}$ (posisi tegak lurus kebawah)?
3. Bagaimana cara mengontrol SPT agar batang pendulum dapat stabil dengan posisi vertikal tegak lurus keatas, yaitu $\theta = 0 \text{ rad}$?
4. Apa saja komponen yang diperlukan untuk membuat SPT?

1.3 Batasan Masalah dan Asumsi

Beberapa asumsi dan batasan-batasan yang digunakan pada Tugas Akhir ini antara lain:

1. Model dari SPT yang ditinjau memperhitungkan nonlinearitas sistem, khususnya gaya gesek dari batang pendulum.
2. Model SPT akan disimulasikan dan dibuat purwarupa dengan satu buah batang yang juga merupakan massa yang ditinjau.
3. Sistem kontrol nonlinear akan dirancang menggunakan metoda Lyapunov dengan berbasis pada gradien energi sistem.

4. Sistem kontrol linear akan dirancang dengan metoda LQR berdasarkan model linearisasi SPT.

SPT diasumsikan diletakkan pada bidang yang datar serta tidak memiliki gangguan eksternal.

1.4 Tujuan Tugas Akhir

Tujuan penulisan Tugas Akhir ini adalah:

1. Penentuan model matematika, implementasi metode kontrol, dan merancang purwarupa dari SPT. Secara khusus, implementasi metode kontrol ditujukan untuk menjamin SPT dapat mencapai dan melakukan stabilisasi posisi dari batang yang diinginkan (vertikal tegak lurus terhadap bidang horizontal).
2. Merancang purwarupa dari SPT.

1.5 Manfaat Tugas Akhir

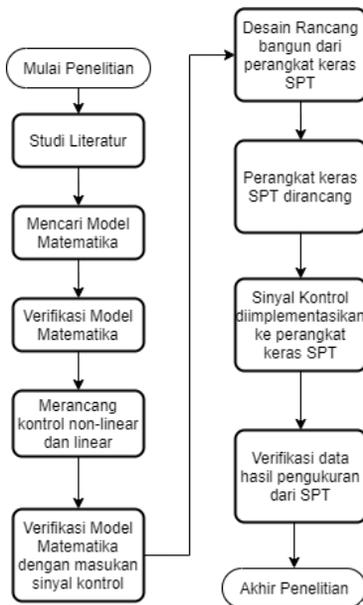
Beberapa manfaat dari penelitian sistem pendulum terbalik, antara lain:

1. Studi dan implementasi pemodelan sistem nonlinear dengan menggunakan metode mekanika *Euler-Lagrange* dan penerapan teori kontrol pada sistem yang ditinjau.
2. Pengembangan alat peraga skala laboratorium untuk ilustrasi pembelajaran serta implementasi teori kontrol pada sebuah sistem.

1.6 Metodologi Tugas Akhir

Metodologi yang dilakukan pada penelitian ini adalah metode eksperimen yang terlebih dahulu diawali dengan studi literatur. Penulis mempelajari topik penelitian tentang cara memodelkan SPT dengan mekanika *Euler-Lagrange*, metode kontrol yang dapat digunakan pada SPT. Dengan menggunakan informasi melalui studi literatur, komponen-komponen penyusun SPT yang terdiri dari sensor, aktuator, dan pengontrol dapat ditentukan. Langkah tersebut kemudian dilanjutkan dengan penurunan model dari SPT menggunakan mekanika *Euler-Lagrange* yang kemudian disimulasikan menggunakan MATLAB untuk memperoleh respons dari model yang telah diturunkan. Perancangan algoritma kontrol dilakukan dengan dua tahap, yaitu algoritma kontrol saat batang pendulum memiliki sudut simpangan awal yaitu $\theta = 3.14 \text{ rad}$ dan saat batang pendulum berada disekitar sudut simpangan $\theta = 0 \text{ rad}$.

Rancang bangun dari SPT kemudian mulai dibuat. Langkah pertama dari melakukan rancang bangun dari SPT adalah merangkai sensor, aktuator, serta mikrokontroler yang telah ditentukan sebelumnya. Sensor yang digunakan pada rancang bangun ini adalah dua buah *incremental rotary encoder* untuk mengukur variabel x dan θ . Aktuator yang digunakan pada rancang bangun ini adalah sebuah motor DC untuk menggerakkan kereta SPT. Mikrokontroler yang digunakan untuk membaca sensor serta menggerakkan aktuator yang kemudian diprogram menggunakan bahasa C adalah Arduino Due. Setelah semua komponen SPT digabungkan, sinyal kontrol yang telah diperoleh kemudian diimplementasikan pada mikrokontroler. Langkah terakhir dari rancang bangun SPT ini adalah evaluasi pergerakan batang pendulum dengan menggunakan algoritma kontrol yang telah diperoleh. Batang dari SPT harus mampu mencapai dan mempertahankan posisi dari batang yang diinginkan (vertikal tegak lurus terhadap bidang horizontal). Diagram alir dari metodologi penelitian di tampilkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2. Metodologi Penelitian SPT

1.7 Sistematika Penulisan

Laporan Tugas Akhir ini dibagi menjadi 5 bab, yaitu:

1. **Bab 1 Pendahuluan.** Bab ini berisi latar belakang masalah dalam penelitian sistem pendulum terbalik (SPT) dalam hal penentuan model matematika serta implementasi kontrol. Bab 1 juga berisi identifikasi dan permasalahan dengan batasan dan asumsi yang digunakan pada penelitian SPT. Tujuan, manfaat, metodologi serta sistematika penulisan Buku Tugas Akhir juga dipaparkan pada bab 1.
2. **Bab 2 Dasar Teori.** Bab ini berisi penjelasan mengenai SPT, metode penentuan model matematika dari sistem pendulum terbalik dengan menggunakan mekanika *Euler-Lagrange*. Bab ini juga memaparkan analisis kestabilan Lyapunov untuk perancangan kontrol dari sistem pendulum terbalik, serta kontrol linear LQR pada SPT.
3. **Bab 3 Perancangan Sistem.** Dalam bab ini dipaparkan antara lain:
 - (a) Model matematika SPT dengan menggunakan metode meknika *Euler-Lagrange*
 - (b) Perancangan kontrol berbasikan energi dengan analisis kestabilan Lyapunov dan LQR
 - (c) Spesifikasi perangkat keras SPT.
 - (d) Desain perangkat keras dan lunak SPT
4. **Bab 4 Analisis Sistem.** Pada bab ini dipaparkan hasil rancang bangun purwarupa SPT berdasarkan desain yang telah dibuat pada bab sebelumnya serta data yang diperoleh pengujian SPT. Pengujian yang dilakukan pada SPT bertujuan untuk mendapatkan posisi dari kereta dan simpangan sudut dari batang SPT serta melakukan implementasi kontrol yang sebelumnya telah disimulasikan menggunakan MATLAB dengan implementasi menggunakan perangkat keras.
5. **Bab 5 Kesimpulan dan Saran.** Dalam bab ini dipaparkan kesimpulan dan saran dari hasil kegiatan penelitian "Perancangan dan Pengontrolan Sistem Pendulum Terbalik dengan Metoda Berbasis Energi".

