

SKRIPSI SARJANA TERPAN
RANCANG BANGUN SISTEM WEARABLE UNTUK
REHABILITASI TANGAN PASIEN PASCA-STROKE
DENGAN METODE PID



Intelligentia - Dignitas

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Otomasi

Oleh:

Zulfikar Ali Alfaruqi

1527422035

UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA OTOMASI
2026

HALAMAN SAMPUL

**RANCANG BANGUN SISTEM WEARABLE UNTUK
REHABILITASI TANGAN PASIEN PASCA-STROKE
DENGAN METODE PID**



Intelligentia - Dignitas

Disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh
Gelar Sarjana Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Otomasi

Oleh:

Zulfikar Ali Alfaruqi

1527422035

**UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNOLOGI REKAYASA OTOMASI
2026**

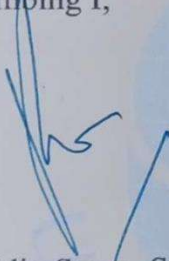
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING TUGAS AKHIR
BENTUK: SKRIPSI

Nama Mahasiswa : Zulfikar Ali Alfaruqi
NIM : 1527422035
Judul Penelitian : Rancang Bangun Sistem Wearable untuk Rehabilitasi
Tangan Pasien Pasca-Stroke dengan Metode PID

Ini telah disetujui dan dinyatakan dan memenuhi syarat untuk diajukan dalam ujian tugas akhir.

Jakarta, 22 Juli 2026

Pembimbing I,



Rafiuddin Syam, S.T., M.Eng., PhD.

NIDN. 0020075804

Pembimbing II,



Churnia Sari, S.T., M.T.

NIDN. 0708129004

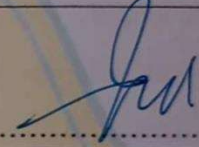
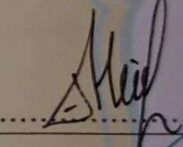
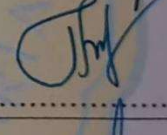
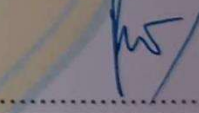
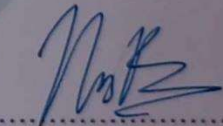
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

BENTUK: SKRIPSI

Nama Mahasiswa : Zulfikar Ali Alfaruqi
NIM : 1527422035
Program Studi/Fakultas : Teknologi Rekayasa Otomasi/Fakultas Teknik
Judul Penelitian : Rancang Bangun Sistem Wearable untuk
Rehabilitasi Tangan Pasien Pasca-Stroke dengan
Metode PID

Ini telah dipertahankan dihadapan dewan penguji dan dinyatakan Lulus/ Tidak Lulus)*
Ujian Tugas Akhir oleh Tim Penguji pada Tanggal 22 Juli 2026

Tim Penguji,

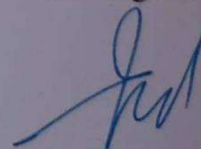
Ketua Penguji	Syufrijal, S.T., M.T. NIDN. 0027037604	
Anggota Penguji (Penguji Ahli 1)	Ir. Heri Firmansyah, S.T., M.T. NIDN. 0014028408	
Anggota Penguji (Penguji Ahli 2)	Taryudi, Ph.D. NIDN. 0006088005	
Anggota Penguji (Pembimbing 1)	Rafiuddin Syam, S.T., M.Eng. Ph.D. NIDN. 0020075804	
Anggota Penguji (Pembimbing 2)	Churnia Sari, S.T., M.T. NIDN. 0708129004	

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik



Prof. Dr. Neneng Siti Silfi Ambarwati, S.Si., Apt., M.Si.
NIDN. 0029027204

Koordinator Program Studi
Teknologi Rekayasa Otomasi



Syufrijal, S.T., M.T.
NIDN. 0027037604

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Nama Mahasiswa : Zulfikar Ali Alfaruqi
NIM : 1527422035
Program Studi : D4 Teknologi Rekayasa Otomasi
Fakultas : Fakultas Teknik
Judul Penelitian : Rancang Bangun Sistem Wearable untuk
Rehabilitasi Tangan Pasien Pasca-Stroke dengan
Metode PID

Menyatakan bahwa Tugas Akhir ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung risiko/sanksi apabila di kemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya tulis ilmiah ini.

