

**SISTEM KONTROL KECEPATAN 1-DOF *UPPER-LIMB*
EXOSKELETON DENGAN MEKANISME PROPORTIONAL
INTEGRAL**

SKRIPSI



M. HAFIDH ALFA ROBBY

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK BIOMEDIS
DEPARTEMEN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS AIRLANGGA
2022**

**SISTEM KONTROL KECEPATAN 1-DOF UPPER-LIMB
EXOSKELETON DENGAN MEKANISME PROPORTIONAL
INTEGRAL**

SKRIPSI

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Biomedis pada
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga

M. Hafidh Alfa Robby
NIM 081711733021

Disetujui oleh:

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T.
NIP. 197903152003122002



Akif Rahmatillah S.T., M.T.
NIP. 198601042008121002

LEMBAR PENGESAHAN NASKAH SKRIPSI

Judul : SISTEM KONTROL KECEPATAN 1-DOF UPPER-LIMB EXOSKELETON DENGAN MEKANISME PROPORTIONAL INTEGRAL
Penyusun : M. Hafidh Alfa Robby
NIM : 081711733021
Pembimbing I : Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T.
Pembimbing II : Akif Rahmatillah S.T., M.T.
Tanggal Sidang : 2 juni 2022

Disetujui oleh,

Pembimbing I,

Pembimbing II,



Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T.
NIP. 197903152003122002

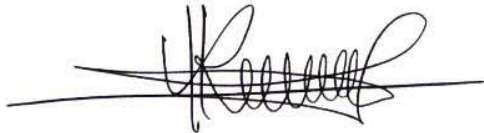


Akif Rahmatillah S.T., M.T.
NIP. 198601042008121002

Mengetahui,

Ketua Departemen Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga

Ketua Program Studi
S1 Teknik Biomedis
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Airlangga



Herri Trilaksana S.Si., M.Si., Ph.D.
NIP. 197712282003121003



Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T.
NIP. 197903152003122002

PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI

Skripsi ini tidak dipublikasikan, tetapi tersedia di perpustakaan dalam lingkungan Universitas Airlangga, diperkenankan dipakai sebagai referensi kepustakaan, tetapi pengutipan harus seizin penyusun, dan harus menyebutkan sumbernya sesuai dengan kebiasaan ilmiah. Dokumen skripsi ini merupakan hak milik Universitas Airlangga.

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Hafidh Alfa Robby

NIM : 081711733021

Program Studi : S1 Teknik Biomedis

Judul Skripsi : Sistem Kontrol Kecepatan 1-Dof Upper-Limb Exoskeleton
Dengan Mekanisme Proportional Integral

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa bagian atau keseluruhan isi Skripsi ini tidak pernah diajukan untuk mendapat gelar akademis pada bidang studi dan/atau universitas lain dan tidak pernah dipublikasi/ditulis oleh individu selain penyusunan kecuali bila dituliskan dengan format kutipan dalam isi Skripsi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Universitas Airlangga. Pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa adanya paksaan dari pihak manapun.

Surabaya, 7 juli 2022

Yang membuat pernyataan,



M. Hafidh Alfa Robby

NIM 081711733021

Robby, M. Hafidh Alfa, 2022. **Sistem Kontrol Kecepatan 1-Dof Upper-Limb Exoskeleton Dengan Mekanisme Proportional Integral**. Skripsi ini di bawah bimbingan Dr. Riries Rulaningtyas, S.T, M.T. dan Akif Rahmatillah, S.T., M.T. Program Studi Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.

ABSTRAK

Sistem kontrol Proporsional Integral (PI) digunakan untuk mengontrol eksoskeleton ekstremitas atas dengan satu *Degree of Freedom* (DoF) atau derajat kebebasan. Sinyal masukan berupa informasi kecepatan sudut dari siku orang normal. Penelitian dilakukan secara simulasi dengan perhitungan computer numerik menggunakan aplikasi MATLAB Simulink. Nilai Kp yang digunakan adalah sebesar 100 dan nilai Ki dicari dengan melakukan percobaan variasi mulai dari 0 sampai 20.000 yang diujikan terlebih dahulu ke sinyal step. Didapatkan Ki terbaik adalah sebesar 11.600. Nilai Kp dan Ki tersebut mampu membuat output kecepatan sudut gerak eksoskeleton yang menggunakan aktuator BLDC Maxon EC 45 flat. Fungsi transfer dari eksoskeleton dan sistem kontrol telah diuji kestabilan sistemnya dan sistem dapat dinyatakan stabil karena letak pole-nya berada di sebelah kiri sumbu imajiner dengan nilai pole-nya berada pada $0,0000 + 0,000i$; $-7,6057 \times 10^3 + 0,0000i$; $-0,0848 \times 10^3 + 0,0208 \times 10^3i$ dan $-0,0848 \times 10^3 - 0,0208 \times 10^3i$ serta pole zero berada pada 0 dan -116. Uji *Integral Time Absolute Error* (ITAE) juga dilakukan, dan mendapatkan nilai ITAE sebesar 9,4821.

