

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan sistem transportasi otonom pada bidang logistik mendorong pemanfaatan kendaraan tanpa pengemudi untuk mendukung proses distribusi dan pengiriman barang. Salah satu implementasinya adalah *Autonomous Delivery Vehicle* (ADV), yaitu kendaraan yang dirancang untuk melakukan proses pengiriman secara mandiri, khususnya pada tahap *last-mile delivery*. Pemanfaatan kendaraan otonom pada tahap tersebut menjadi salah satu alternatif dalam meningkatkan otomasi proses distribusi sekaligus mengurangi kebutuhan interaksi langsung antara operator kendaraan dan penerima barang [1] [2].

Agar dapat beroperasi secara otonom, ADV memerlukan integrasi beberapa subsistem, antara lain persepsi lingkungan, lokalisasi, navigasi, sistem kendali, dan aktuator kendaraan [3]. Sistem navigasi menghasilkan referensi gerak, sedangkan aktuator merealisasikan referensi tersebut menjadi gerakan fisik kendaraan. Salah satu aktuator yang berperan penting dalam perubahan arah kendaraan adalah sistem *steering*, karena sistem ini bertugas mengatur sudut roda kemudi sesuai referensi yang diberikan oleh sistem kendali tingkat atas [4]. Oleh karena itu, kemampuan aktuator *steering* dalam mencapai dan mempertahankan sudut yang diperintahkan menjadi salah satu aspek penting dalam pelaksanaan gerak kendaraan. Penelitian ini tidak membahas proses pembentukan lintasan, tetapi difokuskan pada pelaksanaan referensi sudut oleh aktuator *steering*.

Pada kendaraan otonom, sistem *steering* bekerja menggunakan sistem kendali tertutup dengan memanfaatkan umpan balik posisi. Pada sistem *steer-by-wire*, ketelitian pelacakan sudut serta kemampuan sistem mempertahankan posisi terhadap perubahan beban dan gangguan menjadi aspek penting dalam sistem kendali [4]. Kesalahan posisi aktuator dapat menyebabkan sudut roda aktual tidak sesuai dengan sudut referensi yang diberikan. Oleh karena itu, diperlukan sistem kendali posisi yang mampu menggerakkan aktuator menuju sudut referensi,

menghasilkan respons yang stabil dan berulang, serta mempertahankan posisi ketika menerima pembebanan.

Aktuator *steering* yang digunakan dalam penelitian ini berupa motor *Brushless Direct Current* (BLDC) dari unit Segway-Ninebot. Motor BLDC memiliki beberapa karakteristik yang mendukung penggunaannya sebagai aktuator, antara lain efisiensi tinggi, kemampuan menghasilkan torsi yang baik, respons dinamik yang cepat, serta kebutuhan perawatan yang relatif rendah karena tidak menggunakan sikat mekanik[5]. Karakteristik tersebut sesuai dengan kebutuhan mekanisme *steering* yang memerlukan gerakan dua arah, perubahan posisi secara berulang, kemampuan menghasilkan torsi penahan, dan gerakan yang halus pada kecepatan relatif rendah.

Kinerja motor BLDC dipengaruhi oleh metode pengendalian yang digunakan. Metode komutasi *six-step* relatif sederhana untuk diterapkan, tetapi proses komutasi secara diskrit dapat menghasilkan riak torsi yang lebih besar. Perbandingan antara metode *six-step* dan *Field Oriented Control* (FOC) menunjukkan adanya perbedaan pada karakteristik riak torsi dan kinerja pengendalian motor [6]. Pada aplikasi *steering*, perubahan torsi yang tidak halus dapat memengaruhi respons dan kestabilan posisi aktuator. Berdasarkan pertimbangan tersebut, metode FOC digunakan pada penelitian ini. FOC mengendalikan motor melalui transformasi besaran arus tiga fasa ke kerangka koordinat berputar sehingga komponen arus yang berkaitan dengan pembentukan fluks dan torsi dapat dikendalikan secara terpisah [5][7].

Untuk membentuk sistem kendali tertutup, diperlukan informasi posisi aktual aktuator. Pada penelitian ini, umpan balik posisi diperoleh menggunakan *encoder incremental kuadratur* yang terdapat pada unit motor Segway-Ninebot. *Encoder* menghasilkan kanal A dan kanal B dengan perbedaan fasa sehingga perubahan posisi dan arah putaran dapat ditentukan [8]. Data hasil pencacahan *encoder* digunakan untuk memperoleh posisi mekanik aktuator *steering*. Karena *encoder* bersifat *incremental*, implementasi sistem memerlukan proses penentuan arah pencacahan, faktor konversi hitungan terhadap sudut, titik tengah kemudi, batas

sudut operasi, serta proses kalibrasi yang diperlukan sebelum sistem kendali tertutup diaktifkan.

