

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Stroke merupakan jenis penyakit kardiovaskular yang menjadi penyebab utama kematian dan disabilitas jangka panjang di seluruh dunia. Di Indonesia, data dari *Institute for Health Metrics and Evaluation* (IHME) tahun 2019 menunjukkan stroke sebagai penyebab kematian tertinggi, mencakup 19,42% dari total kematian nasional [1]. Tingkat urgensi ini diperkuat oleh data Kementerian Kesehatan RI (2023) yang menunjukkan peningkatan prevalensi stroke dari 10,9 per 1.000 penduduk pada tahun 2018 menjadi 14,6 per 1.000 penduduk pada tahun 2022, yang menunjukkan urgensi dalam pengembangan metode rehabilitasi yang lebih efektif [2]. Dampak paling umum dari stroke adalah hemiparesis, yaitu kelemahan pada satu sisi tubuh, yang dialami oleh lebih dari 80% pasien dan secara signifikan menghambat fungsi anggota gerak atas. Keterbatasan ini, seperti kesulitan menggunakan lengan akibat kelemahan otot, hilangnya ketangkasan, dan spastisitas, berdampak langsung pada kemampuan pasien untuk melakukan aktivitas hidup sehari-hari, sehingga menurunkan kualitas hidup dan kemandirian pasien [3].

Untuk memulihkan fungsi motorik, pasien menjalani program rehabilitasi yang intensif dan repetitif. Namun, pendekatan terapi konvensional seringkali menunjukkan efektivitas yang terbatas. Sebuah meta-analisis oleh Langhorne et al. (2023) menunjukkan pendekatan terapi tradisional memiliki hasil yang terbatas untuk defisit motorik sedang hingga berat, dengan tingkat pemulihan fungsional hanya mencapai 30-40% [5]. Studi longitudinal oleh Nakayama et al. (2020) juga menemukan bahwa hanya 50% pasien hemiparesis yang berhasil mencapai pemulihan fungsi lengan yang memuaskan setelah 6 bulan [4]. Keterbatasan ini mendorong pengembangan teknologi rehabilitasi inovatif untuk meningkatkan neuroplastisitas, yaitu kemampuan otak untuk mereorganisasi dengan membentuk koneksi saraf baru.

Salah satu pendekatan inovatif dalam rehabilitasi pasca-stroke adalah penggunaan robot rehabilitasi, khususnya tipe *end-effector*. Mehrholz et al. (2020) dalam *review* Cochrane menunjukkan bahwa pelatihan lengan elektromekanis dan berbantuan robot dapat meningkatkan aktivitas kehidupan sehari-hari, fungsi lengan, dan kekuatan otot lengan setelah stroke [33]. Robot *end-effector* menawarkan solusi yang lebih efektif dibandingkan pendekatan konvensional dengan memberikan dukungan fisik, memandu gerakan, dan memungkinkan latihan dengan volume repetisi tinggi yang merupakan kunci untuk merangsang pemulihan motorik.

Keunggulan *end-effector* dibandingkan eksoskeleton terletak pada fleksibilitas gerakan yang lebih alami, kemudahan penyesuaian anatomi, dan kemampuan mendorong partisipasi aktif pasien. Perangkat *end-effector* berinteraksi dengan ekstremitas pasien hanya pada satu titik distal, memungkinkan sendi-sendi proksimal bergerak lebih bebas dan alami. Penelitian menunjukkan bahwa intervensi robot *end-effector* menghasilkan luaran yang lebih baik pada pasien stroke kronis dengan gangguan fungsi ekstremitas atas sedang hingga parah [38].

Untuk memaksimalkan potensi terapeutik, *end-effector* memerlukan sistem kendali yang intuitif dan dapat beradaptasi dengan intensi pasien. Sinyal elektromiografi (EMG), yang merepresentasikan aktivitas listrik dari otot, dapat digunakan sebagai *input* kendali langsung yang memungkinkan *end-effector* bergerak sesuai dengan niat kontraksi otot pasien [18]. Pendekatan ini memastikan partisipasi aktif pasien, yang menurut Calabrò et al. (2023) sangat penting untuk memfasilitasi neuroplastisitas dengan menyelaraskan niat gerakan pasien dengan umpan balik sensorik aktual, mempercepat pemulihan jalur motorik [6]. Studi oleh Huo et al. (2023) telah mengkonfirmasi bahwa penggunaan *end-effector* berbasis EMG meningkatkan skor *Fugl-Meyer Assessment* (FMA) secara signifikan dibandingkan terapi konvensional [7].

