

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kursi roda listrik merupakan salah satu alat bantu mobilitas yang memiliki peran penting dalam meningkatkan aksesibilitas, kemandirian, dan kualitas hidup penyandang disabilitas, khususnya bagi individu dengan keterbatasan kemampuan berjalan. Seiring dengan perkembangan teknologi, kursi roda listrik tidak hanya berfungsi sebagai alat transportasi, tetapi juga dikembangkan sebagai perangkat pendukung rehabilitasi yang mengutamakan kenyamanan dan kemudahan penggunaan bagi penggunanya [1]. Berbagai inovasi telah dilakukan untuk meningkatkan performa dan keamanan kursi roda listrik, mulai dari penerapan algoritma bantuan berkendara yang sederhana dan hemat biaya dengan dukungan sensor untuk meningkatkan kenyamanan serta keselamatan pengguna [2], hingga pengembangan sistem penggerak yang mampu beroperasi pada berbagai kondisi medan, seperti lintasan datar maupun area dengan rintangan, melalui mekanisme roda dan struktur penggerak yang adaptif [3]. Hal ini menunjukkan bahwa pengembangan kursi roda listrik terus diarahkan untuk menghadapi kondisi penggunaan nyata yang kompleks, sehingga mampu memenuhi kebutuhan mobilitas pengguna secara lebih optimal. Namun demikian, peningkatan kemampuan mobilitas tersebut juga menuntut kursi roda listrik untuk dapat beroperasi secara aman dan stabil pada berbagai kondisi lintasan. Salah satu kondisi yang memiliki tantangan tersendiri adalah saat kursi roda bergerak pada lintasan menanjak yang dapat memengaruhi karakteristik respon dinamis sistem.

Dalam kondisi mendaki, perubahan sudut gerak pada kursi roda listrik menjadi aspek yang penting, di mana hasil pengujian eksperimental menunjukkan bahwa sistem MEBot (Mobility Enhancement Robotic Wheelchair) mengalami perubahan sudut pitch yang lebih kecil 10° dibandingkan dengan kursi roda listrik komersial pada umumnya saat melintasi kemiringan [4]. Selain dipengaruhi oleh kemiringan lintasan, perubahan gerak pada kursi roda juga dapat dipengaruhi oleh karakteristik sistem, seperti distribusi massa, beban yang dibawa, serta sistem penggerak, yang terbukti dalam eksperimen berdampak signifikan terhadap torsi kemudi dan rotasi pada kursi roda [4]. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem kendali umpan balik yang mampu mengkompensasi gangguan tersebut secara *real-time*, di mana berdasarkan berbagai penelitian, pengendali berbasis PID terbukti efektif dalam menstabilkan sudut pitch, mereduksi *overshoot*, serta meningkatkan kestabilan sistem pada kondisi dinamis seperti saat mendaki, sehingga risiko ketidakstabilan seperti deviasi sudut berlebih atau osilasi dapat diminimalkan [5]. Selain dipengaruhi oleh kemiringan lintasan, karakteristik respon dinamis kursi roda listrik juga dipengaruhi oleh besarnya beban yang dibawa selama pengoperasian. Oleh karena itu, analisis terhadap pengaruh variasi

beban menjadi penting untuk memahami perubahan performa sistem secara lebih komprehensif.

Beban pengguna merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap kinerja kursi roda listrik, di mana pengguna dengan bobot yang lebih besar mengalami perubahan performa yang lebih signifikan dibandingkan pengguna dengan bobot lebih ringan [6]. Perubahan parameter beban juga diketahui dapat memengaruhi inersia sistem secara signifikan, dengan variasi nilai inersia yang dapat mencapai 1,6% hingga 18%, sehingga pemodelan beban menjadi aspek penting dalam analisis dinamika sistem [7]. Selain itu, perubahan posisi pusat massa akibat variasi beban terbukti mengubah distribusi beban pada roda depan dan belakang, yang secara langsung memengaruhi momen gravitasi dan kestabilan sistem kursi roda selama pengoperasian [8]. Dampak perubahan beban tersebut tidak hanya memengaruhi kestabilan kendaraan, tetapi juga berpotensi memengaruhi kenyamanan pengguna selama berkendara. Oleh karena itu, aspek kenyamanan perlu dipertimbangkan bersama dengan aspek kestabilan dalam evaluasi performa kursi roda listrik.

