

**Desain dan Analisis Mekanisme Kontrol *Exoskeleton* Rehabilitasi
Tangan Paska Stroke**

SOGHI RATU MAPPAKAYA

D022221011



PROGRAM STUDI MEGISTER TEKNIK MESIN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

PENGAJUAN TESIS

**Desain dan Analisis Mekanisme Kontrol *Exoskeleton* Rehabilitasi
Tangan Paska Stroke**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

SOGHI RATU MAPPAKAYA

D022221011

Kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK MESIN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN DAN ANALISIS MEKANISME KONTROL *EXOSKELETON* REHABILITASI TANGAN PASKA STROKE

Disusun dan diajukan oleh

SOGHI RATU MAPPAKAYA

D022221011

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Magister Program Studi Teknik Mesin

Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

pada tanggal 15 Agustus 2024

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui
Komisi Penasehat,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Sc
NIP. 197602162010121002

Pembimbing Pendamping



Fauzali, ST., MT., Ph.D
NIP. 19770103 200801 1 009

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin



Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST.
M.T., IPM., ASEAN. Eng.
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi
Magister Teknik Mesin



Dr. Eng. Novriany Amaliyah, S.T., M.T.
NIP. 197911122008122002

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Soghi Ratu Mappakaya

Nomor mahasiswa : D022221011

Program studi : S2 Teknik Mesin

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Desain dan Analisis Mekanisme Kontrol *Exoskeleton* Rehabilitasi Tangan Paska Stroke” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Sc dan Fauzan, ST., MT., Ph.D). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal/Prosiding (The 2nd International Conference on Marine Research and Technology (ICOMAREST) 2023) sebagai artikel dengan judul “Design And Analysis Of Exoskeleton Control Mechanisms Post-Stroke Hand Rehabilitation”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 16 Agustus-2024



Soghi Ratu Mappakaya

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil'Alamin, puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulisan tesis ini dapat diselesaikan. Gagasan utama dari "Desain dan Analisis Mekanisme Kontrol *Exoskeleton* Rehabilitasi Tangan Paska Stroke" diharapkan dapat diterapkan pada dunia kesehatan, terutama dalam pengembangan alat kesehatan. Mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam bentuk tesis bukanlah hal yang mudah. Namun, berkat bimbingan, arahan, dan motivasi dari berbagai pihak, tesis ini dapat disusun sesuai dengan kaidah-kaidah yang dipersyaratkan. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada diri sendiri yang tetap melanjutkan penulisan tesis sampai akhir, tak lupa juga penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Andi Amijoyo Mochtar, ST., M.Sc. sebagai pembimbing I
2. Bapak Fauzan, ST., MT., Ph.D sebagai pembimbing II
3. Rektor Universitas Hasanuddin dan Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memfasilitasi program magister, serta para dosen dan staf administrasi.

Kepada kedua orang tua tercinta, Mama Aji Surya dan Alm. Bapak Aji Asse, terima kasih atas doa, pengorbanan, dan motivasi yang telah diberikan selama penulis menempuh pendidikan magister. Penghargaan juga disampaikan kepada keluarga besar G17 (Mama Aji, Bapak Baba, Tante Tini, Mba Vina dan saudara-saudara terkasih Asriandi, Agung Jaya Mustika, Imam Buana Nusantara, Budiman Masamba dan Ikha, Asrifa B. Pawe, Ifan B. Pawe, Zahran B. Pawe, dan Raffi Ahmad, serta anak-anakku tersayang Muhammad Kamael Masamba dan Kamila Lembayung Senja Masamba, dan yang terakhir pujaan hati yang selalu menemani dalam suka dan duka.

Terima kasih juga kepada rekan-rekan mahasiswa Program Pasca Sarjana Teknik Mesin, baik senior maupun junior, yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini.

Penulis,
Soghi Ratu Mappakaya

ABSTRAK

SOGHI RATU MAPPAKAYA. Desain dan Analisis Mekanisme Kontrol *Exoskeleton* Rehabilitasi Tangan Paska Stroke (dibimbing oleh **Andi Amijoyo Mochtar** dan **Fauzan**).

Stroke adalah salah satu penyakit dengan dampak signifikan di Indonesia, dengan prevalensi 10,9 per mil menurut Riset Kesehatan Dasar (Riskesdas) 2018. Stroke menduduki posisi ketiga sebagai penyebab utama kematian dan kecacatan global, dengan tingkat kematian 11,6% dan 5,7% tahun hidup yang disesuaikan dengan kecacatan. Penelitian ini berfokus pada pengembangan *exoskeleton* tangan untuk rehabilitasi pasien pasca stroke, yang bertujuan untuk merancang dan menganalisis mekanisme kontrol pergelangan tangan, kekuatan genggam, dan aktivasi kelima jari, sehingga terapi tangan pasien pasca stroke dapat dilakukan secara maksimal. *Exoskeleton* rehabilitasi tangan yang beredar saat ini cenderung terfokus pada peningkatan kekuatan genggam dan kelenturan jari (*power grip* dan *precision grip*), tanpa memperhatikan masalah pergelangan tangan. Penelitian ini merancang *exoskeleton* yang tidak hanya mengatasi aspek genggam tetapi juga memperhatikan pergelangan tangan, memberikan solusi yang lebih sesuai dengan kebutuhan dan preferensi pasien. Desain *exoskeleton* meliputi mekanisme kontrol yang menggunakan motor servo untuk menghasilkan gerakan fleksi dan ekstensi pada jari-jari dan pergelangan tangan. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dengan menyediakan landasan untuk pengembangan *exoskeleton* yang lebih komprehensif dalam rehabilitasi tangan pasca stroke. *Exoskeleton* yang dirancang diharapkan dapat digunakan secara optimal dalam proses rehabilitasi, membantu pasien mengembalikan fungsi motorik tangan yang hilang akibat stroke. Uji klinis lebih lanjut dengan sampel yang lebih besar diperlukan untuk memastikan efektivitas *exoskeleton* dalam rehabilitasi pasien pasca stroke.

Kata kunci: stroke, eksoskeleton tangan, rehabilitasi paska stroke

ABSTRACT

SOGHI RATU MAPPAKAYA. *Design and Analysis of Control Mechanism for Post-Stroke Hand Rehabilitation Exoskeleton* (Supervised by **Andi Amijoyo Mochtar** and **Fauzan**).

Stroke is a disease with a significant impact in Indonesia, with a prevalence of 10.9 per thousand according to the 2018 Basic Health Research (Riskesdas). Stroke ranks third as the leading cause of death and disability globally, with a mortality rate of 11.6% and 5.7% disability-adjusted life years. This study focuses on developing a hand rehabilitation exoskeleton for post-stroke patients, aiming to design and analyze control mechanisms for the wrist, grip strength, and activation of all five fingers, thereby maximizing hand therapy for post-stroke patients. Current hand rehabilitation exoskeletons predominantly focus on enhancing grip strength and finger flexibility (power grip and precision grip) without addressing wrist issues. This study designs an exoskeleton that not only addresses grip aspects but also considers wrist movements, providing a solution that better meets the needs and preferences of patients. The exoskeleton design includes control mechanisms using servo motors to generate flexion and extension movements of the fingers and wrist. This research provides a significant contribution by laying the foundation for developing a more comprehensive exoskeleton for post-stroke hand rehabilitation. The designed exoskeleton is expected to be used optimally in the rehabilitation process, helping patients restore motor functions lost due to stroke. Further clinical trials with larger samples are necessary to ensure the effectiveness of the exoskeleton in rehabilitating post-stroke patients.

