

**RANCANG BANGUN ALAT BANTU AJAR METODE
FEEDFORWARD DAN *CASCADE CONTROL* DI SISTEM
SERVO PADA MESIN *JIG BORING***

Tugas Akhir

Disusun sebagai salah satu syarat untuk
menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan

Oleh

Diki Yusril Ilyas

220341029



**PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA MEKATRONIKA
JURUSAN TEKNIK OTOMASI MANUFAKTUR DAN MEKATRONIKA
POLITEKNIK MANUFAKTUR BANDUNG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir yang berjudul:

**Rancang Bangun Alat Bantu Ajar Metode *Feedforward* dan
Cascade Control di Sistem Servo pada Mesin Jig Boring**

Oleh:

Diki Yusril Ilyas

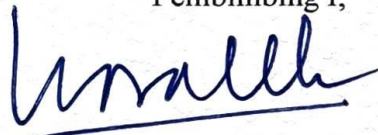
220341029

Telah direvisi, disetujui, dan disahkan sebagai Tugas Akhir penutup program
pendidikan Sarjana Terapan
Politeknik Manufaktur Bandung

Bandung, 04 Agustus 2025

Disetujui,

Pembimbing I,



Dr. Noval Lilansa, Dipl.Ing(FH), M.T.

NIP 197111231995121001

Pembimbing II,



Adhitya Sumardi Sunarya, S.Si., M.Si.

NIP 198110052009121005

Disahkan,

Penguji I,



Ir. Bolo Dwiartomo, M.Eng.

NIP 196810301995121001

Penguji II,



Ridwan, S.S.T., M.Eng.

NIP 197806122001121002

Penguji III,



Cipi Ramdani, S.Kom., M.Eng.

NIP 19890418202401004

PERNYATAAN ORISINALITAS

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Diki Yusril Ilyas
NIM : 220341029
Jurusan : Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika
Program Studi : Teknologi Rekayasa Mekatronika
Jenjang Studi : Sarjana Terapan
Jenis Karya : Tugas Akhir
Judul Karya : Rancang Bangun Alat Bantu Ajar Metode *Feedforward* dan *Cascade Control* di Sistem Servo pada Mesin *Jig Boring*

Menyatakan bahwa:

1. Tugas akhir ini adalah hasil karya saya sendiri (orisinal) atas bimbingan para pembimbing.
2. Dalam tugas akhir ini tidak terdapat keseluruhan atau sebagian tulisan orang lain yang saya ambil dengan cara menyalin atau meniru dalam bentuk rangkaian kalimat atau simbol yang menunjukkan gagasan atau pendapat atau pemikiran dari penulis lain, yang saya akui seolah-olah sebagai tulisan saya sendiri, dan/atau tidak terdapat bagian atau keseluruhan tulisan yang saya salin, tiru, atau yang saya ambil dari tulisan orang lain tanpa memberikan pengakuan penulis aslinya (referensi).
3. Bila kemudian terbukti bahwa saya melakukan tindakan yang bertentangan dengan hal tersebut di atas, baik disengaja atau tidak, saya bersedia menerima akibatnya sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung
Pada tanggal : 04 – 08 – 2025
Yang Menyatakan,

(Diki Yusril Ilyas)
NIM 220341029

PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI)

Sebagai Civitas Akademika Politeknik Manufaktur Bandung, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Diki Yusril Ilyas
NIM : 220341029
Jurusan : Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika
Program Studi : Teknologi Rekayasa Mekatronika
Jenjang Studi : Sarjana Terapan
Jenis Karya : Tugas Akhir
Judul Karya : Rancang Bangun Alat Bantu Ajar Metode *Feedforward* dan *Cascade Control* di Sistem Servo pada Mesin *Jig Boring*

Menyatakan/menyetujui bahwa:

1. Segala bentuk Hak Kekayaan Intelektual terkait dengan tugas akhir tersebut menjadi milik Institusi Politeknik Manufaktur Bandung, yang selanjutnya pengelolaannya berada dibawah Jurusan dan Program Studi, dan diatur sesuai dengan ketentuan yang berlaku.
2. Memberikan kepada Politeknik Manufaktur Bandung Hak Bebas Royalti Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*) atas hasil tugas akhir saya tersebut. beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneklusif ini, maka Politeknik Manufaktur Bandung berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama-nama Dosen Pembimbing dan nama saya sebagai anggota penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Bandung
Pada tanggal : 04 – 08 – 2025
Yang Menyatakan,

(Diki Yusril Ilyas)
NIM 220341029

MOTO PRIBADI

“Sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan”

Terima kasih sudah banyak mencoba, menerima, dan merelakan.
Berkat semua itu, saya semakin yakin bahwa segala cobaan adalah cara Tuhan
untuk menguatkan.

