

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Berdasarkan data Kementerian Koordinator Bidang Pembangunan Manusia dan Kebudayaan pada tahun 2023, populasi penyandang disabilitas di Indonesia telah mencapai 22,97 juta jiwa atau sekitar 8,5% dari total penduduk [1], yang pada gilirannya menuntut percepatan pemenuhan hak aksesibilitas dan dukungan teknologi asistif yang tepat guna [2]. Dari populasi tersebut, hambatan paling krusial dialami oleh individu dengan disabilitas fisik tingkat berat, khususnya mereka yang mengalami gangguan motorik ekstrem berupa kelumpuhan pada kedua tangan. Kehilangan kendali atas anggota gerak utama ini mengakibatkan mereka tidak mampu melakukan aktivitas fisik sehari-hari terutama pengambilan objek secara mandiri [3]. Keterbatasan fisik yang fatal ini seringkali diasumsikan sebagai hilangnya seluruh fungsi tubuh pasien [4].

Meskipun mengalami kelumpuhan otot dan rangka tubuh secara menyeluruh, sebuah fakta medis menegaskan bahwa sebagian besar pasien dengan kelumpuhan fisik total masih mempertahankan fungsi kognitif dan tingkat kesadaran otak yang beroperasi normal [4]. Pasien sepenuhnya sadar akan lingkungan sekitarnya dan memiliki niat untuk berinteraksi namun, kondisi otak yang masih aktif inilah yang membuka peluang bagi pemanfaatan teknologi untuk menjembatani kesenjangan fisik mereka [5].

Demi menjembatani kesenjangan fisik dan mengembalikan tingkat kemandirian pasien tersebut, berbagai platform robotik dan perangkat asistif telah secara masif dikembangkan [5]. Dalam konteks medis dan pemenuhan *Activities of Daily Living* (ADL) seperti pengambilan objek pada penderita kelumpuhan motorik, pemanfaatan robot manipulator menjadi sebuah inovasi. Robot manipulator dirancang secara mekanis untuk dapat mereplikasi dan menggantikan fungsi anatomis lengan dan tangan manusia, sehingga memungkinkan pengguna untuk kembali melakukan interaksi fisik secara langsung terhadap objek di sekitarnya [6].

Secara mekanis, struktur robot manipulator dibangun untuk meniru sendi pergerakan lengan manusia agar dapat memanipulasi objek di ruang tiga dimensi. Dalam aplikasi teknologi asistif dasar, penggunaan struktur robot manipulator dengan 4 derajat kebebasan (*4-Degree of Freedom/4-DOF*) dinilai sebagai konfigurasi yang paling efisien, karena jumlah persendian ini sudah sangat memadai untuk merepresentasikan gerak fundamental lengan manusia dalam menjangkau objek pada sumbu spasial (X, Y, Z) tanpa menghasilkan beban komputasi fisik yang terlalu kompleks [7].

Efektivitas implementasi robot tersebut sebagai alat bantu bagi penderita kelumpuhan tidak hanya bergantung pada kemampuan mekaniknya, melainkan

pada pemilihan metode kendali yang memiliki tingkat aksesibilitas tinggi dan mampu menerjemahkan niat pengguna secara akurat menjadi aksi robotik [8].

Sebagai respons terhadap kebutuhan antarmuka yang mampu menerjemahkan niat pengguna secara akurat menjadi aksi robotik, disiplin rekayasa biomedis menjadi jawaban yang mana berfokus pada pemanfaatan pemrosesan sinyal biologis alami atau *biosignal*. Pendekatan ini memungkinkan sistem kendali untuk dioperasikan secara sepenuhnya *hands free* tanpa melibatkan otot rangka luar [9]. Secara teknis, biosignal bekerja dengan merekam fluktuasi aktivitas kelistrikan fisiologis tubuh manusia, di mana terdapat berbagai variasi instrumen antarmuka, seperti *Electromyography* (EMG) untuk otot, *Electrooculography* (EOG) untuk mata, hingga *Electroencephalography* (EEG) untuk otak [10].