Keywords: stroke, hand exoskeleton, post-stroke rehabilitation

DAFTAR ISI

PENGAJUAN TESIS	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA	iii
KATA PENGANTAR	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.1.1 Rehabilitasi tangan paska stroke.....	1
1.1.2 <i>Exoskeleton</i>	2
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Referensi Penelitian.....	5
2.1.1 Stroke	5
2.1.2 Pemulihan fungsi tangan paska stroke.....	6
2.2 <i>Exoskeleton</i> Rehabilitasi	8
2.2.1 <i>Hand Exoskeleton</i>	10
2.2.2 Kombinasi <i>exoskeleton</i> dan jenis terapi stroke	12
2.2.3 Aplikasi klinis <i>exoskeleton</i> dalam bidang rehabilitasi	13
2.3 Tinjauan Mekanisme Gerakan.....	14
2.3.1 Sistem penggerak (aktuator).....	14
2.3.2 Sistem kontrol	17
2.3.3 Sensor.....	18

2.4	<i>Hand Kinematik</i>	19
2.5	<i>Range of Motion</i>	20
2.6	<i>3D-Printing</i>	21
BAB III METODE PENELITIAN		22
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	22
3.2	Spesifikasi Alat dan Bahan.....	22
3.2.1	Alat.....	22
3.2.2	Bahan	25
3.2.3	Software Perancangan	26
3.3	Rancangan Penelitian	26
3.4	Prosedur Penelitian.....	27
3.5	Diagram Alir Penelitian	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	<i>Exoskeleton</i> Rehabilitasi Tangan.....	29
4.2	Desain <i>Exoskeleton</i> untuk mengaktifkan 5 jari.....	30
4.3	Mekanisme Kontrol <i>Wrist</i> Pada <i>Exoskeleton</i>	36
4.4	Mekanisme Kontrol <i>Power Grip</i> Dan <i>Precision Grip</i> Pada <i>Exoskeleton</i>	40
4.5	Simulasi Dan Pengujian	41
4.5.1	Gaya hasil simulasi dan pengujian	44
4.5.2	Tegangan ekuivalen (von-mises) hasil simulasi dan pengujian	46
4.5.3	Regangan elastis ekuivalen hasil simulasi dan pengujian	48
4.5.4	Deformasi hasil simulasi dan pengujian	50
4.5.5	Safety factor hasil simulasi dan pengujian.....	52
BAB V PENUTUP		55
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran	56
DAFTAR PUSTAKA		57
LAMPIRAN		57

DAFTAR TABEL

Tabel 1. ROM wrist joint segment (Chyntia, C. at al., 2016)	8
Tabel 2. Daftar Penelitian Exoskeleton	10
Tabel 3. ROM setiap jari yang sehat (Kabir, R. at al., 2022).....	20
Tabel 4. Tinjauan material untuk rangka exoskeleton (Mahardika, P.S. 2018).....	21
Tabel 5. Variable parameter pengujian	26
Tabel 6. Antropometr tangan orang Indonesia dalam mm (Azmi, 2020).....	30
Tabel 7. ROM Jari Hand Exoskeleton	32
Tabel 8. DH Parameters dari ibu jari	33
Tabel 9. D-H Parameters dari jari telunjuk	33
Tabel 10. D-H Parameters dari jari tengah	34
Tabel 11. D-H Parameters dari jari manis	34
Tabel 12. D-H Parameters dari jari kelingking	34
Tabel 13. Posisi akhir jari dalam sumbu x dan y	35
Tabel 14. ROM Pergelangan Hand Exoskeleton	37
Tabel 15. DH Parameters dari pergelangan	38
Tabel 16. Posisi akhir pergelangan dalam sumbu x dan y	38
Tabel 17. Pergerakan wrist	40
Tabel 18. Pergerakan Jari	41
Tabel 19. Mechanical Properties PLA (Mustofa, R. dkk. (2022).....	42
Tabel 20. Gaya	44
Tabel 21. Deviasi hasil gaya simulasi dan pengujian.....	45
Tabel 22. Tegangan von-mises ekstensi	46
Tabel 23. Regangan ekstensi	48
Tabel 24. Regangan Fleksi	49
Tabel 25. Total deformasi ekstensi	50
Tabel 26. Total Deformasi Fleksi	51
Tabel 27. Safety Factor Ekstensi	52
Tabel 28. Safety Factor Fleksi	53

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Wrist (Braddom's, 2020)	8
Gambar 2. Robotic method with mirror hand (Liang, C. at al., 2022)	12
Gambar 3. Exoskeleton dengan kontrol otot pengguna (Mahardhika, P.S. 2018).....	13
Gambar 4. Terapi berbasis permainan (Yang, S.H. at al., 2021).....	13
Gambar 5. Creality Ender 3 V2	22
Gambar 6. Neraca pegas	22
Gambar 7. Mikrokontrol Arduino mega	23
Gambar 8. Sensor Rotary.....	23
Gambar 9. Servo MG996R.....	24
Gambar 10. Servo TD-8135MG	24
Gambar 11. Goniometer	24
Gambar 12. Digital Hand dynamometer	25
Gambar 13. Filament PLA.....	25
Gambar 14. Korea wax cord diameter 1 mm	25
Gambar 15. Tali push pull diameter 2.5 mm	26
Gambar 16. Hand Exoskeleton Rehabilitasi	29
Gambar 17. Desain exoskeleton rehabilitasi tangan paska stroke	31
Gambar 18. Cincin jari	32
Gambar 19. Link and joints jari hand exoskeleton.....	33
Gambar 20. Wrist dalam keadaan fleksi	37
Gambar 21. Link and joint Pergelangan Hand Exoskeleton	38
Gambar 22. Lengan servo.....	39
Gambar 23. Alat pengunci.....	40
Gambar 24. Mesh Pergelangan	42
Gambar 25. Mesh Ibu Jari	42
Gambar 26. Mesh Jari Telunjuk	43
Gambar 27. Mesh jari Tengah	43
Gambar 28. Mesh Jari Manis.....	43
Gambar 29. Mesh Jari Kelingking	44
Gambar 30. Grafik Gaya	45
Gambar 31. Grafik Tegangan von-Mises Ekstensi	46
Gambar 32. Grafik Tegangan von-Mises Fleksi.....	47
Gambar 33. Grafik Regangan Ekstensi	48
Gambar 34. Grafik Regangan Fleksi	49
Gambar 35. Grafik Total Deformasi Ekstensi	50
Gambar 36. Grafik Total Deformasi Fleksi	51
Gambar 37. Grafik Safety Factor Ekstensi	52
Gambar 38. Grafik Safety Factor Fleksi.....	53