Tugas akhir ini saya persembahkan untuk kedua orang tua saya tercinta, adik-adik
yang sangat saya banggakan, semua keluarga yang senantiasa mendukung dan
mendoakan, teman-teman seperjuangan yang saling menguatkan, dan semua pihak
yang telah membuat saya bangkit dan termotivasi dalam menyelesaikan tugas
akhir ini.

Jazakumullahu Khairan Katsiiran

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah yang hanya kepada-Nya kami memuji, meminta pertolongan, dan memohon ampunan. Kami berlindung kepada-Nya dari kekejian diri dan kejahatan amalan kami. Barang siapa yang diberi petunjuk oleh Allah maka tidak ada yang dapat menyesatkan dan barang siapa yang tersesat dari jalan-Nya maka tidak ada yang dapat memberinya petunjuk. Aku bersaksi bahwa tiada sesembahan yang berhak disembah melainkan Allah saja, yang tiada sekutu bagi-Nya, dan aku bersaksi bahwa Muhammad adalah hamba dan Rasul-Nya.

Atas petunjuk dan pertolongan-Nya, Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul “Rancang Bangun Alat Bantu Ajar Metode *Feedforward* dan *Cascade Control* di Sistem Servo pada Mesin *Jig Boring*”.

Tugas akhir dibuat dalam rangka memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Sarjana Terapan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika di Politeknik Manufaktur Bandung.

Terselesainya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil, baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan karya tulis ilmiah ini hingga selesai, terutama kepada yang saya hormati:

1. Orang tua tercinta, Ibu Hj. Raden Badriah, S.Pd. dan Bapak H. Maesa Supar, S.Pd., M.Si. yang senantiasa memberikan doa, motivasi, dan dukungan tanpa henti, baik secara moril maupun materiil. Segala pengorbanan dan kasih sayang yang tulus dari mereka telah menjadi sumber kekuatan bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Kedua adik saya tersayang, Alinda dan Alfin, terima kasih atas segala kebersamaan dan kebahagiaan yang selalu dihadirkan. Semoga kita senantiasa saling menguatkan.
3. Direktur Politeknik Manufaktur Bandung, Bapak Darma Firmansyah Undayat, S.ST., M.T.

4. Ketua Jurusan Teknik Otomasi Manufaktur dan Mekatronika, Bapak Ridwan, S.ST., M.Eng.
5. Ketua Program Studi Teknologi Rekayasa Mekatronika, Bapak Adhitya Sumardi Sunarya, S.Si., M.Si.
6. Para Pembimbing tugas akhir, Bapak Dr. Noval Lilansa, Dipl.Ing(FH), M.T., dan Bapak Adhitya Sumardi Sunarya, S.Si., M.Si.
7. Para Penguji sidang tugas akhir, Bapak Ir. Bolo Dwiartomo, M.Eng., Bapak Ridwan, S.S.T., M.Eng., dan Bapak Cepi Ramdani, S.Kom., M.Eng.
8. Panitia tugas akhir, Bapak Rizqi Aji Pratama, S.Pd., M.Pd., Ibu Fitria Suryatini, S.Pd., M.T., Ibu Hilda Khoirunnisa. S.Tr.T., M.Sc.Eng., Bapak Muhammad Nursyam Rizal, S.Tr.T., M.Sc., Bapak Sarosa Castrena Abadi S.Pd., M.T., Ibu Anggraeni Mulyadewi, S.Si., M.T., dan Bapak Danu Jaya Saputro, S.T., M.Sc.
9. Para staff dan teknisi PT. Mattel Indonesia yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang sangat berharga bagi penulis.
10. Rekan-rekan seperjuangan di Jurusan *Automation Engineering* 2021 yang telah banyak memberi semangat, bantuan, dan keceriaan kepada penulis.
11. Seluruh pihak lain yang turut membantu dan tidak dapat disebutkan satu per satu.
12. Ratih Billahi, yang selalu hadir dengan doa, dukungan, dan ketulusan hati. Terima kasih telah menjadi kekuatan sunyi di balik setiap pencapaian ini. Semoga kita bisa terus berjuang bersama sampai bersanding di pelaminan nanti dan menapaki hidup dalam cinta yang sejati.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis memohon saran dan kritik yang sifatnya membangun agar dapat menjadi lebih baik lagi. Semoga karya tulis ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. *Aamiin Ya Robbal Alamin.*