Meskipun efektif, sistem kendali yang hanya mengandalkan EMG memiliki keterbatasan fundamental. Sinyal EMG rentan terhadap *noise*, artefak gerakan, dan perubahan impedansi kulit, yang dapat menyebabkan deteksi intensi yang tidak akurat atau *false positive* [8]. Penelitian Wicaksono et al. (2022) yang mengembangkan eksoskeleton tanpa EMG menunjukkan keterbatasan di sisi lain, yaitu sistem beroperasi secara pasif tanpa mendeteksi intensi pasien, hanya mengikuti trajektori *predetermined* [35]. Keterbatasan ini berisiko menyebabkan *over-assistance* dari robot, di mana robot memberikan bantuan bahkan ketika pasien tidak membutuhkannya, atau *under-assistance* saat sinyal gagal terdeteksi. Hal ini dapat mengurangi partisipasi aktif pasien dan menghambat efektivitas terapi.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, penelitian ini mengusulkan integrasi sensor inersia, yaitu *gyroscope* sebagai sistem validasi gerakan. *Gyroscope* yang merupakan bagian dari *Inertial Measurement Unit* (IMU), berfungsi untuk mengukur orientasi dan kecepatan sudut secara presisi. Pendekatan ini memungkinkan validasi *real-time* antara niat gerakan yang terdeteksi oleh EMG dengan pencapaian rentang gerak (*Range of Motion-ROM*) aktual yang diukur oleh *gyroscope*. Penelitian oleh Hussain et al. (2023) menunjukkan bahwa fusi data EMG-IMU dapat meningkatkan akurasi klasifikasi gerakan hingga lebih dari 95% dibandingkan dengan menggunakan salah satu sensor saja, sekaligus secara signifikan mengurangi efek artefak gerakan [9]. Implementasi ini memfasilitasi prinsip terapi *Assist-as-Needed* (AAN) yang lebih cerdas: robot hanya akan memberikan bantuan ketika terdeteksi adanya diskrepansi antara niat motorik pasien (sinyal EMG tinggi) dan eksekusi gerakan yang sebenarnya (data *gyroscope* menunjukkan gerakan minimal atau tidak ada) [10].

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan dan evaluasi sistem *end-effector* ekstremitas atas yang dikendalikan oleh sinyal EMG dengan validasi gerakan berbasis *gyroscope* untuk rehabilitasi pasien pasca-stroke. Dengan mengintegrasikan kedua teknologi ini, sistem bertujuan untuk menciptakan *loop* umpan balik yang lebih akurat dan personal. Sistem ini dirancang untuk mengurangi risiko *over-assistance*, memastikan pasien tetap aktif terlibat dalam proses rehabilitasi, dan secara adaptif menyesuaikan tingkat bantuan sesuai dengan kemajuan pemulihan pasien. Diharapkan, pendekatan hibrida ini dapat meningkatkan efektivitas intervensi rehabilitasi, mempercepat pemulihan fungsi motorik lengan, dan pada akhirnya meningkatkan kualitas hidup penderita stroke secara signifikan.

1.2. Rumusan Masalah

Masalah yang akan diteliti berdasarkan latar belakang di atas adalah:

1. Bagaimana merancang sistem akuisisi dan pengolahan sinyal EMG yang mampu mendeteksi intensi gerakan secara andal dari aktivitas otot lemah pada pasien hemiparesis pasca-stroke?
2. Bagaimana merancang dan mengintegrasikan sistem *end-effector* ekstremitas atas yang ergonomis dengan sistem kontrol adaptif berbasis fusi sensor EMG dan *gyroscope* yang mampu memberikan bantuan gerak presisi berdasarkan prinsip *Assist-as-Needed* (AAN)?
3. Bagaimana performa sistem yang dikembangkan berdasarkan parameter kunci seperti akurasi deteksi niat, responsivitas bantuan mekanis, dan potensi peningkatan *range of motion* (ROM) pengguna?

1.3. Tujuan dan Manfaat

Adapun tujuan dari penulisan proposal tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang sistem akuisisi dan pengolahan sinyal EMG untuk mendeteksi intensi gerak secara akurat, bahkan dari sinyal otot yang lemah pada pasien hemiparesis pasca-stroke, guna mengatasi masalah fundamental pada sistem kendali berbasis EMG.