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Jadwal Penelitian	60
Lampiran 2 Desain Pertama Exoskeleton.....	61
Lampiran 3 Desain Kedua Exoskeleton	61
Lampiran 4 Proses Cetak Lengan Servo Exoskeleton	62
Lampiran 5 Proses Cetak Penutup Servo	63
Lampiran 6 Hasil Cetak Exoskeleton	64
Lampiran 7 Cetak 2 Cincin Jari Exoskeleton	64
Lampiran 8 Cetak 3 Cincin Jari Exoskeleton	65
Lampiran 9 Lengan Servo Bulat	65
Lampiran 10 Alur Tali Desain Pertama.....	66
Lampiran 11 Alur Tali Desain Kedua	66
Lampiran 12 Alur Tali Desain Ketiga	66
Lampiran 13 Bracket Servo Desain Pertama.....	67
Lampiran 14 Bracket Servo Desain Kedua	67
Lampiran 15 Box Kontrol	68
Lampiran 16 Program Mekanisme Gerak	69
Lampiran 17 Proses Uji Tarik Tali Push Pull.....	77
Lampiran 18 Tali Push Pull Uji Tarik	78
Lampiran 19 Tabel Uji Tarik Tali Push Pull 1	79
Lampiran 20 Tabel Uji Tarik Tali Push Pull 2	81
Lampiran 21 Tabel Uji Tarik Tali Push Pull 3	83
Lampiran 22 Proses Uji Tarik Tali Wax Cord.....	85
Lampiran 23 Tali Wax Cord Uji Tarik.....	86
Lampiran 24 Tabel Uji Tarik Tali Wax Cord 1	87
Lampiran 25 Tabel Uji Tarik Tali Wax Cord 2	89
Lampiran 26 Ibu Jari Total Deforma Ekstensi	91
Lampiran 27 Ibu Jari Regangan Ekstensi	91
Lampiran 28 Ibu Jari Tegangan Von Mises Ekstensi	91
Lampiran 29 Ibu Jari Safety Factor Ekstensi.....	92
Lampiran 30 Jari telunjuk Total Deformasi Ekstensi	92
Lampiran 31 Jari telunjuk Regangan Ekstensi	92
Lampiran 32 Jari Telunjuk Tegangan Von Mises Ekstensi	93
Lampiran 33 Jari Telunjuk Safety Factor Ekstensi.....	93
Lampiran 34 Jari Tengah Total Deformasi Ekstensi	93
Lampiran 35 Jari Tengah Regangan Ekstensi	94
Lampiran 36 Jari Tengah Tegangan Von Mises Ekstensi.....	94
Lampiran 37 Jari Tengah Safety Factor Ekstensi	94
Lampiran 38 Jari Manis Total Deformasi Ekstensi	95
Lampiran 39 Jari Manis Regangan Ekstensi	95
Lampiran 40 Jari Manis Tegangan Von Mises Ekstensi	95
Lampiran 41 Jari Manis Safety Factor Ekstensi	96
Lampiran 42 Jari Kelingking Total Deformasi Ekstensi	96
Lampiran 43 Jari Kelingking Regangan Ekstensi.....	96
Lampiran 44 Jari Kelingking Tegangan Von Mises Ekstensi.....	97
Lampiran 45 Jari kelingking Safety Factor Ekstensi	97
Lampiran 46 Pergelangan Total Deformasi Ekstensi	97

Lampiran 47 Pergelangan Regangan Ekstensi	98
Lampiran 48 Pergelangan Tegangan Von Mises Ekstensi.....	98
Lampiran 49 Pergelangan Safety Factor Ekstensi	98
Lampiran 50. Ibu Jari Tegangan von-Mises Fleksi	99
Lampiran 51. Ibu Jari Regangan Fleksi.....	99
Lampiran 52. Ibu Jari Total Deformasi Fleksi.....	99
Lampiran 53. Ibu Jari Safety factor Fleksi	100
Lampiran 54. Jari Telunjuk Tegangan von-Mises Fleksi	100
Lampiran 55. Jari Telunjuk Regangan Fleksi.....	100
Lampiran 56. Jari Telunjuk Total Deformasi Fleksi.....	101
Lampiran 57. Jari Telunjuk Safety Factor Fleksi	101
Lampiran 58. Jari Tengah Tegangan von-Mises Fleksi.....	101
Lampiran 59. Jari Tengah Regangan Fleksi	102
Lampiran 60. Jari Tengah Total Deformasi Fleksi	102
Lampiran 61. Jari Tengah Safety Factor Fleksi.....	102
Lampiran 62. Jari Manis Tegangan von-Misen Fleksi	103
Lampiran 63. Jari Manis Regangan Fleksi	103
Lampiran 64. Jari Manis Total Deformasi Fleksi.....	103
Lampiran 65. Jari Manis Safety Factor Fleksi.....	104
Lampiran 66. Jari Kelingking Tegangan von-Mises Fleksi.....	104
Lampiran 67. Jari Kelingking Regangan Fleksi	104
Lampiran 68. Jari Kelingking Total Deformasi Fleksi	105
Lampiran 69. Jari Kelingking Safety Factor Fleksi.....	105
Lampiran 70. Pergelangan Tegangan von-Mises Fleksi.....	105
Lampiran 71. Pergelangan Regangan Fleksi	106
Lampiran 72 Pergelangan Total Deformasi Fleksi	106
Lampiran 73 Pergelangan Safety Factor Fleksi.....	106

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

1.1.1 Rehabilitasi tangan paska stroke

Rehabilitasi paska stroke merupakan suatu program pemulihan bagi pasien paska stroke dengan tujuan mempelajari kembali keterampilan yang tiba-tiba hilang akibat serangan stroke yang diderita. Program rehabilitasi bertujuan membantu pasien paska stroke kembali berintegrasi ke dalam masyarakat dengan mempertimbangkan kondisi kesehatan yang ada. Selain itu, rehabilitasi paska stroke juga berfungsi untuk mencegah atau mengurangi risiko timbulnya masalah kesehatan baru yang terkait dengan stroke.

Dalam proses rehabilitasi paska stroke, terdapat dua pendekatan yang dapat diambil. Pendekatan aktif yaitu pasien paska stroke yang secara mandiri menggunakan kekuatan otot untuk melakukan gerakan terapi dan pendekatan pasif melibatkan bantuan dari fisioterapis atau alat rehabilitasi dalam pelaksanaan gerakan terapi (Hasanah, M. dkk., 2019).

Rehabilitasi paska stroke memegang peran penting dalam upaya pemulihan dan peningkatan kualitas hidup setelah mengalami serangan stroke. Program rehabilitasi berfokus pada pemulihan fungsi motorik tubuh yang terpengaruh akibat stroke. Latihan yang disusun khusus dalam rehabilitasi bertujuan untuk memperbaiki kekuatan otot, koordinasi gerakan, dan kelenturan tubuh. Selain itu, rehabilitasi gerakan juga membantu pasien paska stroke untuk kembali mandiri dalam melakukan aktivitas sehari-hari seperti berjalan, berpakaian, dan lainnya. Upaya ini juga berkontribusi dalam mencegah terjadinya penyusutan otot yang sering terjadi pada pasien paska stroke. Melalui latihan gerakan dan teknik yang tepat, rehabilitasi dapat meminimalkan ketidaknyamanan dan nyeri yang mungkin dialami pasien paska stroke. Selain manfaat fisik, program rehabilitasi juga membantu meningkatkan keseimbangan dan koordinasi gerakan, yang sering kali terganggu paska stroke.

1.1.2 *Exoskeleton*

Selama beberapa dekade terakhir, terjadi kemajuan pesat dalam perkembangan teknologi robot rehabilitasi. Saat ini, robot mampu memberikan bantuan kepada pasien yang menderita penyakit syaraf, seperti stroke dan lainnya, untuk memulihkan fungsi sendi dan otot melalui proses rehabilitasi.

Exoskeleton merupakan kerangka alat yang dirancang untuk dipasang pada sarung tangan dengan tujuan melatih dan meningkatkan kemampuan gerakan menggenggam manusia. Perangkat ini bekerja dengan memanfaatkan tenaga eksternal untuk memperkuat daya genggam tangan penggunanya. Dengan kata lain, *exoskeleton* bertindak sebagai penunjang atau pelengkap yang memberikan dukungan dan bantuan eksternal untuk memperbaiki atau meningkatkan fungsi motorik tangan. (Isyrofie, A.I.F.A. dkk, 2020)

Hand exoskeleton, adalah perangkat mekanik yang dirancang untuk dipakai di tangan manusia untuk membantu atau meningkatkan kemampuan gerakan dan kekuatan tangan. *Hand exoskeleton* memberikan dukungan atau bantuan kepada individu dengan keterbatasan fungsional pada tangan, seperti mereka yang mengalami cedera tulang belakang (*spinal cord injury*) atau stroke, yang mungkin mengalami kesulitan dalam melakukan aktivitas sehari-hari yang melibatkan gerakan tangan dan jari. (Yu, S. at al., 2019).