Kata kunci: Kontrol PI, 1-DoF Exoskeleton, kecepatan sudut

Robby, M. Hafidh Alfa, 2022. **Velocity Control System of 1-Dof Upper-Limb Exoskeleton with Proportional Integral Mecanism**. Thesis under the guidance of Dr. Riries Rulaningtyas, S.T, M.T. dan Akif Rahmatillah, S.T., M.T. Biomedical Engineering Bachelor Program, Science and Technology Faculty, Airlangga University.

ABSTRACT

The Proportional Integral (PI) control system is used to control the upper limb exoskeleton with one Degree of Freedom (DoF). The input signal is the angular velocity of a normal person's elbow. The research was conducted by simulation with numerical computer calculations using the MATLAB Simulink application. The Kp value used is 50 and the Ki value used varies from 500, 2,500 and 10,000. Of the three variations of the Ki value, the best Ki value is 10,000. The Kp and Ki values are able to make the angular output speed of the exoskeleton using the Maxon EC 45 flat BLDC actuator. The transfer function of the exoskeleton and control system has been tested for the stability of the system and the system can be declared stable because the pole position is to the left of the imaginary axis with the pole value being at $0.0000 + 0.000i$; $-7.6057 \times 10^3 + 0.0000i$; $-0.0848 \times 10^3 + 0.0210 \times 10^3i$ and $-0.0848 \times 10^3 - 0.0210 \times 10^3i$ and pole zero is at 0 and -200. The Integral Time Absolute Error (ITAE) test was also carried out, and the ITAE value was 9,4821.

Key words: PI controller, 1-DoF Exoskeleton, angular velocity

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah Subhanahu wa Ta'ala atas berkat rahmat, hidayah dan karunia-Nya skripsi dengan judul “Sistem Kontrol Kecepatan 1-*DoF Upper-Limb Exoskeleton* Dengan Mekanisme Proportional Integral” dapat diselesaikan. Naskah skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat akademik guna mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S-1 Teknik Biomedis, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa tidak akan berjalan dengan baik tanpa mendapat banyak bantuan, bimbingan, dan arahan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tulus kepada:

1. Kedua orang tua penulis Bapak Abdul Mukid dan Ibu Emina Ilma Risqiaty, yang selalu mendidik, memberikan dukungan secara moral dan materi, serta mendoakan secara penuh kepada penulis selama masa perkuliahan.
2. Bapak Prof. Dr. Moh. Yasin, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.
3. Bapak Herri Trilaksana, S.Si., M.Si. Ph.D, selaku Kepala Departemen Fisika Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga.
4. Ibu Dr. Riries Rulaningtyas, S.T., M.T. selaku Koordinator Program Studi S-1 Teknik Biomedis serta dosen pembimbing I atas bimbingan dan arahnya selama proses penyusunan naskah skripsi.
5. Bapak Akif Rahmatillah S.T., M.T. selaku dosen pembimbing II atas bimbingan dan arahnya selama proses penyusunan naskah skripsi.
6. Ibu Prof. Dr. Suryani Dyah Astuti, S.Si., M.Si. selaku dosen wali yang telah membantu melancarkan proses perkuliahan penulis.
7. Tim pengajar S-1 Teknik Biomedis yang telah membimbing serta memberikan wawasan ilmu selama di banku perkuliahan.
8. Teman-teman Teknik Biomedis Universitas Airlangga angkatan 2017 – *Abducens*, yang selalu memotivasi, menemani dan berproses bersama sejak hari pertama kuliah.

9. Keluarga besar Airlangga Bojonegoro Community (ABC) dan Jamaah Intelektual Mahasiswa Muslim (JIMM) FST Unair yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu karena selalu menemani dan memberi dukungan.
10. Semua pihak yang telah memberikan semangat dan bantuannya selama penyusunan naskah skripsi

Penulis berharap naskah skripsi ini sedikit banyaknya dapat memberi manfaat baik kepada penyusun sendiri dan juga kalangan lain.

Surabaya, 17 Mei 2022

Penulis

M. Hafidh Alfa Robby

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
SISTEM KONTROL KECEPATAN 1-DOF UPPER-LIMB EXOSKELETON DENGAN MEKANISME PROPORTIONAL INTEGRAL	ii
LEMBAR PENGESAHAN NASKAH SKRIPSI.....	iii
PEDOMAN PENGGUNAAN SKRIPSI	iv
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Eksoskeleton	4
2.2 Motor BLDC.....	5
2.2.1 Cara Kerja Motor <i>Brushless</i> DC	7
2.3 Model Matematis	7
2.3.1 Motor DC	7
2.3.2 Motor BLDC	12
2.4 <i>Harmonic Drive</i> (HD).....	15
2.5 Sistem Kontrol PI.....	15
2.5.1 Definisi Sistem Kontrol.....	15