Jakarta, 22 Juli 2026

Yang menyatakan,



Zulfikar Ali Alfaruqi

NIM. 1527422035



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA
PERPUSTAKAAN DAN KEARSIPAN

Jalan Rawamangun Muka Jakarta 13220
Telepon/Faksimili: 021-4894221
Laman: lib.unj.ac.id

**LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI
KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademika Universitas Negeri Jakarta, yang bertanda tangan di bawah ini, saya:

Nama : Zulfikar Ali Alfaruqi
Nim : 1527422035
Fakultas/Prodi : Teknik/D4 Teknologi Rekayasa Otomasi
Alamat Email : zulfikarali1305@gmail.com

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Perpustakaan dan Kearsipan Universitas Negeri Jakarta, Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif atas karya ilmiah:

☒ Skripsi ☐ Tesis ☐ Disertasi ☐ Lain-lain

yang berjudul :

**RANCANG BANGUN SISTEM WEARABLE UNTUK REHABILITASI
TANGAN PASIEN PASCA-STROKE DENGAN METODE PID**

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini Perpustakaan dan Kearsipan Universitas Negeri Jakarta berhak menyimpan, mengalihmediakan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), mendistribusikannya, dan menampilkan/mempublikasikannya di internet atau media lain secara *fulltext* untuk kepentingan akademis tanpa perlu meminta ijin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan atau penerbit yang bersangkutan.

Saya bersedia untuk menanggung secara pribadi, tanpa melibatkan pihak Perpustakaan Universitas Negeri Jakarta, segala bentuk tuntutan hukum yang timbul atas pelanggaran Hak Cipta dalam karya ilmiah saya ini.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Jakarta, 22 Juli 2026

Penulis

Zulfikar Ali Alfaruqi
NIM. 1527422035

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Wearable untuk Rehabilitasi Tangan Pasien Pasca-Stroke dengan Metode PID” ini dapat diselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta.

Penulis menyadari bahwa penyelesaian skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Rafiuddin Syam, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang sangat berharga selama proses penyusunan skripsi ini;
2. Ibu Churnia Sari, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa memberikan bimbingan, koreksi, dan motivasi kepada penulis dari awal hingga akhir penelitian;
3. Bapak Syufrijal, S.T., M.T. selaku Koordinator Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Universitas Negeri Jakarta;
4. Seluruh dosen dan staf pengajar Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan bekal selama masa perkuliahan;
5. Kedua orang tua serta keluarga tercinta yang senantiasa memberikan doa, dukungan moral, materiil, dan motivasi tiada henti kepada penulis;
6. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi yang telah memberikan bantuan, semangat, dan kebersamaan selama proses perkuliahan dan penelitian; serta
7. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknologi rehabilitasi medis, serta menjadi salah satu referensi bagi penelitian selanjutnya.

Jakarta, 22 Juli 2026



Zulfikar Ali Alfaruqi



ABSTRAK

Zulfikar Ali Alfaruqi. Rancang Bangun Sistem Wearable untuk Rehabilitasi Tangan Pasien Pasca-Stroke dengan Metode PID. Skripsi, Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta, 2026.

Stroke merupakan penyebab disabilitas motorik terbesar secara global, namun aksesibilitas rehabilitasi tangan di Indonesia masih terbatas akibat rasio fisioterapis-pasien yang rendah dan biaya terapi manual yang tinggi. Sistem eksoskeleton tangan yang tersedia di literatur umumnya mahal dan bergantung pada komponen impor, sementara dokumentasi kuantitatif performa kontrol PID diskrit pada sistem tendon-driven berbasis spring skeleton berkomponen lokal berbiaya rendah belum tersedia.

Penelitian ini merancang sarung tangan (wearable glove) rehabilitasi dengan lima kanal kendali PID independen (satu per jari) berbasis Arduino Mega 2560 Pro Mini, mekanisme spring skeleton sebagai elemen restorasi pasif untuk gerak ekstensi, dan benang pancing sebagai transmisi tendon, dengan total biaya purwarupa di bawah Rp 2 juta. Karakteristik dinamik plant motor-drum-pegas dimodelkan secara analitis, dan parameter K_p , K_i , K_d untuk kendali closed-loop berbasis umpan balik flex sensor dirancang melalui metode *Root Locus* (penempatan kutub dominan), kemudian divalidasi melalui simulasi numerik pada empat titik setpoint sudut fleksi ($30-75^\circ$).