Exoskeleton sebagai alat rehabilitasi pasien paska stroke dapat digunakan secara mandiri, juga membantu dalam kemampuan fungsional tangan pasien paska stroke. *Hand exoskeleton* pada umumnya memiliki 2 jenis pengontrolan, yaitu otot pasien paska stroke dan penggunaan sistem kontrol. *Exoskeleton* dengan pengontrol otot merupakan alat bantu terapi yang menggunakan kekuatan otot pasien paska stroke itu sendiri untuk menggerakkan tangan, *exoskeleton* jenis ini cenderung terbatas penggunaannya sebagai alat rehabilitasi aktif. Sedangkan *exoskeleton* dengan penggunaan sistem kontrol menggunakan aktuator untuk menggerakkan jari. (Mahardhika, P.S. 2018)

Hand exoskeleton pada penelitian sebelumnya memiliki keterbatasan gerak dalam proses terapi yaitu gerakan terapi hanya terbatas pada *power grip* atau

precision grip saja, terapi pada pergelangan tangan (*wrist*) masih sangat kurang. Penelitian dengan judul Desain dan Analisis Mekanisme Kontrol *Exoskeleton* Rehabilitasi Tangan Pasien Paska Stroke dengan novelti mengembangkan alat rehabilitasi paska stroke dengan memvariasikan beberapa gerakan kontrol pada pergelangan hingga jari (*wrist*, *power grip*, dan *precision grip*) berdasarkan *Range of Motion* (ROM). Melalui penelitian ini, penulis sangat berharap penelitian ini dapat menjadi referensi untuk penelitian-penelitian berikutnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari permasalahan pada latar belakang yang telah dibahas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana mendesain dan merancang *exoskeleton* untuk mengaktifkan 5 jari?
2. Bagaimana mekanisme sistem kontrol untuk menggerakkan *wrist* pada *exoskeleton*?
3. Bagaimana mekanisme sistem kontrol untuk menggerakkan *power grip* dan *precision grip* pada *exoskeleton*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yang akan dilakukan oleh penulis, sebagai berikut:

1. Mendesain dan merancang *exoskeleton* untuk mengaktifkan 5 jari.
2. Menganalisa mekanisme sistem kontrol *wrist* pada *exoskeleton*.
3. Menganalisa mekanisme sistem kontrol *power grip* dan *precision grip* pada *exoskeleton*.

1.4 Batasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan batasan masalah untuk membatasi asumsi – asumsi parameter yang pengaruhnya sangat kecil. Adapun batasan masalah yang dimaksud adalah sebagai berikut:

1. *Exoskeleton* rehabilitasi tangan digunakan untuk rehabilitasi paska stroke
2. *Exoskeleton* rehabilitasi tangan yang dirancang untuk melatih juga menambah kemampuan menggenggam, dan menggerakkan pergelangan tangan pada pasien paska stroke.
3. Didesain agar dapat digunakan pasien paska stroke secara mandiri di rumah.
4. *Exoskeleton* rehabilitasi tangan digunakan untuk salah satu sisi tangan yang terserang stroke (*hemiparesis/hemiplegia*), pada penelitian ini terkhusus pada tangan kanan.
5. Pada penelitian ini tidak meneliti tentang material yang digunakan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan hasil rehabilitasi otot tangan yang lebih baik dengan penggunaan *exoskeleton* rehabilitasi tangan.
2. Membantu kemampuan menggenggam, menggerakkan pergelangan, dan menggerakkan jari secara berurutan pada pasien Paska stroke.
3. Mempercepat proses penyembuhan dan pengembalian kelenturan jari yang hilang.
4. Memberikan kemudahan pasien paska stroke untuk melakukan rehabilitasi secara mandiri.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Referensi Penelitian

2.1.1 Stroke

Stroke merupakan suatu kondisi yang digunakan untuk menjelaskan perubahan neurologik yang disebabkan oleh gangguan dalam sirkulasi darah ke bagian otak (Rahmadani, E. dan Rustandi, H. 2019). Stroke adalah penyakit pembuluh darah otak, stroke menurut *World Health Organization* (WHO) yang dikutip oleh (Hastuty, D. 2023) didefinisikan sebagai tanda-tanda klinis yang terjadi secara cepat atau mendadak berupa defisit fokal pada fungsi otak, dengan gejala yang berlangsung selama 24 jam atau lebih dan menyebabkan kematian, tanpa penyebab yang jelas selain penyebab vaskular. Adapun menurut Pedoman Nasional Pelayanan Kedokteran (PNPK) tata laksana stroke 2019 yang dikutip oleh (Hastuty, D. 2023) mendefinisikan stroke sebagai manifestasi klinis akut akibat disfungsi neurologis pada otak, medula spinalis, dan retina baik sebagian atau menyeluruh yang menetap selama 224 jam atau menimbulkan kematian akibat gangguan pembuluh darah.

Stroke menempati posisi tiga besar sebagai penyebab utama kematian dan kecacatan di seluruh dunia, setelah gangguan neonatal dan penyakit jantung iskemik, dengan angka kematian mencapai 11,6% dan kecacatan disesuaikan dengan tahun hidup (disability-adjusted life-years atau DALYs) sebesar 5,7% (Feigin, 2019). Data Riskesdas 2018 menunjukkan bahwa prevalensi stroke mencapai 10,9 per mil, dengan prevalensi tertinggi di Provinsi Kalimantan Timur (14,7 per mil) dan terendah di Provinsi Papua (4,1 per mil). Menurut Badan Penyelenggara Jaminan Sosial (BPJS) Kesehatan, pada tahun 2016, biaya pelayanan kesehatan untuk stroke mencapai 1,43 triliun rupiah. Angka ini meningkat menjadi 2,18 triliun rupiah pada tahun 2017 dan mencapai 2,56 triliun rupiah pada tahun 2018 (KEMENKES RI, 2019). Di Provinsi Sulawesi Selatan, prevalensi stroke mencakup 10,6% dari seluruh wilayah Indonesia, dengan prevalensi tertinggi pada kelompok usia ≥ 75 tahun (48,2%) (RISKESDAS, 2018). Adapun tujuan perawatan stroke menurut Perdosri, (2014) dalam Kurniawan,

S. (2024) adalah mengurangi kerusakan otak dan mengoptimalkan pemulihan pasien. "Rantai Kelangsungan Hidup Stroke" yang berfokus pada komunitas mencakup tindakan yang harus dilakukan oleh pasien, keluarga, dan penyedia layanan kesehatan untuk memaksimalkan pemulihan stroke, termasuk di dalamnya adalah manajemen rehabilitasi.

2.1.2 Pemulihan fungsi tangan paska stroke

Proses rehabilitasi pemulihan fungsi tangan paska stroke diharapkan pasien untuk mendapatkan kembali penggunaan fungsi tangan. Rehabilitasi stroke untuk mengurangi dampak cacat fisik harus dimulai secepat mungkin dengan pendekatan yang cepat dan tepat. Tindakan awal ini diharapkan dapat mempercepat dan meningkatkan proses pemulihan fisik secara optimal, sambil mencegah terjadinya kelemahan otot yang mungkin terjadi. (Arnanda, R. 2022).

Perdosri (2014) dalam Kurniawan, S. (2024) Rehabilitasi stroke adalah pengelolaan medis dan rehabilitasi yang menyeluruh terhadap disabilitas yang disebabkan oleh stroke melalui pendekatan neurorehabilitasi. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan pemulihan atau memodifikasi gejala sisa agar penderita stroke dapat melakukan aktivitas fungsional secara mandiri, beradaptasi dengan lingkungan, dan mencapai kualitas hidup yang baik. Pemulihan fungsi tangan pasca stroke dibagi menjadi tiga fase yaitu fase akut, fase subakut, dan fase kronis, di mana masing-masing fase memiliki tujuan dan metode rehabilitasi yang berbeda.