Bandung, 04 Agustus 2025

Penulis

ABSTRAK

Perkembangan sistem kontrol servo yang menjadi komponen utama dalam pengoperasian mesin perkakas untuk mengatur posisi dan kecepatan motor semakin dibutuhkan seiring meningkatnya tuntutan presisi dalam industri manufaktur. Salah satu metode yang dapat meningkatkan performa sistem servo adalah integrasi *feedforward* dan *cascade control*. Namun, keterbatasan alat bantu ajar yang mengakomodasi kedua metode tersebut menjadi tantangan dalam proses pembelajaran. Oleh karena itu, tugas akhir ini merancang dan membangun alat bantu ajar metode *feedforward* dan *cascade control* berbasis PLC dan LabVIEW sebagai media pembelajaran sistem kendali servo satu sumbu pada mesin *jig boring*. Sistem dikembangkan menggunakan pendekatan V-model dari VDI2206 meliputi integrasi sistem mekanik, elektrik, informatik, dan kendali. Pengujian dilakukan melalui pendekatan eksperimental pada respons terhadap *input step* dan *ramp* guna mengevaluasi performa *tracking accuracy* sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penerapan kontrol *cascade* terhadap *input step* mampu mempercepat waktu tunak hingga 36.69%, waktu naik hingga 31.21%, dan waktu pemulihan dari gangguan hingga 73.80% dibandingkan kontrol *single loop*. Sementara itu, integrasi kontrol *feedforward* dan *cascade* mampu meningkatkan *tracking accuracy* terhadap *input ramp* dengan menurunkan *error slope* hingga 100% dibandingkan kontrol *single loop*. Evaluasi antarmuka sebagai media pembelajaran dilakukan melalui penyebaran kuesioner kepada 31 mahasiswa dan menghasilkan rata-rata nilai keseluruhan sebesar 84.91% dengan seluruh item kuesioner terbukti valid dan reliabel yang menunjukkan bahwa alat bantu ajar ini efektif dalam meningkatkan pemahaman konsep *feedforward* dan *cascade control* serta layak digunakan dalam pembelajaran sistem kendali.

Kata kunci: Alat bantu ajar, Sistem servo, *Feedforward*, *Cascade*, LabVIEW, PLC.

ABSTRACT

The development of servo control systems which serve as the main component in the operation of machine tools to control motor position and speed is increasingly needed in line with the increasing demand for precision in the manufacturing industry. One method to enhance servo system performance is the integration of feedforward and cascade control. However, the lack of teaching aids that accommodate both methods become a challenge in the learning process. Therefore, this final project designs and develops a teaching aid for the feedforward and cascade control methods based on PLC and LabVIEW as a learning medium for a single-axis servo control systems on jig boring machines. The system was developed using the V-model approach from VDI2206 involving the integration of mechanical, electrical, informatics, and control systems. Experimental testing was carried out using step and ramp inputs to evaluate the tracking accuracy performance of the system. The test results showed that the application of cascade control to step input accelerated settling time by up to 36.69%, rise time by up to 31.21%, and disturbance recovery time by up to 73.80% compared to single loop control. Meanwhile, the integration of feedforward and cascade control improved tracking accuracy for ramp input by reducing the error slope by up to 100% compared to single loop control. The evaluation of the interface as a learning medium was conducted through a questionnaire distributed to 31 students and resulting in an overall average score of 84.91% with all questionnaire items proven to be valid and reliable, which indicates that the teaching aid is effective in improving the understanding of feedforward and cascade control concepts and is feasible for use in control system learning.

Keywords: Teaching aid, Servo system, Feedforward, Cascade, LabVIEW, PLC.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
PERNYATAAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL (HKI).....	iii
MOTO PRIBADI	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	I-1
I.1 Latar Belakang	I-1
I.2 Rumusan Masalah	I-3
I.3 Batasan Masalah.....	I-3
I.4 Tujuan dan Manfaat	I-4
I.5 Sistematika Penulisan.....	I-4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	II-1
II.1 Tinjauan Teori.....	II-1
II.1.1 Sistem AC Motor Servo	II-1
II.1.2 Kontrol <i>Feedforward</i>	II-2
II.1.3 Kontrol <i>Cascade</i>	II-3
II.1.4 <i>System Type</i>	II-4