Purwarupa fisik telah berhasil dirakit dan diuji secara mekanis serta elektris: kebutuhan torsi aktuator ($\approx 0,842 \text{ kg}\cdot\text{cm}$) terbukti berada jauh di bawah kapasitas maksimum servo MG90S ($\approx 2,2 \text{ kg}\cdot\text{cm}$), dengan konsumsi arus sistem yang terukur stabil (puncak $\approx 938 \text{ mA}$ saat grip) menggunakan sensor arus INA219. Namun demikian, integrasi fisik flex sensor sebagai umpan balik posisi belum terpasang pada tahap ini, sehingga kendali gerak jari pada perangkat keras aktual masih beroperasi secara open-loop melalui sekuens otomatis grip-release-rest; performa kendali closed-loop (rise time, overshoot, settling time, dan steady-state error) baru tervalidasi melalui simulasi numerik dan belum diukur secara empiris pada purwarupa maupun diujikan pada subjek manusia.

Kontribusi penelitian ini meliputi penurunan parameter $K_p/K_i/K_d$ metode Root Locus untuk sistem tendon-driven berbasis spring skeleton yang belum tersedia di literatur, pembuktian kelayakan mekanis dan elektris purwarupa rehabilitasi tangan berbiaya rendah dari komponen lokal Indonesia (di bawah Rp 2 juta per unit), serta identifikasi celah implementasi (integrasi flex sensor, validasi closed-loop empiris, dan pengujian subjek manusia) sebagai dasar pengembangan penelitian lanjutan.

Kata Kunci: rehabilitasi tangan, pasca-stroke, kontrol PID diskrit, root locus, spring skeleton, tendon-driven, wearable glove, Arduino, low-cost, purwarupa

ABSTRACT

Zulfikar Ali Alfaruqi. *Design and Development of a Wearable Hand Rehabilitation System for Post-Stroke Patients Using PID Control. Undergraduate Thesis, Automation Engineering Technology Study Program, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Jakarta, 2026.*

Stroke is the leading global cause of motor disability, yet access to hand rehabilitation in Indonesia remains limited due to a low physiotherapist-to-patient ratio and the high cost of manual therapy. Hand exoskeleton systems reported in the literature are generally expensive and rely on imported components, while quantitative performance documentation for discrete PID control in tendon-driven, spring-skeleton-based systems using low-cost local components remains unavailable.

This study designs and develops a wearable hand rehabilitation glove featuring five independent PID control loops (one per finger) based on an Arduino Mega 2560 Pro Mini, a spring-skeleton mechanism as a passive extension actuator, and fishing line as the tendon transmission, at a total cost of under IDR 2 million. The system's dynamics were modeled as an FOPDT plant from open-loop step response tests, with flex sensor nonlinearity corrected via second-order polynomial calibration per finger. The K_p , K_i , and K_d parameters were determined using a combination of the Root Locus method and manual fine-tuning, implemented in discrete form at $T_s = 20$ ms with output clamping and anti-windup.

The physical prototype was successfully assembled and tested mechanically and electrically: the required actuator torque (≈ 0.842 kg·cm) was confirmed to be well below the maximum capacity of the MG90S servo (≈ 2.2 kg·cm), and the system's current draw was measured as stable (peak ≈ 938 mA during grip) using an INA219 current sensor. However, physical integration of the flex sensor as a position feedback element has not yet been installed at this stage, so finger-motion control on the actual hardware still operates open-loop through an automated grip-release-rest sequence; closed-loop control performance (rise time, overshoot, settling time, and steady-state error) has so far only been validated through numerical simulation and has not yet been measured empirically on the prototype or tested on human subjects.

The main contributions of this research include the derivation of Root Locus-based $K_p/K_i/K_d$ parameters for a tendon-driven, spring-skeleton-based system not yet available in the literature, empirical evidence that the mechanical and electrical realization of a low-cost hand rehabilitation prototype is achievable using local Indonesian components (under IDR 2 million per unit), and the identification of implementation gaps (flex sensor integration, empirical closed-loop validation, and human-subject testing) as a foundation for future development.