2.1.2.1 Fase rehabilitasi stroke akut

Fase akut stroke ditandai dengan kondisi hemodinamik dan neurologis yang belum stabil. Fase ini berlangsung dari beberapa hari hingga dua minggu pasca stroke, tergantung pada jenis dan tingkat keparahan stroke yang dialami. Perdosri (2014) dalam Kurniawan, S. (2024).

Intervensi dalam Kedokteran Fisik dan Rehabilitasi pada fase akut bertujuan untuk meminimalkan gejala sisa dengan membantu memperbaiki perfusi otak dan mencegah komplikasi yang dapat terjadi akibat stroke atau imobilisasi. Tujuan utamanya adalah mencapai pemulihan fungsional yang optimal Perdosri (2014) dalam

Kurniawan, S. (2024).

Tindakan rehabilitasi medik pada fase ini difokuskan untuk mengurangi disabilitas akibat stroke dan meningkatkan pemulihan fungsional dengan membantu memperbaiki perfusi otak dan mencegah komplikasi akibat stroke dan tirah baring. Kemampuan untuk memulai mobilisasi pasien sedini mungkin sesuai kondisi medisnya merupakan faktor penting dalam keberhasilan rehabilitasi. Perdosri (2014) dalam Kurniawan, S. (2024).

2.1.2.2 Fase rehabilitasi stroke sub-akut

Fase subakut stroke ditandai dengan kondisi medis dan hemodinamik yang stabil, serta adanya proses pemulihan dan reorganisasi pada sistem saraf. Fase ini biasanya berlangsung dari dua minggu hingga enam bulan pasca stroke dan merupakan periode penting untuk pemulihan fungsional (periode emas). Pasien stroke pada fase subakut dapat mengikuti program rehabilitasi medik sebagai pasien rawat jalan atau rawat inap Perdosri (2014) dalam Kurniawan, S. (2024).

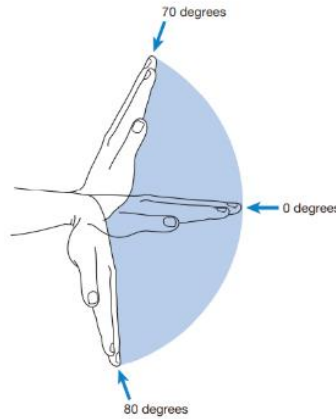
Tujuan rehabilitasi pada fase subakut adalah untuk mengoptimalkan pemulihan kemampuan fungsional berdasarkan motor re-learning dan plastisitas otak, sehingga pasien dapat melakukan aktivitas sehari-hari dan menjalankan peran mereka secara mandiri Perdosri (2014) dalam Kurniawan, S. (2024).

2.1.2.3 Fase rehabilitasi stroke kronik

Fase kronis stroke ditandai dengan terbentuknya reorganisasi sistem saraf, di mana pemulihan lebih lanjut didasarkan pada adaptasi dan kompensasi terhadap disabilitas yang ada. Fase ini biasanya terjadi setelah enam bulan pasca stroke. Pada fase ini, pasien diharapkan dapat memaksimalkan fungsi motorik yang ada. Penelitian menunjukkan bahwa kunci untuk memaksimalkan pemulihan fungsional pada fase kronis adalah dengan menggabungkan berbagai pendekatan terapi. Perdosri (2014) dalam Kurniawan, S. (2024). Berikut beberapa gerakan terapi:

1. Latihan peregangan (*wrist*) meningkatkan aliran darah dan membuat pasien lebih mudah untuk menggerakkan tangan, terapi dimulai dengan meregangkan tangan, dengan pelan secara fleksi dan ekstensi. Adapun, fleksi pergelangan tangan adalah gerakan di mana pergelangan tangan ditekuk ke arah lengan bawah,

menyebabkan jari-jari mendekati lengan. Sedangkan, ekstensi pergelangan tangan terjadi saat pergelangan tangan diluruskan sehingga jari-jari menjauhi lengan bawah.



Gambar 1. *Wrist* (Braddom's, 2020)

Tabel 1. *ROM wrist joint segment* (Chyntia, C. at al., 2016)

<i>Movement</i>	<i>Degree (°)</i>
<i>Extension</i>	70
<i>Fleksion</i>	80

2. Latihan otot untuk menguatkan otot-otot tangan pasien paska stroke sehingga akan meningkatkan kekuatan genggamam, dan kemampuan menggunakan tangan.

2.2 *Exoskeleton* Rehabilitasi

Exoskeleton mekanik telah ada setidaknya sejak akhir abad kedelapan belas. Namun, contoh pertama *exoskeleton* yang berfungsi baru muncul pada tahun 1930-an. Pada tahun 1950-an, ada penelitian yang berfokus pada pengembangan mekatronika untuk kerangka luar. Kemudian, pada 1960-an, Departemen Pertahanan AS mulai mengembangkan sistem *exoskeleton* dan general electric untuk mengembangkan robot yang dapat dikenakan. Selanjutnya, pada tahun 1990-an ketika kemajuan teknologi material memungkinkan pengembangan rangka luar yang lebih ringan dan lebih kuat. (Fox, S. at al., 2019)

Alat rehabilitasi dengan bantuan robot atau yang bisa disebut *exoskeleton* adalah sistem robotik mekanis yang dipasang di luar tubuh, serta mempunyai sistem sendi

dan sambungan yang sesuai dengan tubuh manusia. Exoskeleton dinilai sangat potensial untuk rehabilitasi terapi fisik, yang mana pelatihannya dapat mengembalikan kemampuan fungsi gerak yang hilang. Sari, R.K. dan Kuswanto, D. (2020).

Menurut Troncossi, M. yang dikutip oleh Mahardhika, P.S. (2018) *Exoskeleton* pada tangan adalah perangkat mekanis yang dipasang di luar tangan manusia. Perangkat ini memungkinkan hubungan antara tangan manusia dan komponen robotik, sehingga memungkinkan gerakan yang terkoordinasi antara keduanya.

Pada prinsipnya *hand exoskeleton* dirancang untuk meningkatkan atau menggantikan fungsi motorik tangan menggunakan struktur mekanik yang memberikan dukungan pergerakan, serta kekuatan tambahan pada pasien pengguna hand exoskeleton. Hand exoskeleton juga mereplikasi gerakan alami pada tangan menggunakan teknologi seperti sensor, motor, aktuator, dan kontrol.

2.2.1 Hand Exoskeleton

Tabel 2. Daftar Penelitian *Exoskeleton*

<i>Exoskeleton</i>	Tahun	Sistem kontrol	Mekanisme
	2018	Mikrokontroller	<i>Soft-actuator</i> untuk masing-masing jari berperan sebagai otot buatan dimana suplai udara untuk setiap <i>soft-actuator</i> diberikan melalui saluran udara yang berbeda yang berfungsi untuk membuka dan menutup jari.
	2018	Mikrokontroller	Menggunakan motor servo sebagai sistem penggerak yang menarik senar gitar (sistem reel) untuk menggerakkan mekanisme power grip.
	2019	Mikrokontroller	Menggunakan aktuator pneumatik tekanan udara untuk menghasilkan gerakan.
	2019	Kontrol arus pada aktuator	Menggunakan mekanisme transmisi kabel dan motor listrik per phalange untuk menggerakkan fleksi dan ekstensi jari.
	2020	Mikrokontroller	Menggunakan motor stepper yang mendapatkan input dari mikrokontroller, <i>hand exoskeleton</i> ini berfokus pada fleksi dan ekstensi jari telunjuk dan jari manis.
	2020	Mikrokontroller	Bagian dalam rangka memiliki sarung tangan yang terhubung dengan kabel kemudian ditarik oleh motor servo dan pegas, dan jari akan bergerak secara fleksi dan ekstensi.