Di antara berbagai instrumen tersebut, *Electroencephalography* (EEG) menjadi pilihan antarmuka biosignal yang paling ideal bagi penyandang kelumpuhan motorik berat karena kemampuannya dalam membaca niat secara langsung dari aktivitas pusat kognitif otak tanpa memerlukan keterlibatan gerakan otot motorik [11]. *Electroencephalography* merupakan metode perekaman elektrofisiologis non invasif yang berfungsi menangkap fluktuasi tegangan dari aktivitas jaringan neuron melalui penempatan elektroda di permukaan kulit kepala [12]. Untuk mengakuisisi dan mendigitalisasi sinyal mikro otak tersebut, perangkat keras *open-source* OpenBCI dimanfaatkan sebagai platform pembacaan data, karena sistem ini telah dibuktikan mampu merekam aktivitas neural secara presisi [13]. Integrasi EEG ini telah terbukti secara sistematis dalam berbagai literatur mampu memfasilitasi antarmuka Brain-Computer Interface (BCI) pada penderita kelumpuhan motorik berat, baik diaplikasikan untuk navigasi kursi roda listrik maupun aktuasi lengan robotik [14]. Meskipun integrasi EEG menawarkan jalur antarmuka yang ideal, pembacaan sinyal murni rentan terdistorsi oleh gangguan sinyal fisiologis lain. Tinjauan literatur sistematis menunjukkan bahwa implementasi algoritma kecerdasan buatan (*Machine Learning*) sangat krusial untuk meningkatkan akurasi sistem kontrol dari sinyal EEG, sekaligus berfungsi mengidentifikasi dan mengeliminasi artefak biologis yang mengganggu. [15].

Meskipun integrasi EEG menawarkan jalur antarmuka yang ideal, pembacaan sinyal kognitif murni memiliki kelemahan berupa rasio *signal to noise* (SNR) yang sangat rendah, sehingga rentan terdistorsi oleh kemunculan gangguan sinyal fisiologis lain [16]. Upaya konvensional untuk memfilter dan mengeliminasi gangguan sinyal fisiologis lain ini secara *realtime* terbukti membutuhkan beban komputasi yang masif, yang pada praktiknya justru berisiko menurunkan tingkat akurasi pada sistem kendali [17]. Merespons tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan pendekatan alternatif dengan mengubah limitasi tersebut menjadi kekuatan komputasi yaitu memanfaatkan kemunculan gangguan tadi yang disebut artefak EEG seperti kedipan mata, lirik, dan gigitan rahang yang terekam pada saluran EEG sebagai pemicu kendali utama [18], [19].

Berdasarkan pemanfaatan berbagai variasi artefak seperti kedipan mata, lirik, dan gigitan rahang tersebut, diperlukan sebuah mekanisme komputasi untuk mengenali dan membedakan identitas masing-masing sinyal [20]. Proses identifikasi ini sangat bergantung pada struktur fisik rekaman EEG berbentuk matriks dua dimensi, di mana kemunculan artefak tersebut menghasilkan lonjakan amplitudo pada saluran tertentu dan membentuk margin perbedaan nilai kuantitatif yang sangat tajam [21]. Memanfaatkan karakteristik margin perbedaan yang tegas tersebut, penelitian ini mengimplementasikan metode Linear Discriminant Analysis (LDA) sebagai algoritma klasifikasi [22]. Algoritma ini dipilih karena kemampuannya yang sangat optimal dalam mengeksploitasi varian antar kelas untuk menciptakan garis batas keputusan linier yang pasti, sehingga proses pemisahan identitas sinyal dapat dieksekusi dengan akurasi tinggi tanpa membebani sistem dengan komputasi iteratif [23], [24].

Setelah niat pengguna berhasil diterjemahkan menjadi perintah komputasi yang akurat melalui pendekatan klasifikasi sinyal EEG, tantangan selanjutnya adalah merancang metode kendali mekanik yang menjamin tingkat aksesibilitas tinggi [8]. Untuk merealisasikan tingkat aksesibilitas pergerakan yang mandiri, sistem kendali lengan robotik ini mengimplementasikan pemodelan kinematika *inverse kinematic* [25]. Melalui perhitungan matematis tersebut, konfigurasi sudut rotasi pada setiap sendi robot dapat dikalkulasi secara otomatis hanya dengan mengacu pada target titik koordinat spasial tiga dimensi (x, y, z) dari objek yang dituju [26]. Untuk memperoleh titik koordinat target tersebut secara mandiri, sistem mengintegrasikan teknik pemrosesan citra (*image processing*) berbasis ekstraksi ruang warna *Hue, Saturation, Value* (HSV) guna mengidentifikasi objek secara visual [27], [28]. Selanjutnya, titik pusat koordinat piksel dari objek yang terdeteksi pada tangkapan kamera dikonversikan secara matematis menjadi koordinat spasial dunia nyata sebagai parameter masukan bagi kalkulasi *inverse kinematic* [29], [30].