Keywords: *hand rehabilitation, post-stroke, discrete PID control, root locus, spring skeleton, tendon-driven, wearable glove, Arduino, low-cost, prototype*

DAFTAR ISI

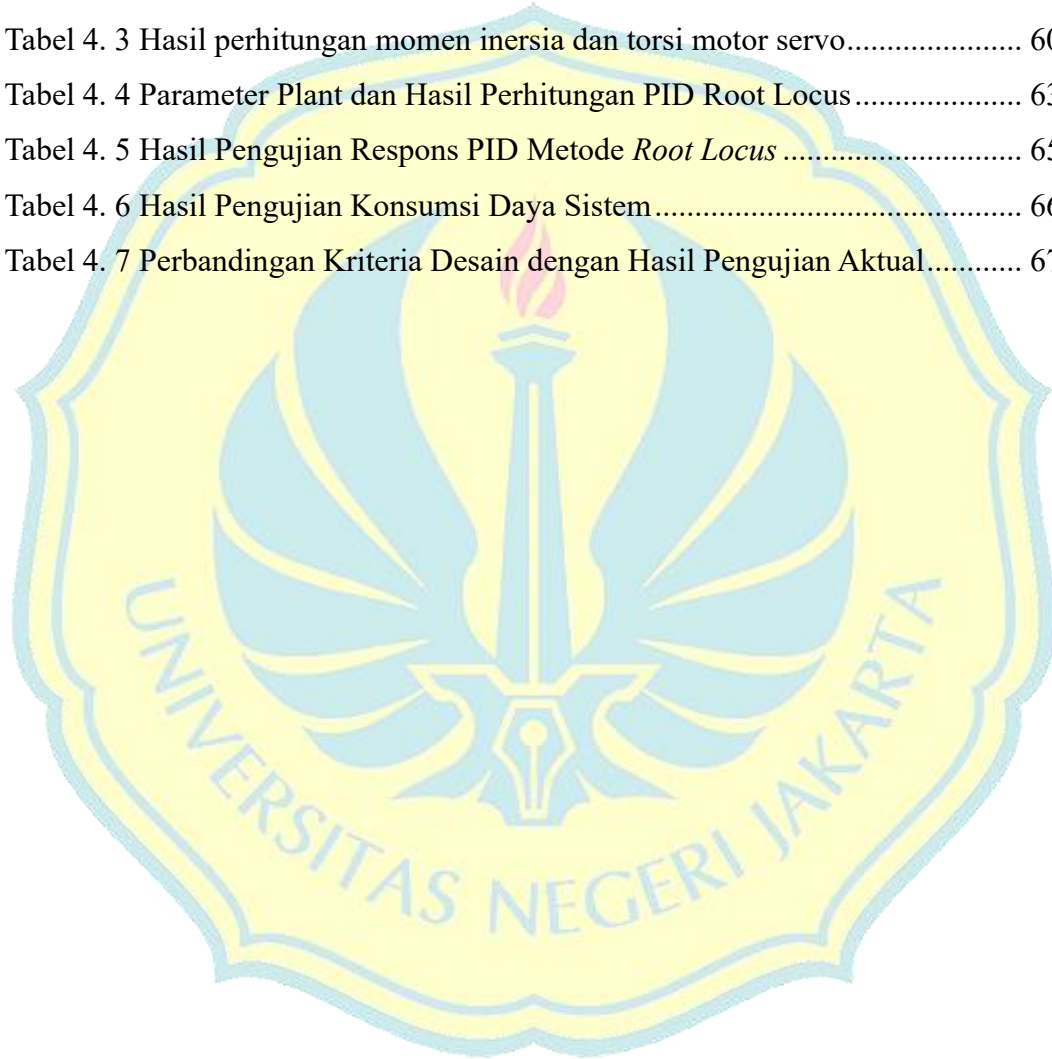
HALAMAN SAMPUL.....	i
LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING TUGAS AKHIR.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN KARYA	iv
PERPUSTAKAAN DAN KEARSIPAN.....	v
LEMBAR PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	5
1.3 Pembatasan Masalah	6
1.4 Perumusan Masalah	6
1.5 Tujuan Penelitian.....	7
1.6 Manfaat Penelitian	7
1.6.1 Manfaat Akademis	7
1.6.2 Manfaat Praktis	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	9
2.1 Kerangka Teoritik.....	9