Selain faktor kestabilan sistem, aspek kenyamanan pengguna juga menjadi perhatian utama dalam pengembangan kursi roda listrik, khususnya saat menghadapi perubahan kondisi lintasan seperti transisi dari permukaan datar ke tanjakan [9]. Perubahan sudut pitch dan akselerasi longitudinal yang terjadi secara tiba-tiba dapat menimbulkan respon dinamis berupa guncangan atau perubahan orientasi yang tidak nyaman bagi pengguna [10]. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan yang tidak hanya mampu menjaga kestabilan sistem, tetapi juga mampu mengatur karakteristik respon dinamis agar perubahan tersebut berlangsung secara halus. Dalam hal ini, parameter seperti kecepatan sudut pitch dan akselerasi longitudinal menjadi indikator penting dalam merepresentasikan kenyamanan sistem selama proses pendakian [11]. Agar parameter-parameter tersebut dapat dipertahankan pada kondisi yang diinginkan, diperlukan suatu metode pengendalian yang mampu meredam gangguan serta memperbaiki karakteristik respon sistem secara *real-time*.

Untuk mengatasi perubahan respon dinamis tersebut, diperlukan suatu metode pengendalian yang mampu mengatur karakteristik sistem agar tetap stabil dan nyaman. Salah satu metode yang digunakan adalah pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID), yang mampu memperbaiki respon sistem dengan mengurangi perubahan mendadak, meredam osilasi, serta meningkatkan kestabilan selama kondisi dinamis [12]. Evaluasi respon sistem dilakukan menggunakan sensor Inertial Measurement Unit (IMU) yang mampu mengukur sudut pitch, kecepatan sudut, dan akselerasi secara *real-time* [13]. Selain itu, untuk merepresentasikan kondisi penggunaan nyata oleh penyandang disabilitas dengan keterbatasan motorik, sistem dalam penelitian ini juga dilengkapi dengan

antarmuka berbasis sinyal *Electrooculography* (EOG) sebagai perintah gerak (maju/berhenti), sehingga sistem tidak hanya berfokus pada performa kontrol, tetapi juga mempertimbangkan aspek interaksi pengguna dalam pengoperasian kursi roda listrik [14], [15]. Keberhasilan sistem tersebut sangat bergantung pada kemampuan pengendali dalam merespons perubahan kondisi operasi yang terjadi selama penggunaan. Oleh karena itu, pemilihan struktur sistem kendali yang tepat menjadi aspek penting dalam perancangan kursi roda listrik.

Pada sistem kendali kursi roda listrik, penerapan sistem kendali otomatis berbasis umpan balik memiliki keunggulan yang signifikan dibandingkan sistem *open-loop* yang bekerja tanpa mekanisme koreksi kesalahan[9]. Sistem *open-loop* hanya mengandalkan parameter masukan yang telah ditentukan sebelumnya, sehingga tidak mampu beradaptasi terhadap gangguan eksternal yang bersifat dinamis, seperti perubahan kemiringan lintasan maupun variasi beban pengguna[16]. Sebaliknya, sistem kendali umpan balik memungkinkan pengukuran keluaran sistem secara kontinu dan membandingkannya dengan nilai referensi yang dikehendaki, sehingga aksi koreksi dapat dilakukan secara *real-time* untuk meminimalkan deviasi dari kondisi yang diinginkan[17]. Kemampuan respons adaptif inilah yang menjadikan sistem kendali otomatis sangat relevan untuk diterapkan pada kursi roda listrik yang beroperasi di lingkungan dengan kondisi dinamis yang tidak dapat diprediksi sepenuhnya. Salah satu sumber gangguan utama yang harus dihadapi oleh sistem kendali tersebut adalah perubahan kemiringan lintasan yang menghasilkan gaya-gaya eksternal pada kendaraan. Pengaruh gaya tersebut dapat dijelaskan melalui analisis dinamika kendaraan pada bidang miring.

Dari perspektif dinamika kendaraan, lintasan tanjakan menghadirkan gangguan gaya gravitasi yang bekerja secara langsung terhadap sistem gerak kursi roda listrik. Ketika kursi roda menanjak pada sudut kemiringan θ , komponen gaya gravitasi yang sejajar dengan bidang miring sebesar $mg \sin \theta$ akan bekerja berlawanan arah dengan gerak maju kendaraan, sehingga motor penggerak harus menghasilkan torsi yang lebih besar untuk mempertahankan kecepatan yang konstan[18]. Semakin besar sudut kemiringan, semakin signifikan komponen gaya gravitasi yang harus dikompensasi oleh sistem penggerak[5]. Kondisi ini secara langsung memengaruhi akselerasi longitudinal kendaraan serta mendorong perubahan orientasi sudut pitch, yang apabila tidak dikompensasi secara tepat akan mengakibatkan perlambatan mendadak, perubahan postur kursi roda, bahkan risiko kehilangan kendali pada kemiringan yang cukup besar. Dengan demikian, karakterisasi pengaruh sudut kemiringan terhadap respon akselerasi dan orientasi pitch menjadi kebutuhan mendasar dalam analisis performa kursi roda listrik pada lintasan tidak datar. Untuk melakukan evaluasi tersebut secara kuantitatif, diperlukan parameter pengukuran yang mampu merepresentasikan kondisi stabilitas dan kenyamanan sistem secara objektif.