Dengan demikian, untuk menjawab tantangan dalam menerjemahkan niat pengguna secara akurat menjadi aksi robotik serta kebutuhan klasifikasi sinyal yang tidak membebani sistem dengan komputasi iteratif, penelitian ini memanfaatkan artefak *Electroencephalography* (EEG) sebagai pemicu yang diklasifikasikan melalui metode *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Sebagai solusi atas kebutuhan metode kendali beraksesibilitas tinggi yang dikalkulasi secara otomatis menuju target titik koordinat spasial tiga dimensi (x, y, z), sistem ini mengimplementasikan pergerakan robot manipulator berbasis *inverse kinematics* yang dipadukan dengan ekstraksi HSV dan konversi koordinat melalui *image processing*. Integrasi keseluruhan dari antarmuka klasifikasi biologis dan otomasi spasial visual ini pada akhirnya dirancang untuk menghasilkan sebuah ekosistem teknologi asistif yang mandiri dan tepat guna. Mengacu pada urgensi permasalahan dan integrasi solusi inovatif tersebut, penulis mengangkat penelitian Tugas Akhir dengan judul: "Perancangan Sistem Kendali Robot Manipulator 4-DOF Berbasis

Artefak *Electroencephalography* Menggunakan *Image Processing* dan Metode Klasifikasi *Linear Discriminant Analysis* Untuk Pengambilan Objek".

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah utama dalam penelitian ini adalah bagaimana merancang dan mengembangkan sistem kendali robot manipulator 4-DoF yang mengintegrasikan klasifikasi sinyal artefak *Electroencephalography* (EEG) sebagai pemicu perintah dengan sistem visi komputer. Integrasi ini bertujuan untuk menciptakan sebuah solusi teknologi asistif yang memiliki akurasi dan aksesibilitas tinggi dengan waktu komputasi rendah, sehingga dapat membantu penyandang disabilitas dalam melakukan aktivitas pengambilan objek secara mandiri.

Berdasarkan perumusan masalah utama tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem klasifikasi sinyal artefak *Electroencephalography* (EEG) sebagai pemicu kendali menggunakan metode *Linear Discriminant Analysis* (LDA) dengan akurasi tinggi dengan waktu komputasi yang rendah?
2. Bagaimana mengimplementasikan teknik *image processing* berbasis ruang warna *Hue, Saturation, Value* (HSV) untuk mengidentifikasi objek secara visual dan mengonversi koordinat piksel kamera menjadi koordinat spasial tiga dimensi (x, y, z)?
3. Bagaimana memodelkan dan menerapkan *inverse kinematics* pada robot manipulator 4-DOF agar sistem dapat mengalkulasi sudut rotasi setiap sendi secara otomatis menuju target koordinat spasial objek?
4. Bagaimana performa integrasi keseluruhan sistem, mulai dari proses klasifikasi sinyal artefak EEG, pengolahan citra (*image processing*), hingga otomasi kinematika robot, dalam menghasilkan sistem robot manipulator yang akurat dan beraksesibilitas tinggi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan utama dalam penelitian ini adalah merancang dan mengembangkan sistem kendali robot manipulator 4-DoF yang mengintegrasikan klasifikasi sinyal artefak *Electroencephalography* (EEG) sebagai pemicu perintah dengan sistem visi komputer. Integrasi ini dilakukan untuk menciptakan sebuah solusi teknologi asistif yang memiliki akurasi dan aksesibilitas tinggi dengan waktu komputasi rendah, sehingga dapat membantu penyandang disabilitas dalam melakukan aktivitas pengambilan objek secara mandiri.