Pengendalian motor berbasis FOC membutuhkan pengaturan arus motor dan pembangkitan tegangan tiga fasa melalui inverter. Pada penelitian ini, perintah tegangan direalisasikan menggunakan teknik *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM). Pemilihan teknik modulasi dapat memengaruhi karakteristik tegangan keluaran dan riak torsi motor [9]. Pelaksanaan FOC dan SVPWM secara *real time* juga membutuhkan perangkat kendali yang mampu melakukan akuisisi sinyal, perhitungan transformasi koordinat, pengendalian arus, serta pembangkitan PWM dalam periode eksekusi yang sesuai [10].

Perangkat keras yang digunakan adalah *controller hoverboard* berbasis STM32F103RCT6 yang telah dilengkapi inverter tiga fasa dan rangkaian pengukuran arus motor [11]. Oleh karena itu, penelitian tidak berfokus pada perancangan inverter baru, melainkan pada pemanfaatan dan penyesuaian perangkat keras yang telah tersedia melalui pengembangan *firmware*. Pengembangan tersebut meliputi integrasi *encoder*, proses identifikasi dan kalibrasi motor, penerapan FOC dan SVPWM, pengaturan batas operasi, serta implementasi kendali posisi pada aktuator *steering*.

Berdasarkan literatur yang ditinjau, penelitian terdahulu telah membahas sistem kendali sudut *steering*, pengendalian motor BLDC menggunakan FOC, penggunaan *encoder* incremental sebagai umpan balik posisi, serta implementasi kendali motor secara *real time*. Namun, pada literatur yang digunakan dalam penelitian ini, pembahasan mengenai integrasi motor BLDC Segway-Ninebot, *encoder* incremental kuadratur, metode FOC, dan *controller hoverboard* STM32F103RCT6 sebagai satu sistem kendali posisi *steering* pada ADV masih terbatas. Implementasi pada perangkat tersebut memerlukan penyesuaian pembacaan *encoder*, kalibrasi posisi, penentuan titik tengah dan batas aman kemudi, serta penyesuaian parameter kendali agar aktuator mampu mengikuti referensi sudut yang diberikan.

Pengembangan *Autonomous Delivery Vehicle* (ADV) pada penelitian ini merupakan bagian dari sistem terintegrasi dalam satu tim Tugas Akhir yang terdiri atas tiga subsistem, yaitu persepsi, navigasi, dan pengendalian aktuator. Subsistem persepsi berfokus pada pengolahan data kamera menggunakan YOLOPv2 untuk memperoleh informasi lingkungan, sedangkan subsistem navigasi berfokus pada estimasi pose dan perencanaan jalur menggunakan Navigation2. Penelitian ini berfokus pada subsistem pengendalian aktuator *steering*, yaitu pengendalian posisi motor BLDC berbasis *Field Oriented Control* (FOC) menggunakan STM32F103RCT6 dan *encoder incremental* sebagai umpan balik posisi. Ketiga subsistem tersebut saling terintegrasi pada platform ADV yang sama.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan mengimplementasikan sistem kendali posisi *steering* motor BLDC Segway-Ninebot menggunakan *encoder incremental* kuadratur sebagai umpan balik posisi pada *Autonomous Delivery Vehicle*?
2. Bagaimana mengimplementasikan *Field Oriented Control* (FOC), (SVPWM), loop pengendali arus d-q, serta pengendali posisi pada *controller hoverboard* berbasis STM32F103RCT6 untuk mengendalikan aktuator *steering*?
3. Bagaimana kinerja sistem kendali posisi *steering* berdasarkan hasil kalibrasi, *Error* posisi, RMSE, *repeatability*, simetri *steering*, respons arus motor, dan perubahan kinerja pada variasi beban?

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem kendali posisi *steering* menggunakan motor BLDC Segway-Ninebot dan *encoder incremental* kuadratur sebagai umpan balik posisi pada *Autonomous Delivery Vehicle*.

2. Mengimplementasikan FOC, SVPWM, pengendali arus d-q, dan pengendali posisi pada *controller hoverboard* berbasis STM32F103RCT6 sehingga motor dapat menghasilkan gerakan *steering* sesuai referensi yang diberikan.
3. Menguji dan menganalisis kinerja sistem kendali posisi *steering* berdasarkan hasil kalibrasi sensor, *Error* posisi, RMSE, repeatability, simetri kiri-kanan, respons arus motor, serta pengaruh variasi beban.