II.1.5	<i>Pole Zero Cancellation</i>	II-6
II.1.6	LabVIEW	II-8
II.1.7	Media Pembelajaran.....	II-11
II.2	Tinjauan Alat.....	II-12
II.2.1	Driver & Motor Servo AC	II-12
II.2.2	PLC OMRON NX1P2-9024DT	II-14
II.2.3	<i>Rotary Encoder</i>	II-15
II.2.4	Sysmac Studio.....	II-17
II.3	Studi Penelitian Terdahulu.....	II-17
BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH		III-1
III.1	Metodologi Penelitian	III-1
III.2	<i>Requirement List</i>	III-4
III.3	<i>System Design</i>	III-6
III.3.1	<i>Overall Function</i>	III-6
III.3.2	Gambaran Umum Sistem	III-6
III.4	<i>Domain-specific Design</i>	III-8
III.4.1	Perancangan Subsistem Mekanik.....	III-8
III.4.2	Perancangan Subsistem Elektrik	III-9
III.4.3	Perancangan Subsistem Informatik.....	III-12
III.4.4	Perancangan Subsistem Kendali	III-15
III.4.5	Perancangan Antarmuka	III-17
III.5	<i>System Integration</i>	III-18
III.6	<i>Lab-scale Prototype</i>	III-19
III.6.1	Perancangan Pengujian Sistem Kendali.....	III-19
III.6.2	Perancangan Pengujian Antarmuka sebagai Media Pembelajaran III-19	

III.6.3	Perancangan Pengujian Validitas dan Reliabilitas Kuesioner .	III-23
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	IV-1
IV.1	Hasil Implementasi Perancangan Sistem	IV-1
IV.1.1	Hasil Perancangan Subsistem Mekanik	IV-1
IV.1.2	Hasil Perancangan Subsistem Elektrik.....	IV-2
IV.1.3	Hasil Perancangan Subsistem Informatik	IV-3
IV.1.4	Hasil Perancangan Antarmuka.....	IV-4
IV.2	Hasil Pengujian Sistem Kendali.....	IV-9
IV.2.1	Pemodelan Karakteristik Motor Servo.....	IV-9
IV.2.2	Hasil Pengujian <i>Open Loop</i> Kecepatan Motor.....	IV-10
IV.2.3	<i>Pole-Zero Cancellation</i>	IV-14
IV.2.4	Hasil <i>Tuning Inner Loop (Speed Control)</i>	IV-15
IV.2.5	Hasil <i>Tuning Outer Loop (Position Control)</i>	IV-20
IV.2.6	Hasil <i>Tuning Feedforward Control</i>	IV-29
IV.2.7	Hasil Pengujian Metode <i>Feedforward dan Cascade Control</i> ..	IV-32
IV.3	Hasil Pengujian Antarmuka sebagai Media Pembelajaran	IV-41
IV.4	Hasil Pengujian Validitas dan Reliabilitas Kuesioner	IV-45
BAB V	PENUTUP.....	V-1
V.1	Kesimpulan	V-1
V.2	Saran.....	V-2
DAFTAR PUSTAKA	VI-1
LAMPIRAN	VII-1

DAFTAR TABEL

Tabel II. 1 Respons <i>system type</i> terhadap <i>error steady-state</i> [27]	II-6
Tabel II. 2 Studi penelitian terdahulu.....	II-17
Tabel III. 1 <i>Requirements list</i> tugas akhir	III-4
Tabel III. 2 Daftar Pin I/O PLC	III-11
Tabel III. 3 Kuesioner evaluasi antarmuka sebagai media pembelajaran	III-21
Tabel III. 4 Keterangan bobot nilai	III-22
Tabel IV. 1 Tabel hasil perhitungan K_m	IV-11
Tabel IV. 2 Tabel hasil perhitungan τ_m	IV-12
Tabel IV. 3 Hasil <i>tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i>	IV-19
Tabel IV. 4 Hasil <i>tuning outer loop</i> dengan <i>input step</i>	IV-24
Tabel IV. 5 Hasil <i>tuning outer loop</i> dengan K_p dan T_i terhadap <i>input ramp</i> ..	IV-28
Tabel IV. 6 Hasil <i>tuning feedforward</i> dengan <i>input ramp</i>	IV-32
Tabel IV. 7 Karakteristik metode <i>single loop</i>	IV-33
Tabel IV. 8 Karakteristik metode <i>cascade control</i>	IV-35
Tabel IV. 9 Perbandingan <i>single loop</i> dan <i>cascade control (input step)</i>	IV-36
Tabel IV. 10 Perbandingan <i>single loop</i> dan <i>cascade control (input ramp)</i>	IV-37
Tabel IV. 11 Perbandingan waktu pemulihan dari <i>disturbance</i>	IV-39
Tabel IV. 12 Karakteristik metode <i>feedforward + cascade control</i>	IV-39
Tabel IV. 13 Perbandingan respons <i>single loop</i> , <i>cascade</i> , dan <i>feedforward + cascade control</i> terhadap <i>input ramp</i>	IV-41
Tabel IV. 14 Hasil pengisian kuesioner pengujian antarmuka	IV-42
Tabel IV. 15 Rerata penilaian keseluruhan pengujian antarmuka	IV-45
Tabel IV. 16 Hasil pengujian validitas item kuesioner	IV-45