Dalam konteks tersebut, parameter kecepatan sudut pitch (ω_y), sudut pitch, dan akselerasi longitudinal (α_x) yang diukur melalui sensor IMU memiliki peran yang saling melengkapi sebagai indikator kuantitatif stabilitas dan kenyamanan sistem[19]. Kecepatan sudut pitch (ω_y) mencerminkan laju perubahan orientasi kendaraan pada bidang sagital, yang secara langsung berkaitan dengan risiko osilasi dan ketidakstabilan postur saat melintasi transisi kemiringan[13]. Akselerasi longitudinal (α_x) merepresentasikan besarnya percepatan atau perlambatan yang dialami pengguna sepanjang sumbu gerak kendaraan, yang merupakan faktor utama yang memengaruhi kenyamanan berkendara dan risiko cedera akibat getaran atau sentakan[14]. Sementara itu, sudut pitch secara integratif menunjukkan derajat kemiringan bodi kendaraan sebagai akumulasi dari kecepatan sudut yang terjadi[13], [14]. Ketiga parameter ini secara kolektif memberikan gambaran komprehensif mengenai karakteristik respon dinamis kursi roda listrik, sehingga analisis terhadap ketiganya diperlukan untuk mengevaluasi efektivitas sistem kendali PID dalam menjamin stabilitas dan kenyamanan pengguna pada berbagai kondisi beban dan kemiringan lintasan[19]. Berdasarkan kebutuhan analisis tersebut, penelitian ini dirancang untuk mengkaji karakteristik respon dinamis kursi roda listrik pada kondisi tanjakan dengan variasi beban serta penerapan sistem kendali PID.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis respon dinamis kursi roda listrik saat mendaki lintasan tanjakan dengan variasi beban pengguna menggunakan parameter kecepatan sudut pitch (ω_y) dan akselerasi longitudinal (α_x) sebagai indikator evaluasi sistem. Penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi efektivitas pengendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) melalui perbandingan performa sistem dengan dan tanpa kendali PID pada berbagai kondisi beban. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan sensor IMU untuk pengukuran respon dinamis serta sinyal *Electrooculography* (EOG) sebagai antarmuka perintah pengguna.

1.2 Rumusan Masalah

Dalam pengembangan sistem evaluasi kinerja kursi roda listrik pada kondisi tanjakan non-linear, diperlukan pemahaman yang mendalam terhadap karakteristik respons dinamis sistem, terutama terkait perubahan orientasi pitch dan akselerasi longitudinal. Pada kondisi nyata, variasi sudut kemiringan yang tidak konstan dan perubahan beban pengguna dapat memengaruhi dinamika kendaraan secara signifikan, sehingga respons sistem menjadi lebih kompleks dan sulit diprediksi. Selain itu, perubahan orientasi dan percepatan yang cepat dapat memengaruhi stabilitas dan kenyamanan pengguna selama proses pendakian. Oleh karena itu, diperlukan analisis respons sistem yang akurat dan sistematis untuk memahami bagaimana perubahan beban dan kemiringan lintasan memengaruhi performa kursi roda listrik.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana respon kecepatan sudut pitch (ω_y) terhadap waktu pada kursi roda listrik saat mendaki lintasan tanjakan dengan variasi beban pengguna?
2. Bagaimana respon akselerasi longitudinal (α_x) terhadap waktu pada kursi roda listrik saat mendaki lintasan tanjakan dengan variasi sudut kemiringan lintasan?
3. Bagaimana perbandingan performa sistem kursi roda listrik dengan dan tanpa kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) berdasarkan parameter kecepatan sudut pitch (ω_y) dan akselerasi longitudinal (α_x)?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis respon kecepatan sudut pitch (ω_y) kursi roda listrik terhadap waktu pada kondisi variasi beban pengguna saat mendaki lintasan tanjakan.
2. Menganalisis respon akselerasi longitudinal (α_x) kursi roda listrik terhadap waktu pada kondisi variasi sudut kemiringan lintasan saat proses pendakian.
3. Menganalisis efektivitas kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) melalui perbandingan performa sistem dengan dan tanpa kendali PID berdasarkan parameter kecepatan sudut pitch (ω_y) dan akselerasi longitudinal (α_x).