	2020	Mikrokontroller	<i>Hero grip glove</i> menghasilkan fleksi pada jari telunjuk dan jari tengah sebagai penyangga dan bantuan ibu jari dengan memperpanjang aktuator pergelangan tangan dan menarik kembali aktuator pergelangan tangan. Pembacaan nilai jarak oleh sensor IR untuk deteksi objek, perintah menggerakkan DC motor dengan encoder untuk melakukan gerak fleksi.
	2021	Mikrokontroller	Fleksi dan ekstensi setiap jari dikendalikan oleh mekanisme dorong dan tarik yang digerakkan oleh kabel sebagai aktuator yang tersambung pada motor servo.
	2022	Mikrokontroller	Menggunakan aktuator dari udara yang terkompresi dan menghasilkan gerakan ekstensi dan fleksi.
	2022	Mikrokontroller	Menggunakan aktuator pneumatik tekanan gas untuk menghasilkan gerakan fleksi dan ekstensi (<i>power grip</i>).
	2022	Sakelar kontrol	Sistem hoist dan kabel mentransmisikan gaya tergantung pada kekuatan yang diperlukan untuk mencengkram suatu objek. Sensor resistor yang sensitif terhadap gaya yang digunakan untuk menentukan cengkraman (<i>precision grip</i>).
	2022	Mikrokontroller	Sebuah aktuator tunggal motor servo menggerakkan empat jari melalui sistem transmisi kaku yang digabungkan ke punggung tangan, agar telapak tangan tetap bebas.

2.2.2 Kombinasi *exoskeleton* dan jenis terapi stroke

Kombinasi *exoskeleton* dengan jenis terapi stroke yang lainnya memberikan manfaat pemulihan paska stroke secara signifikan. *Hand exoskeleton* memberikan dukungan juga bantuan fisik dalam gerakan tangan yang terdampak stroke, serta memungkinkan pasien untuk melatih gerakan yang terdampak dengan lebih efektif. Adapun kombinasi *hand exoskeleton* dan jenis terapi stroke yang lainnya sbb:

1. *Hand Exoskeleton dan Mirror Therapy*

Terapi ini merupakan kombinasi penggunaan cermin dan *exoskeleton* secara bersamaan. Pasien melihat refleksi tangan yang sehat dalam cermin yang ditempatkan di depan tangan yang terdampak stroke. Sementara itu, pasien mengenakan *exoskeleton* pada tangan yang terkena stroke untuk bantuan gerakan sesuai dengan gerakan tangan yang sehat. Terapi ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman visual-motorik dan merangsang gerakan pada tangan yang terkena stroke (Liang, C. at al., 2022).



Gambar 2. *Robotic method with mirror hand* (Liang, C. at al., 2022)

2. *Self-Initiated Movement Therapy*

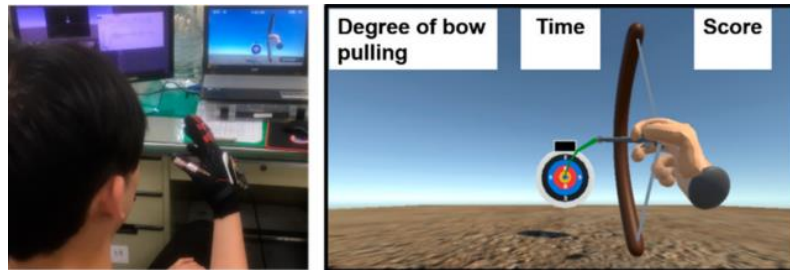
Terapi ini melibatkan penggunaan *exoskeleton* yang dirancang untuk merespons gerakan tangan pasien. *Exoskeleton* mengenali gerakan tangan yang tersisa dan memberikan dukungan atau bantuan dalam gerakan yang terganggu. Dengan latihan berulang, terapi ini membantu memperbaiki koordinasi gerakan dan memulihkan fungsi motorik pada tangan yang terkena stroke (Mahardhika, P.S. 2018).



Gambar 3. *Exoskeleton* dengan kontrol otot pengguna (Mahardhika, P.S. 2018)

3. *Game-Based Therapy*

Terapi ini menggabungkan terapi permainan interaktif dengan penggunaan *hand exoskeleton*. Pasien menggunakan *exoskeleton* pada tangan yang terdampak stroke untuk berpartisipasi dalam permainan yang mengharuskan gerakan tangan yang terkoordinasi. Terapi ini bertujuan untuk meningkatkan motivasi dan keterlibatan pasien dalam proses pemulihan, sambil memperbaiki koordinasi gerakan dan fungsi motorik (Yang, S.H. at al., 2021).



Gambar 4. Terapi berbasis permainan (Yang, S.H. at al., 2021)

2.2.3 Aplikasi klinis *exoskeleton* dalam bidang rehabilitasi

1. Pemulihan paska stroke

Stroke dapat menyebabkan gangguan motorik pada satu sisi tubuh (*hemiplegia*), termasuk tangan, lengan, wajah, dan kaki (Taufiqurrahman, A. 2018). Penggunaan *exoskeleton* dalam rehabilitasi paska stroke dapat melatih gerakan tangan yang terdampak stroke (Yumna, H. 2021). *Exoskeleton* memungkinkan pasien untuk melaksanakan latihan yang terkontrol, sehingga memperkuat jalur saraf yang terganggu dan memperbaiki koneksi otak-tubuh yang terputus akibat stroke. Manfaat dari penggunaan *exoskeleton* meliputi perbaikan kemampuan motorik, peningkatan

kemandirian dalam melakukan aktivitas sehari-hari, dan peningkatan kepercayaan diri (Mahardhika, P.S. 2018).

2. Pemulihan cedera *spinal cord*

Cedera *spinal cord* dapat menyebabkan kehilangan fungsi motorik dan sensorik. *Exoskeleton* dapat membantu pengguna dengan cedera *spinal cord* untuk memulihkan atau memperbaiki kemampuan bergerak. Dengan menggunakan *exoskeleton*, pasien dapat melakukan gerakan yang terkendali dan didukung oleh sistem mekanis (Dinata, dan Yasa. 2021). Hal ini memungkinkan pasien untuk melatih otot-otot yang tidak terdampak cedera, meningkatkan kekuatan dan koordinasi, dan meningkatkan kemandirian dalam aktivitas sehari-hari.

3. Rehabilitasi kelainan neurologis

Exoskeleton juga digunakan dalam rehabilitasi kelainan neurologis lainnya, seperti *multiple sclerosis*, *cerebral palsy*, dan *parkinson*. Pada kelainan neurologis, *exoskeleton* membantu pasien untuk melatih gerakan yang terganggu, mengurangi kelelahan, dan meningkatkan kontrol motorik. Pasien dapat melakukan latihan terkendali dengan dukungan dan bantuan *exoskeleton*, sehingga meningkatkan kualitas hidup dan kemandirian (Hastuty, D. 2023).