DAFTAR GAMBAR

Gambar II. 1 Prinsip kerja motor servo AC[20]	II-1
Gambar II. 2 Diagram kerja sistem servo <i>closed loop</i> [21]	II-2
Gambar II. 3 Struktur sistem servo dengan <i>feedforward</i> dan <i>cascade</i> [24].....	II-3
Gambar II. 4 Diagram blok kontrol <i>cascade</i> pada sistem servo[25].....	II-3
Gambar II. 5 Diagram blok <i>unity feedback system</i> [28].....	II-4
Gambar II. 6 Grafik respons <i>system type 0</i> [29].....	II-4
Gambar II. 7 Grafik respons <i>system type 1</i> [30].....	II-5
Gambar II. 8 Grafik respons <i>system type 2</i> [31].....	II-5
Gambar II. 9 Struktur <i>pole zero cancellation</i> dalam desain pengontrol[24].....	II-6
Gambar II. 10 Struktur regulator PID[24].....	II-7
Gambar II. 11 <i>Front panel</i> LabVIEW.....	II-8
Gambar II. 12 <i>Block diagram</i> LabVIEW	II-9
Gambar II. 13 <i>Controls</i> dan <i>functions palette</i> LabVIEW	II-9
Gambar II. 14 <i>Control design and simulation</i> LabVIEW	II-10
Gambar II. 15 <i>Waveform Chart/Graph</i> LabVIEW	II-10
Gambar II. 16 OMRON AC <i>Servo Driver</i> R88D-1SN01H-ECT[36].....	II-12
Gambar II. 17 OMRON AC <i>Servo Motor</i> R88M-1M10030T-S2[37].....	II-13
Gambar II. 18 PLC OMRON NX1P2-9024DT[39].....	II-14
Gambar II. 19 <i>Output</i> kanal A, B, Z[42].....	II-16
Gambar II. 20 <i>Software</i> Sysmac Studio	II-17
Gambar III. 1 Model V dari VDI2206[46].....	III-1
Gambar III. 2 Alur pengerjaan tugas akhir	III-2
Gambar III. 3 <i>Overall function</i> berdasarkan model V	III-6
Gambar III. 4 Gambaran umum alat bantu ajar	III-6
Gambar III. 5 Gambaran umum sistem <i>fedforward</i> dan <i>cascade control</i> servo III-7	
Gambar III. 6 Perancangan sistem mekanik	III-8
Gambar III. 7 Skema <i>Wiring</i> Komunikasi Sistem	III-9
Gambar III. 8 Perancangan <i>Wiring</i> Daya dan Kontrol Sistem.....	III-10
Gambar III. 9 Diagram alir perancangan informatik	III-12
Gambar III. 10 Diagram alir sistem kontrol gerak motor servo.....	III-13

Gambar III. 11 Diagram alir program LabVIEW	III-14
Gambar III. 12 Diagram blok <i>feedforward</i> dan <i>cascade control system</i> [24]...	III-15
Gambar III. 13 Rancangan desain antarmuka	III-17
Gambar III. 14 Proses integrasi sistem	III-18
Gambar IV. 1 Tampak depan dan belakang implementasi mekanik	IV-1
Gambar IV. 2 <i>Front electric panel</i>	IV-2
Gambar IV. 3 <i>Back electric panel</i>	IV-2
Gambar IV. 4 <i>Global variable</i> pada sysmac studio	IV-3
Gambar IV. 5 NI OPC <i>servers</i> dan OPC <i>Client</i>	IV-4
Gambar IV. 6 Halaman pendahuluan materi <i>feedforward</i> dan <i>cascade control</i>	IV-5
Gambar IV. 7 Halaman menu utama.....	IV-5
Gambar IV. 8 Halaman spesifikasi alat.....	IV-6
Gambar IV. 9 Halaman uji coba gerak motor	IV-6
Gambar IV. 10 Halaman <i>single loop control</i>	IV-7
Gambar IV. 11 Halaman <i>cascade control</i>	IV-8
Gambar IV. 12 Halaman <i>feedforward</i> dan <i>cascade control</i>	IV-8
Gambar IV. 13 Grafik pengujian <i>open loop</i> pada kecepatan 100rpm.....	IV-10
Gambar IV. 14 Diagram blok <i>open loop</i>	IV-13
Gambar IV. 15 Grafik simulasi <i>open loop</i>	IV-13
Gambar IV. 16 Grafik perbandingan simulasi dan data aktual <i>open loop</i>	IV-14
Gambar IV. 17 Diagram blok <i>inner loop control</i>	IV-16
Gambar IV. 18 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.3$	IV-16
Gambar IV. 19 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.4$	IV-17
Gambar IV. 20 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.5$	IV-17
Gambar IV. 21 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.6$	IV-17
Gambar IV. 22 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.7$	IV-18
Gambar IV. 23 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.8$	IV-18
Gambar IV. 24 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.9$	IV-18
Gambar IV. 25 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 1$	IV-19
Gambar IV. 26 <i>Tuning inner loop</i> dengan <i>input ramp</i> pada $K_p = 0.4$	IV-20
Gambar IV. 27 Diagram blok <i>outer loop control</i> (P).....	IV-21
Gambar IV. 28 <i>Tuning outer loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.2$	IV-21