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini memerlukan batasan-batasan agar fokus penelitian lebih terarah dan tujuan penelitian dapat tercapai secara maksimal. Batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengujian dilakukan pada kursi roda listrik differensial drive dengan konfigurasi penggerak dua roda utama dan roda casis penyeimbang.
2. Pengujian dilakukan pada lintasan datar dan lintasan tanjakan dengan sudut kemiringan yang telah ditentukan.
3. Evaluasi difokuskan pada respon dinamis sistem yang direpresentasikan oleh parameter pitch, kecepatan sudut pitch (ω_y), dan akselerasi longitudinal (α_x), dengan fokus utama analisis pada ω_y dan α_x .

4. Sinyal EOG hanya digunakan sebagai perintah maju dan berhenti, serta tidak dianalisis sebagai objek penelitian.
5. Data respon sistem diperoleh menggunakan sensor IMU yang terpasang pada bodi kursi roda untuk mengukur pitch, ω_y , dan α_x secara kontinu.
6. Pengujian dilakukan pada variasi beban tanpa beban, 40 kg, 50 kg, dan 60 kg serta variasi sudut lintasan 0° , 5° , dan 15° .
7. Pengujian dilakukan pada lingkungan terkontrol tanpa gangguan eksternal yang signifikan seperti angin kencang, permukaan licin, atau perubahan kondisi lintasan selama pengambilan data.
8. Evaluasi performa sistem dibatasi pada perbandingan respon sistem dengan dan tanpa kendali PID berdasarkan parameter respon dinamis yang diamati.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai referensi dalam analisis respon dinamis kursi roda listrik pada kondisi lintasan menanjak. Hasil penelitian memberikan informasi mengenai pengaruh variasi beban terhadap respon kecepatan sudut pitch (ω_y) serta pengaruh variasi sudut kemiringan lintasan terhadap respon akselerasi longitudinal (α_x). Selain itu, penelitian ini dapat menjadi bahan evaluasi mengenai efektivitas penerapan kendali *Proportional-Integral-Derivative* (PID) dalam meningkatkan kemampuan *disturbance rejection* dan menjaga kestabilan respon sistem dibandingkan kondisi tanpa kendali PID. Dari sisi praktis, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan dalam pengembangan sistem kursi roda listrik yang lebih stabil, aman, dan nyaman saat digunakan pada lintasan menanjak. Dari sisi akademis, penelitian ini dapat menjadi referensi bagi penelitian lanjutan yang berkaitan dengan analisis respon dinamis, sistem kendali, dan pengembangan teknologi kursi roda listrik berbasis sensor inersial.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir disusun menjadi beberapa bagian sesuai dengan pedoman penulisan tugas akhir Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas agar lebih mudah dibaca dan dipahami oleh pembaca. Penjabaran dari sistematika penulisan tugas akhir ini sebagai berikut:

- Bab I Pendahuluan, berisi tentang gambaran umum mengenai penelitian “ Analisis Perbandingan Respon Dinamis Kursi Roda Listrik Saat Menanjak Dengan Dan Tanpa Beban Menggunakan IMU Dan Kendali PID Berbasis Perintah EOG”. Bab ini disusun untuk menjelaskan latar belakang, permasalahan, tujuan, ruang lingkup, manfaat, dan alur penulisan yang menjadi dasar penelitian.

- Bab II Tinjauan Pustaka, Berisi tentang menjelaskan teori-teori pendukung yang relevan dengan penelitian, seperti dinamika kendaraan, konsep pitch dan stabilitas, pengaruh beban terhadap sistem, sensor IMU dan prinsip kerjanya, serta teori analisis data dan evaluasi performa sistem.
- Bab III Metodologi Penelitian, Berisi tentang metode penelitian yang digunakan, mulai dari perancangan percobaan, pengambilan data, pemrosesan sinyal IMU, analisis respon pitch dan akselerasi, hingga evaluasi kestabilan. Bab ini juga memuat diagram alur penelitian dan blok diagram sistem.
- Bab IV Hasil dan Pembahasan, Berisi tentang hasil pengujian dan analisis data, termasuk perbandingan respons sistem pada kondisi tanpa beban dan dengan beban, serta interpretasi hasil berdasarkan aspek pitch, akselerasi longitudinal, dan kestabilan selama pendakian. Pembahasan dilakukan untuk menjelaskan fenomena yang terjadi dan relevansinya terhadap tujuan penelitian.
- Bab V Penutup, Berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya, seperti peningkatan model kontrol, variasi lintasan, atau pengujian pada kondisi nyata yang lebih luas.