2. Mengembangkan dan mengintegrasikan prototipe *end-effector* ekstremitas atas dengan sistem kontrol adaptif berbasis fusi sensor EMG dan *gyroscope*. Sistem ini menerapkan arsitektur dual-mikrokontroler dimana *gyroscope* berfungsi sebagai *gatekeeper* untuk memvalidasi niat gerak sebelum sinyal EMG dapat mengaktifkan bantuan mekanis, sehingga mengimplementasikan prinsip *Assist-as-Needed* (AAN) yang cerdas dan mencegah *over-assistance*.
3. Mengevaluasi performa prototipe *end-effector* secara kuantitatif berdasarkan tiga parameter kunci: akurasi deteksi niat gerak, responsivitas bantuan mekanis, dan potensi peningkatan *range of motion* (ROM) pengguna untuk memvalidasi efektivitas sistem.

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode rehabilitasi stroke berbasis teknologi, khususnya melalui integrasi sistem kendali *end-effector* yang menggabungkan sinyal EMG dengan validasi gerak dari *gyroscope*. Dengan pendekatan ini, pasien hemiparesis pasca-stroke dapat memperoleh terapi yang lebih personal dan adaptif, yang mampu mendorong partisipasi aktif pasien untuk meningkatkan pemulihan fungsi motorik ekstremitas atas secara signifikan.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Elektroda yang digunakan adalah elektroda permukaan (*surface electrodes*) untuk mendeteksi aktivitas otot, dengan fokus pada sinyal EMG non-invasif.
2. Fokus rehabilitasi adalah ekstremitas atas, khususnya pada fungsi motorik lengan kanan, dengan perhatian utama pada gerakan fleksi-ekstensi siku dan pergerakan bahu.
3. Penelitian terbatas pada orang dewasa sehat yang mensimulasikan kondisi otot lemah pasien hemiparesis pasca-stroke pada lengan kanan untuk pengambilan data sinyal EMG dan pengujian fungsional alat.

4. *End-effector* yang dirancang menggunakan sinyal otot dari otot *biceps brachii* dan *deltoid anterior* sebagai *input* utama mengontrol gerakan fleksi-ekstensi siku dan pergerakan bahu.
5. Sistem dibatasi untuk pasien dengan berat badan 40-70 kg, dengan berat lengan maksimal 5 kg.
6. Penelitian ini berfokus pada desain dan pengembangan sistem, dengan pengambilan data sinyal EMG dari pasien hemiparesis pasca-stroke dilakukan hanya untuk analisis karakteristik sinyal dan penentuan *threshold* dalam pengembangan algoritma pengolahan sinyal. *End-effector* tidak akan diimplementasikan secara klinis langsung pada pasien, melainkan akan diuji pada subjek normal untuk mengevaluasi keberhasilan fungsional dan kinematika *end-effector*, serta kesesuaiannya dengan parameter yang diperoleh dari data EMG pasien yang telah direkam sebelumnya.

1.5. Metode Penelitian

A. Kajian Literatur

Melakukan kajian mendalam mengenai sistem kendali *end-effector*, teknik akuisisi dan pengolahan sinyal EMG, penggunaan sensor inersia (*gyroscope*), serta strategi kontrol *assist-as-needed* untuk rehabilitasi hemiparesis. Hasil kajian digunakan untuk merumuskan konsep dasar dan arsitektur sistem secara keseluruhan.

B. Perancangan dan Pengembangan Sistem

Perancangan mekanik prototipe *end-effector* ekstremitas atas yang ergonomis, perancangan sistem akuisisi data terintegrasi untuk sinyal EMG dan data orientasi dari *gyroscope*, dan pengembangan algoritma implementasi kontrol adaptif diwujudkan melalui kontrol proporsional (*P-control*) yang sederhana namun efektif untuk menyesuaikan bantuan mekanis untuk menerjemahkan niat gerak (EMG) dan gerakan aktual (*gyroscope*) menjadi perintah aktuator.

C. Implementasi dan Integrasi Prototipe

Membangun prototipe fisik berdasarkan hasil perancangan mekanik dan mengintegrasikan seluruh komponen elektronik (sensor, mikrokontroler, aktuator) dengan perangkat lunak yang telah dikembangkan menjadi satu sistem fungsional.

D. Desain Prototipe *End-effector*

Mengembangkan desain konseptual prototipe dengan pengujiannya pada subjek normal.

E. Pengujian dan Analisis Kinerja

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi performa prototipe berdasarkan akurasi deteksi niat, responsivitas bantuan mekanis, dan validasi gerak, menggunakan data simulasi atau terekam untuk validasi awal.

F. Seluruh pengujian bersifat non-invasif menggunakan elektroda permukaan dan tidak menimbulkan risiko kesehatan. Subjek diberikan *informed consent* dan lembar persetujuan sebelum penelitian, serta dapat menghentikan partisipasi kapan saja tanpa konsekuensi.