Berdasarkan tujuan utama tersebut, maka tujuan khusus dalam penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

1. Merancang sistem klasifikasi sinyal artefak *Electroencephalography* (EEG) sebagai pemicu kendali menggunakan metode *Linear Discriminant Analysis* (LDA) untuk mencapai tingkat akurasi yang tinggi dengan waktu komputasi yang rendah.
2. Mengimplementasikan teknik *image processing* berbasis ruang warna *Hue, Saturation, Value* (HSV) untuk mendeteksi identitas objek secara visual dan mengonversi koordinat piksel kamera menjadi koordinat spasial dunia nyata tiga dimensi (x, y, z).
3. Memodelkan dan menerapkan perhitungan *inverse kinematics* pada robot manipulator 4-DOF agar sistem mampu mengalkulasi konfigurasi sudut rotasi pada setiap sendi secara otomatis menuju target koordinat spasial objek.
4. Mengevaluasi performa integrasi keseluruhan sistem mulai dari antarmuka klasifikasi sinyal artefak EEG hingga otomasi kinematika robot berbasis *image processing* dalam mewujudkan robotik manipulator yang akurat dan beraksesibilitas tinggi.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan spesifik pada tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perekaman data sinyal EEG dibatasi pada deteksi artefak fisiologis yaitu kedip kiri, kedip kanan, kedip kedua mata, lirik kiri, lirik kanan, dan gigitan. Pengambilan sampel dilakukan pada subjek uji berangota tubuh normal, berambut kering, serta tidak melakukan pergerakan tubuh secara bebas saat perekaman untuk menghindari *noise* sinyal.
2. Objek uji dibatasi pada benda mati dengan warna solid merah, hijau, dan biru serta berat yang tidak melebihi kapasitas torsi maksimal motor servo robot yang mana objek berbentuk balok dengan panjang 30 mm, lebar 30mm serta varisasi tinggi sebesar 50 mm, 85 mm, dan 70mm.
3. Pemetaan koordinat spasial menggunakan dua buah kamera statis yang diposisikan secara orthogonal, di mana kamera vertikal (ditempatkan di atas dan sejajar pusat rotasi robot) memindai sumbu X dan Y, sedangkan kamera horizontal (ditempatkan di samping ruang kerja) memindai tinggi atau sumbu Z.
4. Penelitian ini difokuskan pada tahap perancangan prototipe dan validasi sistem kendali (*proof of concept*), sehingga pengujian robot manipulator difungsikan untuk simulasi pengambilan objek statis di area kerja robot dan tidak melibatkan uji klinis interaksi fisik secara langsung dengan pasien penyandang disabilitas.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan secara teoretis maupun praktis dalam pengembangan teknologi asistif bagi penyandang disabilitas motorik berat. Secara teoretis, penelitian ini memperkaya literatur di bidang rekayasa biomedis dan sistem kendali dengan membuktikan bahwa gangguan sinyal kelistrikan otak dapat dieksploitasi secara inovatif menjadi pemicu kendali antarmuka yang andal dan ringan secara komputasi melalui algoritma *Linear Discriminant Analysis* (LDA). Secara praktis, integrasi antarmuka biologis tersebut dengan sistem otomasi spasial berbasis pemrosesan citra ruang warna HSV dan perhitungan *inverse kinematics* menghasilkan sebuah purwarupa lengan robot manipulator 4-DOF yang mandiri. Melalui ekosistem terintegrasi ini, hasil penelitian diharapkan mampu menjadi solusi teknologi yang nyata untuk memfasilitasi pemulihan kemandirian pasien paralisis total dalam melakukan aktivitas pengambilan objek fisik sehari-hari secara *handsfree*, presisi, dan aman.

1.6 Sistematika Penulisan

Bab I Pendahuluan

Berisi tentang gambaran singkat "Perancangan Sistem Kendali Robot Manipulator 4-DOF Berbasis Artefak Electroencephalography Menggunakan Image Processing dan Metode Klasifikasi Linear Discriminant Analysis Untuk Pengambilan Objek" yang terdiri dari latar belakang tugas akhir, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, dan sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka

Berisi tentang teori-teori pendukung dalam penelitian tugas akhir seperti peralatan dan komponen, prinsip kerja, serta konsep-konsep dalam penyelesaian masalah dalam tugas akhir ini

Bab III Metodologi Penelitian

Berisi tentang metode yang digunakan, tahapan yang dilakukan, dan blok diagram perancangan sistem secara keseluruhan.

Bab IV Hasil dan Analisa

Berisi mengenai penjabaran hasil dan analisis yang didapatkan selama penelitian.

Bab V Simpulan dan Saran

Berisi mengenai Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian yang dilakukan, serta saran mengenai perbaikan penelitian untuk kedepannya.