Gambar IV. 29 <i>Tuning outer loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.3$	IV-22
Gambar IV. 30 <i>Tuning outer loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.4$	IV-22
Gambar IV. 31 <i>Tuning outer loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.5$	IV-22
Gambar IV. 32 <i>Tuning outer loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.6$	IV-23
Gambar IV. 33 <i>Tuning outer loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.7$	IV-23
Gambar IV. 34 <i>Tuning outer loop</i> dengan <i>input step</i> pada $K_p = 0.8$	IV-23
Gambar IV. 35 <i>Tuning outer loop</i> dengan <i>input ramp</i> pada <i>gain</i> $K_p = 0.3$	IV-24
Gambar IV. 36 Diagram blok <i>outer loop control</i> (PI)	IV-25
Gambar IV. 37 <i>Tuning outer loop</i> dengan $K_p = 0.3$ & $T_i = 10-1000\text{ms}$	IV-27
Gambar IV. 38 Diagram blok <i>feedforward + cascade control</i>	IV-29
Gambar IV. 39 <i>Tuning feedforward</i> dengan <i>input ramp</i> pada <i>gain</i> = 0.5.....	IV-30
Gambar IV. 40 <i>Tuning feedforward</i> dengan <i>input ramp</i> pada <i>gain</i> = 0.6.....	IV-30
Gambar IV. 41 <i>Tuning feedforward</i> dengan <i>input ramp</i> pada <i>gain</i> = 0.7.....	IV-30
Gambar IV. 42 <i>Tuning feedforward</i> dengan <i>input ramp</i> pada <i>gain</i> = 0.8.....	IV-31
Gambar IV. 43 <i>Tuning feedforward</i> dengan <i>input ramp</i> pada <i>gain</i> = 0.9.....	IV-31
Gambar IV. 44 <i>Tuning feedforward</i> dengan <i>input ramp</i> pada <i>gain</i> = 1.....	IV-31
Gambar IV. 45 Grafik respons <i>single loop</i> terhadap <i>input step</i>	IV-33
Gambar IV. 46 Grafik respons <i>single loop</i> terhadap <i>input ramp</i>	IV-33
Gambar IV. 47 Grafik respons <i>cascade control</i> terhadap <i>input step</i>	IV-35
Gambar IV. 48 Grafik respons <i>cascade control</i> terhadap <i>input ramp</i>	IV-35
Gambar IV. 49 Grafik perbandingan respons <i>single loop</i> dan <i>cascade control</i> (<i>input step</i>)	IV-36
Gambar IV. 50 Grafik perbandingan respons <i>single loop</i> dan <i>cascade control</i> (<i>input ramp</i>)	IV-37
Gambar IV. 51 Grafik perbandingan respons <i>single loop</i> dan <i>cascade control</i> terhadap <i>disturbance</i>	IV-38
Gambar IV. 52 Grafik respons <i>feedforward control</i> terhadap <i>input ramp</i>	IV-39
Gambar IV. 53 Grafik perbandingan respons <i>single loop</i> , <i>cascade</i> , dan <i>feedforward + cascade control</i> terhadap <i>input ramp</i>	IV-40

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 *Wiring* Diagram Elektrik

Lampiran 2 Desain Mekanik

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

Daftar simbol:

K_p = Gain Proporsional (*Proportional Gain*)

K_i = Gain Integral (*Integral Gain*)

K_d = Gain Derivatif (*Derivative Gain*)

E_{ss} = Error steady-state

T_i = Waktu Integral (*Integral Time*)

K_m = Gain Motor

τ_m = Konstanta Waktu Motor

ω = Kecepatan Motor

θ = Posisi Motor dalam Derajat

r = Sinyal *Input* Referensi

Daftar singkatan:

PLC = *Programmable Logic Controller*

LabVIEW = *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*

GUI = *Graphical User Interface*

VI = *Virtual Instrument*

OPC = *OLE for Process Control*

HMI = *Human Machine Interface*

PID = *Proportional-Integral-Derivative*

DAQ = *Data Acquisition*

PMSM = *Permanent Magnet Synchronous Motor*

AC = *Alternating Current*

DC = *Direct Current*

VDC = *Volt Direct Current*

NI = *National Instruments*

EMPI = *Evaluation of Multimedia, Pedagogical, and Interactive Software*

LED = *Light Emitting Diode*

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Belakangan ini, tuntutan terhadap tingkat presisi hasil produksi dalam industri manufaktur semakin tinggi untuk meningkatkan kualitas dan siklus pemrosesan produk[1]. Pengoperasian mesin perkakas dengan presisi tinggi yang umumnya menggunakan sistem kontrol servo sebagai komponen utama untuk mengontrol gerakan, posisi, dan kecepatan motor telah memegang peranan dalam memengaruhi kualitas dan biaya produksi, serta telah banyak diaplikasikan di berbagai bidang industri sehingga performa mesin perkakas sangat bergantung pada kinerja servo[2]–[4]. Namun, sistem kontrol servo seringkali mengalami gangguan seperti perubahan beban dan keterlambatan respons yang dapat mengurangi akurasi, kecepatan, dan efisiensi sistem sehingga diperlukan metode kontrol yang lebih adaptif untuk meningkatkan kemampuan *tracking accuracy* agar sistem kontrol servo pada mesin perkakas dapat mencapai performa yang optimal[5].

Terdapat berbagai metode kontrol yang bisa digunakan untuk meningkatkan *tracking accuracy* pada sistem servo, seperti *feedforward-feedback control with reference trajectory modification*[6], *Model Predictive Control (MPC)*[7], *feedforward control method*[8], *Active Disturbance Rejection Control (ADRC)*[9], *robust tracking control*[10], dan *cascade tracking control*[11]. *Feedforward control* berfungsi untuk meningkatkan kemampuan *tracking accuracy* dengan mengantisipasi gangguan yang dapat diprediksi sebelum *error* terjadi sehingga sistem dapat merespons lebih cepat terhadap perubahan referensi dan mencapai *setpoint* yang diinginkan[12]. Sementara itu, *cascade control* berfungsi sebagai *control* tambahan dengan memanfaatkan *multiple loop*, yaitu *inner loop* untuk mengontrol kecepatan dan *outer loop* untuk mengatur posisi di mana *inner loop* dapat merespons perubahan lebih cepat tanpa memengaruhi kestabilan *outer loop* sehingga dapat meningkatkan stabilitas dan kecepatan respons dari sistem secara keseluruhan[13].

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, penggunaan *feedforward control* pada simulasi sistem servo motor *smart window* menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam kecepatan respons dan *tracking accuracy* terhadap *input step* yang menghasilkan *error steady-state* 0%, *rise time* 0.0271ms, *settling time* 0.1143ms, dan *overshoot* 0.0271% dibandingkan kontrol *feedback* biasa yang menghasilkan *error steady-state* 0.1%, *rise time* 1.8921ms, *settling time* 3.5796ms, dan *overshoot* sebesar 1.8921%[14]. Selain itu, perbandingan kontrol *single loop* dan *cascade* pada simulasi sistem BLDC motor menunjukkan bahwa *cascade control* secara konsisten menghasilkan *settling time* lebih cepat, *error steady-state* lebih kecil, dan respons yang lebih stabil terhadap gangguan dibandingkan *single loop* yang mengalami *overshoot* dan *tracking* yang lebih lambat ketika diuji oleh sinyal *step* sebesar 73.33rad/s[15]. Hasil penelitian lainnya menunjukkan penerapan struktur kontrol *cascade* berbasis PI pada *inner loop* dan PD pada *outer loop* untuk sistem servo menghasilkan nilai signifikan dalam *tracking accuracy* terhadap sinyal *ramp* secara cepat tanpa *overshoot* bahkan ketika terdapat gangguan[16]. Kedua metode tersebut merupakan pengembangan *advanced control* yang diperlukan untuk meningkatkan *tracking accuracy* pada sistem kendali servo[14]–[16].

Mekatronika adalah bidang multidisiplin ilmu yang mengintegrasikan teknik mesin, elektro, informatika, dan kendali dengan jangkauan pembelajaran mencakup pemodelan sistem fisik, sensor dan aktuator, sinyal dan sistem kontrol, hingga komputer dan logika[17], [18]. Pemahaman implementasi sistem kontrol menjadi penting dalam pembelajaran mekatronika karena masih menjadi bahan kajian yang relevan dalam peningkatan *tracking accuracy* pada sistem kontrol, khususnya bagi mahasiswa Teknologi Rekayasa Mekatronika sebagai kesiapan dalam menghadapi tantangan industri berbasis kendali presisi[19]. Untuk memudahkan pemahaman tersebut, diperlukan media pembelajaran praktis pada sistem kontrol agar pembelajaran lebih efektif dan efisien.