2.1.1 Stroke dan Rehabilitasi Tangan.....	9
2.1.2 Sistem Kontrol PID.....	11
2.1.3 Soft Robotics untuk Rehabilitasi.....	12
2.1.4 Motor Servo sebagai Aktuator	14
2.1.5 Analisis Perhitungan Inersia dan Torsi Motor Servo MG90S.....	15
2.2 Produk yang Dikembangkan	18
2.3 Penelitian yang Relevan.....	20
2.4 Perbandingan Kontrol PID dengan Metode Kontrol Lain	26
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	30
3.1 Tempat & Waktu Penelitian	30
3.1.1 Tempat Penelitian.....	30
3.1.2 Waktu Penelitian	30
3.2 Metode Pengembangan Produk.....	31
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	33
3.3.1 Perangkat Keras	33
3.3.2 Perangkat Lunak.....	35
3.4 Rancangan Sistem dan Metode Pengembangan.....	35
3.4.1 Rancangan Penelitian.....	37
3.4.2 Implementasi Kendali PID dalam Perancangan.....	39
3.4.3 Diagram Alir Sistem.....	40
3.4.4 Blok Diagram Sistem	41
3.4.5 <i>FlowChart</i> Sistem	42
3.4.6 Rancangan Desain Alat	43
3.5 Instrumen Penelitian	46
3.5.1 Instrumen Pengujian	47
3.6 Teknik Pengumpulan Data	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	50

4.1 Deskripsi Hasil Penelitian	50
4.2 Verifikasi Performa Sistem: Simulasi Kendali PID dan Eksperimen Sistem	52
4.3 Hasil Realisasi dan Pengujian Sistem	56
4.3.1 Hasil Perakitan Sistem Wearable Glove Rehabilitasi Tangan.....	56
4.3.2 Prinsip Kerja Sistem.....	58
4.3.3 Hasil Perhitungan Momen Inersia dan Torsi Motor Servo	59
4.3.4 Hasil Perhitungan Parameter PID: Metode Root Locus (Penempatan Kutub Dominan)	61
4.3.5 Hasil Pengujian dan Tuning PID Gerak Jari (Metode Root Locus).....	64
4.3.6 Hasil Pengujian Konsumsi Daya Sistem Menggunakan INA219.....	66
4.4 Analisis Data Penelitian	67
4.4.1 Analisis Kesesuaian Respons PID terhadap Kriteria Desain	67
4.4.2 Analisis Torsi dan Margin Kapasitas Aktuator.....	68
4.4.3 Analisis Konsumsi Daya Sistem	68
4.4.4 Analisis Ketergantungan Performa terhadap Akurasi Identifikasi Parameter Plant	68
4.5 Pembahasan.....	69
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	71
5.1 Kesimpulan	71
5.2 Saran.....	73
DAFTAR PUSTAKA.....	75
LAMPIRAN.....	78

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian Yang Relevan.....	20
Tabel 2. 2 Perbandingan Kontrol PID dengan Metode Kontrol Lain	26
Tabel 3. 1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian	30
Tabel 3. 2 Spesifikasi Perangkat Keras	34
Tabel 4. 1 Spesifikasi Komponen Purwarupa Sistem Wearable Glove.....	51
Tabel 4. 2 Hasil Perakitan Sistem Wearable Glove.....	57
Tabel 4. 3 Hasil perhitungan momen inersia dan torsi motor servo.....	60
Tabel 4. 4 Parameter Plant dan Hasil Perhitungan PID Root Locus.....	63
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Respons PID Metode <i>Root Locus</i>	65
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Konsumsi Daya Sistem.....	66
Tabel 4. 7 Perbandingan Kriteria Desain dengan Hasil Pengujian Aktual.....	67



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Struktur Anatomi Sendi Tangan	9
Gambar 2. 2 Kontrol PID	11
Gambar 2. 3 Soft Robotics Exoskeleton	13
Gambar 3. 1 Diagram Alir Metode Rekayasa Teknik	32
Gambar 3. 2 Rancangan Sistem dan Metode Pengembangan.....	36
Gambar 3. 3 Diagram Tahapan Pengembangan Sistem	40
Gambar 3. 4 Blok Diagram Sistem	41
Gambar 3. 5 Diagram Alir Sistem.....	43
Gambar 3. 6 Tampak Keseluruhan	44
Gambar 3. 7 Ring Punggung Jari Tangan	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3. 8 Ring Ujung Jari Tangan.....	45
Gambar 3. 9 Gulungan Benang MG90S	45
Gambar 3. 10 Desain Alat full	46
Gambar 4. 1 Foto keseluruhan alat	50
Gambar 4. 2 Simulasi PID Dengan Flex Sensor.....	53
Gambar 4. 3 Konsumsi Daya Sistem	55
Gambar 4. 4 Hasil perakitan sistem wearable glove rehabilitasi tangan.....	57
Gambar 4. 5 Grafik Respons Step Sistem PID Metode Root Locus.....	65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Dokumentasi Proses Pengerjaan alat.....	78
Lampiran 2 Dokumentasi Proses 3D Printing.....	79
Lampiran 3 Program Arduino Sistem Rehabilitasi	80