1.4 Manfaat Tugas Akhir

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Bagi Penulis

Penelitian ini memberikan pengalaman dalam perancangan dan implementasi sistem kendali motor BLDC berbasis FOC, integrasi *encoder* incremental, kalibrasi sistem *steering*, tuning loop arus dan loop posisi, serta pengolahan data eksperimen pada aktuator kendaraan otonom.

2. Bagi Pengembangan

Hasil penelitian dapat digunakan sebagai implementasi aktuator *steering* berbasis motor BLDC yang menerima referensi sudut dari sistem tingkat atas dan merealisasikannya menggunakan kendali posisi tertutup berbasis *encoder* dan FOC.

3. Bagi Pembaca

Hasil penelitian dapat menjadi referensi pengembangan sistem *steering* motor BLDC berbasis STM32F103RCT6, terutama pada integrasi *encoder* kuadratur, implementasi FOC, tuning kendali posisi, evaluasi pengaruh beban, dan integrasi dengan sistem kendaraan otonom.

1.5 Pembatasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan tidak meluas dari tujuan yang ingin dicapai, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada perancangan, implementasi, kalibrasi, tuning, dan pengujian sistem kendali posisi *steering* pada *Autonomous Delivery Vehicle*.

2. Aktuator *steering* yang digunakan adalah motor BLDC yang berasal dari unit Segway-Ninebot.
3. Kontroler motor yang digunakan adalah *hoverboard controller* berbasis STM32F103RCT6 dengan inverter tiga fasa dan rangkaian *current sensing* yang telah terintegrasi pada PCB.
4. Sensor utama untuk umpan balik posisi *steering* adalah *encoder incremental* kuadratur kanal A/B yang dibaca melalui antarmuka *quadrature encoder* pada STM32F103RCT6. Penelitian ini tidak menggunakan sensor Hall sebagai umpan balik utama posisi *steering*.
5. Metode pengendalian motor menggunakan *Field Oriented Control* dengan SVPWM, loop pengendali arus d-q sebagai loop bagian dalam, dan loop kendali posisi sebagai loop bagian luar.
6. Referensi arus sumbu-d ditetapkan sebesar nol, sedangkan referensi arus sumbu-q digunakan sebagai komponen utama pembentukan torsi *steering*.
7. Masukan sistem berupa referensi sudut *steering* yang telah dihasilkan oleh sistem tingkat atas. Penelitian ini tidak membahas persepsi lingkungan, lokalisasi, maupun *path planning* secara mendalam.
8. Evaluasi *repeatability* dilakukan melalui pengulangan posisi *steering*, sedangkan simetri dianalisis dengan membandingkan respons arah kiri dan kanan pada magnitudo referensi yang sama.
9. Pengujian pengaruh beban dilakukan dengan roda depan menyentuh permukaan lantai dan kendaraan dalam kondisi diam menggunakan beberapa variasi pembebanan.
10. Validasi integrasi *steering* dilakukan ketika ADV bergerak menggunakan perintah *steering* dari teleoperasi untuk memastikan aktuator dapat menerima dan melaksanakan referensi sudut saat kendaraan bergerak.
11. Evaluasi kinerja menggunakan data target *steering*, posisi aktual, *Error* posisi, RMSE atau MAE, *repeatability*, simetri, arus sumbu-q, arus motor, *duty cycle*, dan status *fault*.

12. Penelitian ini tidak membahas Ackermann secara mendalam dan tidak melakukan pengujian Ackermann.

1.6 Sistematika Tugas Akhir

Dalam penulisan laporan tugas akhir ini, terdapat sistematika penyusunan laporan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, manfaat, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan laporan.

BAB II DASAR TEORI

Berisikan mengenai teori-teori dasar yang mendukung pada topik penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN

Berisikan tentang diagram blok sistem, gambar 3D, komponen-komponen yang dibutuhkan pada perancangan alat, membahas bagaimana sistem berjalan, membahas spesifikasi sistem dan Teknik fabrikasinya.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA

Berisikan hasil pengujian aktual *steering* yang meliputi kalibrasi, tuning, dan pengujian dengan beban. Analisis dilakukan berdasarkan data aktual hasil perekaman telemetri pengujian.

BAB V PENUTUP

Bagian ini berisi kesimpulan yang disusun berdasarkan hasil pengujian dan analisis sistem serta saran untuk pengembangan sistem *steering* pada penelitian selanjutnya.