2.3 Tinjauan Mekanisme Gerakan

2.3.1 Sistem penggerak (aktuator)

Aktuator adalah perangkat yang mengubah energi listrik, hidraulis, pneumatik, atau mekanik menjadi gerakan dan memberikan gaya atau torsi yang diperlukan untuk menggerakkan sendi atau anggota tubuh yang terpasang pada *exoskeleton* (Rachmawan, I.P.S. 2020). Terdapat beberapa jenis aktuator yang umum digunakan dalam *exoskeleton*:

1. Aktuator listrik

Aktuator listrik merupakan jenis aktuator yang merubah energi listrik menjadi gerakan atau gaya mekanik (Simanjorang, P.E. dkk., 2022), beberapa jenis aktuator listrik yang biasa digunakan pada *exoskeleton*:

a. Motor DC

Motor DC merupakan aktuator yang mengubah energi listrik menjadi gerakan rotasi, arah putaran serta kecepatan putaran pada motor DC mudah diatur. Motor ini membutuhkan driver yang berfungsi untuk menjalankan motor, baik mengatur arah putaran motor maupun kecepatan putar motor (Abror. M.F. 2021).

Motor DC memiliki keunggulan dalam penggunaannya pada *exoskeleton*. Pertama, motor DC memiliki torsi yang tinggi, memungkinkan mereka menghasilkan kekuatan yang cukup untuk menggerakkan sendi-sendi pada *exoskeleton* dengan efektif. Selain itu, motor DC juga sangat responsif terhadap perubahan kecepatan putaran, memungkinkan kontrol yang presisi dan adaptif terhadap kebutuhan pasien, baik itu dalam melakukan gerakan yang lambat dan perlahan, maupun gerakan yang lebih cepat dan dinamis.

Selain keunggulan, motor DC juga memiliki kelemahan dalam penggunaannya pada *exoskeleton*, yaitu tidak memiliki umpan balik langsung tentang posisi, sehingga membutuhkan sensor tambahan untuk mendapatkan informasi posisi yang akurat, dan kontrol posisi tidak sepresisi motor servo atau motor stepper. Dalam beberapa kasus, membutuhkan pengaturan ulang atau kalibrasi secara berkala untuk mempertahankan kinerja yang baik.

b. Motor servo

Motor servo merupakan jenis motor listrik yang memiliki kemampuan untuk mengontrol posisi porosnya dengan presisi tinggi. Motor servo menggunakan sistem *closed loop* atau umpan balik untuk memantau posisi poros, posisi poros motor servo dikendalikan oleh sinyal kontrol yang diberikan ke motor melalui pengendali (controller) (Nazila, A. 2017).

Motor servo memiliki sejumlah keunggulan yang dalam penggunaannya pada *exoskeleton*. Pertama, adanya sistem umpan balik posisi langsung. Hal ini memungkinkan motor servo untuk memberikan kontrol posisi yang sangat presisi pada setiap sendi *exoskeleton*. Selain itu, motor servo juga sangat responsif terhadap perubahan posisi dengan cepat, sehingga dapat menyesuaikan gerakan *exoskeleton* sesuai dengan perubahan yang dibutuhkan, dan stabilitas motor servo dalam mempertahankan posisi yang diinginkan bahkan saat terdapat beban eksternal yang

diberikan pada *exoskeleton*.

Selain keunggulan, motor servo juga memiliki kelemahan dalam penggunaannya pada *exoskeleton*, yaitu rentan terhadap getaran dan gangguan mekanis yang dapat mempengaruhi performa motor.

c. Motor Stepper

Motor stepper merupakan jenis motor listrik yang menggerakkan *outputnya* dalam langkah-langkah diskret atau terdefinisi dengan jelas. Mekanisme kerja motor stepper didasarkan pada pengaktifan kumparan motor secara berurutan untuk menghasilkan putaran diskrit. (Mahardhika, P.S. 2018).

Motor stepper memiliki sejumlah keunggulan dalam penggunaan *exoskeleton*. Pertama, kemampuan untuk menggerakkan sendi atau aktuator dengan presisi yang tinggi dikarenakan motor stepper memiliki langkah sudut yang tetap, sehingga dapat menghasilkan gerakan yang akurat dan terukur pada setiap langkahnya. Selain itu, motor stepper tidak memerlukan umpan balik posisi langsung, yang berarti tidak perlu menggunakan sensor tambahan untuk melacak posisi, dengan ini juga dapat mengurangi kompleksitas sistem secara keseluruhan, sehingga memudahkan dalam perancangan dan implementasi *exoskeleton*.

Selain keunggulan, motor stepper juga memiliki beberapa kelemahan yang perlu dipertimbangkan. Salah satu kelemahan motor stepper adalah torsi yang dihasilkannya cenderung lebih rendah dibandingkan dengan motor DC atau servo. Hal ini dapat membatasi kemampuan motor stepper dalam mengatasi beban yang lebih berat pada *exoskeleton*. Selain itu, pergerakan motor stepper juga lebih terbatas dalam hal kecepatan dan akselerasi dibandingkan dengan motor servo. Gerakan motor stepper mungkin tidak secepat atau sehalus motor servo dalam terapi rehabilitasi. Selanjutnya, motor stepper juga memerlukan pengaturan urutan sekuensial kumparan dengan benar untuk menghasilkan gerakan yang diinginkan.

2. Aktuator Hidrolik

Aktuator hidrolik menggunakan fluida cair yang dikendalikan oleh katup dan pompa untuk menghasilkan gerakan, aktuator jenis ini memiliki kekuatan yang besar dan kemampuan menahan beban yang tinggi (Simanjorang, P.E. dkk., 2022). Namun,

cenderung lebih berat dan membutuhkan sistem pendingin untuk mencegah panas berlebih. Aktuator hidrolis umumnya digunakan dalam *exoskeleton* yang memerlukan daya dan kekuatan ekstra, seperti *exoskeleton* industri atau militer.

3. Aktuator Pneumatik

Aktuator pneumatik menggunakan udara bertekanan untuk menghasilkan gerakan. Aktuator pneumatik ini ringan, memiliki respons cepat, dan dapat memberikan kekuatan yang cukup tinggi (Simanjorang, P.E. dkk., 2022). Aktuator pneumatik sering digunakan dalam *exoskeleton* yang memerlukan gerakan cepat dan responsif, seperti *exoskeleton* untuk olahraga atau rehabilitasi.

2.3.2 Sistem kontrol

Emzain, Z. F., dan Mashudi, I. (2020) menyebutkan Sistem kontrol memiliki peranan yang sangat penting dalam teknologi, terutama dalam konteks otomatisasi industri. Implementasi otomatisasi ini memiliki dampak signifikan, seperti pengurangan biaya produksi, peningkatan kualitas, dan penggantian pekerjaan-pekerjaan rutin yang monoton. Dengan menggunakan sistem kontrol, kinerja sistem secara keseluruhan dapat ditingkatkan secara drastis, memberikan manfaat yang besar bagi manusia yang menerapkannya. Tujuan utama sistem kontrol yakni harga atau nilai yang dihasilkan oleh setiap proses dari setiap sistem dapat dipertahankan. Dengan cara mengatur keluaran (*output*) dalam suatu sikap/ kondisi/ keadaan yang telah ditetapkan oleh masukan (*input*) melalui elemen sistem kontrol. Terdapat beberapa jenis controller yang umum digunakan dalam *exoskeleton*:

1. Mikrocontroller menyediakan konektor yang mudah digunakan untuk menghubungkan sensor dan aktuator, selain itu mikrocontroller juga dapat melakukan pengolahan data dan menjalankan algoritma kontrol. Beberapa mikrocontroller yang sering digunakan dalam sistem kontrol *exoskeleton* diantaranya Arduino, STM32, dan Raspberry. (Mahardhika, P.S. 2018).
2. Komputer *embedded* sering digunakan sebagai kontroler dalam sistem kontrol *exoskeleton* yang dimana membutuhkan pemrosesan data yang lebih kuat dan kemampuan komputasi yang tinggi. Komputer *embedded* juga dapat menjalankan sistem operasi yang lengkap dan mendukung pengolahan data yang kompleks.