2.5.2	Kontrol Proporsional Integral (PI).....	17
2.6	MATLAB.....	21
2.7	Kestabilan Sistem	21
2.7.1	Konsep Kestabilan.....	21
2.7.2	Kriteria Kestabilan Routh-Hurwitz	22
2.8	<i>Integral Time Absolute Error</i>	24
BAB III METODE PENELITIAN.....		26
3.1	Tempat dan Waktu Pelaksanaan	26
3.2	Alat dan Bahan Penelitian.....	26
3.2.1	Alat Penelitian	26
3.2.2	Bahan Penelitian.....	26
3.3	Prosedur Percobaan.....	26
3.3.1	Tahap Persiapan	27
3.3.1.1	1-DoF Upper-Limb Exoskeleton	27
3.3.1.2	Aktuator Brushless DC Motor	27
3.3.1.3	Mekanisme kontrol Proportional Integral.....	28
3.3.2	Tahap Pembuatan <i>Transfer Function</i> motor BLDC.....	29
3.3.3	Tahap Pembuatan simulasi MATLAB & Simulink	30
3.3.4	Tahap desain kontrol PI.....	30
3.3.5	Tahap Analisis dan Validasi.....	30
BAB IV PEMBAHASAN.....		32
4.1	Model Fungsi Transfer 1-DOF <i>Upper-Limb Exoskeleton</i>	32
4.1.1	Fungsi Transfer Motor BLDC	32
4.1.2	Fungsi Transfer Eksoskeleton	34
4.2	Sistem Kontrol PI.....	36
4.3	Pengujian	44
4.3.1	Pengujian pada Sinyal Step	44

4.3.2	Pengujian pada Sinyal Kecepatan Sudut	45
4.3.2.1	Pengambilan Data Sinyal Masukan	45
4.3.2.2	Pengujian Sinyal Kecepatan Sudut	48
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		51
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	51
DAFTAR PUSTAKA		52
LAMPIRAN		54

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi motor BLDC	27
Tabel 4.1 titik pole tiap nilai K_i	44
Tabel 4.2 nilai ITAE hasil step respon	45
Tabel 4.3 nilai ITAE untuk setiap variasi nilai K_i	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model eksoskeleton (a) Zhao (2021) dan (b) Ollinger (2012)	5
Gambar 2.1 BLDC Motor (Sang-Hoon Kim, 2017).....	6
Gambar 2.3 Rangkaian litrik pada motor DC.....	7
Gambar 2.4 Rangkaian elektromekanis pada motor DC	8
Gambar 2.5 diagram sistematik motor BLDC.....	13
Gambar 2.6 Blok pengendalian proses (Dorf & Bishop, 2011)	16
Gambar 2.7 Blok <i>open-loop control</i> (Dorf & Bishop, 2011)	16
Gambar 2.8 Blok <i>closed-loop control</i> (Dorf & Bishop, 2011).....	17
Gambar 2.9 (a) sinyal hasil kontrol proporsional tanpa kontrol integral, (b) respon dari kontrol PI terhadap <i>step input</i> pada satuan <i>et</i> (Seborg <i>et al</i> , 2017).	20
Gambar 2.10 Blok diagram kontrol PI (wpilib.org)	20
Gambar 3.1 Diagram prosedur penelitian	27
Gambar 3.2 Ilustrasi alat.....	28
Gambar 3.3 Skema kontrol PI	29
Gambar 4.1 Model <i>close-loop</i> motor DC (Sharma, 2015)	32
Gambar 4.2 Skema model fungsi transfer motor BLDC	32
Gambar 4.3 Grafik Nilai ITAE untuk setiap Nilai parameter K_p	36
Gambar 4.4 grafik step respon kontrol proporsional dengan nilai K_p sebesar (a) 100, (b) 60, (c) 30	38
Gambar 4.5 grafik Nilai ITAE untuk setiap nilai parameter K_i	39
Gambar 4.6 grafik step respon kontrol PI dengan nilai K_i sebesar 200 dan nilai K_p sebesar (a) 5.000 (b) 11.600 (c) 20.000	41
Gambar 4.7 skema ringkas kontrol PI	42
Gambar 4.6 grafik posisi pole dari nilai K_i (a) 1.000, (b) 5.000, dan (c) 11.600	43
Gambar 4.7 Sinyal sudut dalam satuan radian; (a) sinyal mentah hasil sadapan encoder, (b) sinyal yang dipakai	46
Gambar 4.8 sinyal kecepatan sudut dalam satuan rad/s	47
Gambar 4.9 Kecepatan sudut yang sudah dikecilkan	48

Gambar 4.10 grafik hasil plot respon eksoskeleton terhadap sinyal sudut siku dengan nilai Ki (a) 10.000, (b) 2.500 dan (c) 500..... 49