Saat ini, telah tersedia produk alat bantu ajar Servo Trainer PT 93221 buatan Pudak Scientific dan DC Servo *Training System* buatan Lucas-Nuelle yang dirancang untuk mengajarkan konsep fundamental sistem kendali servo menggunakan kontrol PID dan *feedback*[20], [21]. Namun, belum ditemukan alat bantu ajar yang secara

spesifik mengajarkan sistem kontrol servo menggunakan *feedforward* dan *cascade control* sehingga tugas akhir ini merancang dan membangun alat bantu ajar metode *feedforward* dan *cascade control* pada sistem servo yang diharapkan dapat mengisi kekosongan dalam penyediaan media pembelajaran yang relevan dengan sistem kontrol servo menggunakan *feedforward* dan *cascade control* serta meningkatkan pemahaman mahasiswa dalam menganalisis sistem kontrol servo baik secara teori maupun praktik.

I.2 Rumusan Masalah

Berikut adalah rumusan masalah tugas akhir ini berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan:

1. Bagaimana merancang alat bantu ajar untuk metode *feedforward* dan *cascade control* pada sistem kendali servo?
2. Bagaimana pengaruh penerapan metode *feedforward* dan *cascade control* terhadap *tracking accuracy* pada kendali servo?
3. Bagaimana merancang LabVIEW sebagai platform antarmuka yang dapat mendukung pembelajaran metode *feedforward* dan *cascade control* pada sistem servo?

I.3 Batasan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang didapatkan, agar masalah yang telah diidentifikasi dapat dibahas dengan lebih spesifik, maka tugas akhir ini dibatasi pada poin-poin berikut:

1. Alat bantu ajar yang dibuat hanya berfokus pada metode kontrol *feedforward* dan *cascade* pada sistem servo dengan ukuran yang disesuaikan untuk digunakan di laboratorium.
2. Alat bantu ajar berupa mesin *jig boring* satu sumbu skala kecil menggunakan *feedforward* dan *cascade control* dengan panjang lintasan *pitch* 150mm.
3. Penerapan *feedforward* dan *cascade control* dilakukan melalui integrasi antara LabVIEW dan PLC OMRON NX1P2-9024DT.
4. Antarmuka yang digunakan untuk kontrol dan *monitoring* adalah aplikasi pemrograman grafis LabVIEW.

I.4 Tujuan dan Manfaat

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disajikan, tujuan akhir tugas dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Merancang alat bantu ajar berbasis metode *feedforward* dan *cascade control* untuk kendali servo yang dapat digunakan sebagai media pembelajaran bagi mahasiswa.
2. Menganalisis pengaruh penerapan metode *feedforward* dan *cascade control* terhadap *tracking accuracy* pada kinerja kendali servo.
3. Merancang antarmuka berbasis LabVIEW sebagai alat bantu *monitoring* untuk mendukung pembelajaran metode kontrol *feedforward* dan *cascade* pada sistem kendali servo.

Adapun manfaat tugas akhir ini adalah menyediakan alat bantu ajar yang praktis untuk memahami implementasi metode *feedforward* dan *cascade control* pada sistem kontrol servo. Alat bantu ajar ini diharapkan dapat membantu mahasiswa dalam mempelajari dan mengaplikasikan konsep sistem kontrol servo secara praktis sehingga dapat meningkatkan kompetensi di bidang mekatronika, serta dapat memberikan kontribusi sekaligus referensi dalam pengembangan media pembelajaran sistem kontrol yang relevan dan lebih lanjut.

I.5 Sistematika Penulisan

Sistematika Tugas Akhir ini dibahas dengan penjabaran sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN, berisi uraian mengenai latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA, berisi gambaran umum tentang landasan teori, menjelaskan istilah dan ilmu terkait, serta meninjau hasil penelitian terdahulu dengan topik atau kajian yang sama.

BAB III METODOLOGI PENYELESAIAN MASALAH, berisi langkah-langkah penyelesaian tugas akhir, meliputi gambaran umum sistem, perancangan sistem, dan perencanaan pengujian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN, berisi pemaparan hasil pengujian yang dilakukan pada beberapa domain dan sistem, dengan memperhatikan tuntutan yang harus dicapai.

BAB V PENUTUP, berisi kesimpulan yang diperoleh dari pengerjaan tugas akhir yang telah dilakukan dan saran untuk penelitian lebih lanjut.