(Somantri, Y. 2016).

3. Sistem kontrol *custom* dalam beberapa kasus, sistem kontrol *exoskeleton* dapat menggunakan kontroler *custom* yang dirancang khusus sesuai dengan kebutuhannya. Kontroler *custom* ini biasanya dikembangkan menggunakan mikrokontroler dengan perangkat lunak yang dirancang khusus (Prasetya dan Widhiada. 2018).

2.3.3 Sensor

Sensor adalah suatu peralatan yang berfungsi untuk mendeteksi gejala atau sinyal yang berasal dari perubahan suatu energi seperti energi listrik, energi fisika, energi kimia, energi biologi, energi mekanik dan sebagainya. (Abdurrazzaq, M.A. dkk., 2017).

Sensor pada *exoskeleton* berperan dalam mengumpulkan informasi tentang gerakan dan keadaan fisik pasien. Sensor-sensor ini membantu sistem kontrol *exoskeleton* untuk mengenali dan merespon gerakan pasien secara akurat. Terdapat beberapa jenis sensor yang umum digunakan dalam *exoskeleton*:

1. Sensor flex digunakan untuk mengukur fleksibilitas dan perubahan kekuatan pada sendi-sendi. Sensor flex memberikan informasi tentang sudut pergerakan sendi dan kekuatan yang diberikan oleh otot. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mengontrol gerakan dan memberikan respons yang sesuai dari *exoskeleton*. (Arifin, M. dkk., 2019).
2. Sensor *Potentiometer Rotary*
Sensor *potensiometer rotary* untuk mendeteksi perubahan posisi sudut pada poros rotasi. Sensor ini memiliki berbagai aplikasi di berbagai bidang, seperti mengontrol posisi motor servo, mengatur volume, mengendalikan suhu, dan sistem kendali lainnya.
3. Sensor tekanan digunakan untuk mengukur tekanan dan distribusi beban pada titik kontak antara *exoskeleton* dan tubuh pasien. Sensor tekanan juga membantu dalam menentukan tingkat dukungan dan kekuatan yang diberikan oleh *exoskeleton* pada sendi-sendi atau anggota tubuh tertentu. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mengontrol dan menyesuaikan torsi dan kekuatan yang

- diberikan oleh aktuator pada *exoskeleton*. (Abdurrazaq, M.A. dkk., 2017).
4. Sensor torsi digunakan untuk mengukur torsi atau momen pada sendi-sendi *exoskeleton*. Sensor torsi juga membantu dalam memantau dan mengontrol torsi yang diberikan oleh aktuator, sehingga menghindari gerakan yang berlebihan atau potensi cedera. (Ibrahim, A.W. dkk., 2016).
 5. Sensor taktil digunakan untuk mendeteksi sentuhan ataupun tekanan fisik pada permukaan *exoskeleton*. Sensor taktil juga membantu dalam memahami interaksi antara *exoskeleton* dan lingkungan sekitarnya, seperti saat berinteraksi dengan objek atau permukaan yang berbeda (Yumna, H. dkk., 2021).

2.4 Hand Kinematik

Menurut Kabir, R. at al., (2022) pada tangan manusia semua jari, kecuali ibu jari terdiri dari tiga tulang falang, yang dikenal sebagai *distal phalange*, *middle phalange*, dan *proximal*, ibu jari hanya terdiri dari dua tulang dan tidak memiliki *middle phalange*. Untuk perencanaan rehabilitasi *exoskeleton* harus sesuai dengan konfigurasi anatomi sendi-sendi jari. Selain dari ibu jari, falang terdiri dari tiga sendi, yaitu sendi *metacarpophalangeal* (MCP), sendi *proximal interphalangeal* (PIP), dan sendi *distal interphalangeal* (DIP). Ibu jari hanya terdiri dari dua sendi, yaitu sendi MCP dan sendi DIP.

Denavit-Hartenberg (D-H) merupakan metode dalam kinematika robotika yang digunakan untuk menggambarkan hubungan geometris setiap link dalam manipulator serbaguna. Metode Denavit-Hartenberg (D-H) memperkenalkan empat parameter untuk setiap link dalam manipulator yang kemudian digunakan untuk menyusun matriks transformasi yang menghubungkan dari satu link ke link berikutnya. (Alkhatib F, at al., 2019) ada empat parameter utama dalam D-H parameters:

1. Panjang *link* (a_i): Jarak antara sumbu Z_i dan Z_{i+1} , diukur sepanjang sumbu X_i .
2. Rotasi *link* (α_i): Sudut rotasi antara sumbu Z_i dan Z_{i+1} , diukur seputar sumbu X_i .
3. Jarak *link* (d_i): Jarak antar sumbu X_{i-1} dan X_i , dan diukur seputar sumbu Z_i .

4. Sudut sendi (θ_i): Sudut sendi antara sumbu X_{i-1} dan X_i , dan diukur seputar sumbu Z_i .

2.5 Range of Motion

Range Of Motion (ROM) aktif adalah latihan gerak sendi yang memungkinkan terjadinya kontraksi dan pergerakan otot, dimana pasien menggerakkan masing-masing persendiannya sesuai gerakan normal baik secara aktif ataupun pasif (Nurtanti, S. dan Ningrum, W. 2018).

Tubuh memiliki sendi synovial yang memungkinkan kita melakukan berbagai macam gerakan dan memiliki sebutan tersendiri yaitu fleksi, ekstensi, dan lain-lain. Fleksi merupakan gerakan menekuk sendi atau memperkecil sudut antar dua tulang, sedangkan ekstensi merupakan kebalikan dari fleksi yaitu memperbesar sudut antar dua tulang. (Wahyuningsih, H.P. 2019).

Tabel 3. ROM setiap jari yang sehat (Kabir, R. at al., 2022)

Link		<i>Flexion</i>(°)	<i>Extension</i>(°)
<i>Thumb</i>	MCP	75-80	0
	IP	75-80	5-10
<i>Index</i>	MCP	90	30-40
	PIP	110	0
	DIP	80-90	5
<i>Middle</i>	MCP	90	30-40
	PIP	110	0
	DIP	80-90	5
<i>Ring</i>	MCP	90	30-40
	PIP	120	0
	DIP	80-90	5
<i>Little</i>	MCP	90	30-40
	PIP	135	0
	DIP	90	5

2.6 3D-Printing

3D-printing atau *Additive Manufacturing* (AM) merupakan proses pembuatan atau percetakan benda padat tiga dimensi, dengan menggunakan file digital. Prinsip utama dari *3D-printing* adalah *additive manufacturing* yang berarti objek tercetak dengan membentuk lapis per lapis dari material. Adapun, bahan atau filamen pada proses *3D-printing* memiliki karakter yang berbeda-beda. Berikut adalah beberapa jenis bahan atau filamen beserta kegunaannya:

Tabel 4. Tinjauan material untuk rangka *exoskeleton* (Mahardika, P.S. 2018)

Jenis filamen	Saran penggunaan
ABS (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)	Bagian yang membutuhkan integritas struktural, detail, dan kekakuan.
PLA (<i>Polylactic Acid</i>)	Bagian yang memiliki detail yang tinggi, dan part dengan kebutuhan estetika.
HIPS (<i>High Impact Polystyrene</i>)	<i>High quality prints</i> , bagian filamen support. Mudah diurai dengan limonene.
Flexi	Lentur, untuk membuat <i>snap-fit parts</i> , <i>high resolution text</i> , dan sistem persendian aktif.
PVA (<i>Polyvinyl Alcohol</i>)	Sebagai bahan support filamen, larut dalam air.
PETG (<i>Glycol-modified PET</i>)	Sedikit transparan, fleksibel.