

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem kendali posisi *steering* motor BLDC berbasis *Field Oriented Control* pada *Autonomous Delivery Vehicle*, diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem kendali posisi *steering* berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan motor BLDC Segway-Ninebot dengan *encoder* incremental kuadratur sebagai umpan balik posisi. Pengujian linearitas pada -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, dan $+20^\circ$ menghasilkan error 0° pada resolusi data yang direkam, dan posisi tengah terbaca 0° pada tiga kali pengulangan. *Steering* mencapai batas -28° dan $+28^\circ$ dengan error absolut $0,054^\circ$ dan $0,458^\circ$, sedangkan proses *alignment* menghasilkan posisi yang sama ($27,7327^\circ$) pada tiga pengulangan. Dengan demikian, *encoder* dapat digunakan sebagai umpan balik posisi pada sistem *steering*.
2. Metode FOC yang terdiri atas SVPWM, pengendali arus d-q sebagai *inner loop*, dan pengendali posisi sebagai *outer loop* berhasil diimplementasikan pada *hoverboard controller* STM32F103RCT6. Pada loop arus, RMSE Iq menurun dari 0,450 A menjadi 0,093 A saat Kp dinaikkan dari 0,2 menjadi 1,2, dan mencapai 0,066 A pada Ki = 225,043. Loop arus mengikuti referensi Iq 0,5; 1,0; dan 1,5 A dengan Iq maksimum 0,49; 0,99; dan 1,49 A serta Id tetap di sekitar 0 A. Pada pengendali posisi, peningkatan Kp dari 0,0125 hingga 0,0375 menurunkan RMSE dari $1,574^\circ$ menjadi $0,999^\circ$. Pengaruh Ki tidak monoton, dengan RMSE $1,173^\circ$ pada Ki = 0 dan $0,789^\circ$ pada Ki = 0,005, sedangkan penambahan Kd tidak menurunkan RMSE. Parameter akhir Kp = 0,0375, Ki = 0,0025, dan Kd = 0 sehingga pengendali bekerja sebagai PI posisi, dengan RMSE $0,772^\circ$, MAE $0,499^\circ$, error maksimum $2,349^\circ$, dan Iq maksimum 1,099 A
3. Dengan parameter akhir tersebut, sistem mampu mengikuti referensi sudut pada pengujian setpoint absolut (RMSE $0,775^\circ$), respons langkah $\pm 10^\circ$ ($0,903^\circ$) dan

$\pm 20^\circ$ (0,385°), *repeatability* $\pm 20^\circ$ (0,575°), serta simetri kiri-kanan pada $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, dan $\pm 25^\circ$ (0,785°, error maksimum 3,286°). Namun, ketika roda menyentuh rantai dengan beban 0, 1, 2, dan 3 galon (0, 16, 32, dan 48 kg), RMSE posisi menjadi 10,448°; 10,405°; 11,265°; dan 11,523°. Perbedaan yang kecil antara 0 dan 1 galon menunjukkan bahwa error yang besar sudah terjadi pada kondisi tanpa beban tambahan, sehingga kontak roda dengan rantai tampaknya berpengaruh lebih besar daripada massa beban. Iq puncak positif meningkat dari 5,59 A menjadi 6,27 A seiring penambahan beban, tetapi Iq RMS (3,804–4,167 A) tidak meningkat secara berurutan. Hasil tersebut menunjukkan sistem telah menjalankan fungsi kendali posisi *steering* berbasis FOC, namun kinerja pada kondisi roda berkontak dengan rantai dan berbeban belum memadai dan perlu ditingkatkan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, pengembangan selanjutnya disarankan sebagai berikut:

1. Penalaan ulang *outer position-loop* pada kondisi roda menyentuh rantai dan berbeban. Parameter akhir ($K_p = 0,0375$, $K_i = 0,0025$, $K_d = 0$) ditentukan pada pengujian dengan Iq maksimum sekitar 1,1–1,5 A, sedangkan pada uji beban Iq puncak mencapai 5,6–7,2 A. Penalaan berulang pada kondisi berbeban, atau *gain scheduling* berdasarkan besar sudut dan beban, dapat dievaluasi untuk menurunkan error.
2. Kompensasi gesekan. Karakteristik mekanis *steering*, yaitu gesekan, *stiction*, *dead zone*, dan kekakuan mekanisme penghubung, perlu diidentifikasi. Kompensasi gesekan berupa *feedforward* pada referensi Iq dapat dikembangkan agar motor menghasilkan torsi awal yang cukup saat *steering* mulai bergerak.
3. Analisis kebutuhan torsi terhadap kapasitas motor. Kebutuhan torsi pada berbagai beban dibandingkan dengan torsi maksimum yang dapat dihasilkan motor berdasarkan batas arus, konstanta torsi, dan rasio mekanis. Iq puncak yang terukur (5,6–7,2 A) perlu dibandingkan dengan batas arus *steering* pada *firmware* untuk memastikan apakah aktuator mengalami saturasi. Peningkatan

batas arus tidak sebaiknya menjadi satu-satunya solusi, tetapi disesuaikan dengan kemampuan motor, inverter, dan keamanan sistem.

4. Peningkatan laju pencatatan data dan penetapan kriteria kinerja. Sebagian besar data pada penelitian ini direkam pada 1 sampel per detik sehingga respons transien tidak seluruhnya terekam. Pencatatan yang lebih cepat (mis. 50–100 Hz) memungkinkan perhitungan *rise time*, *settling time* (kriteria 2%), dan *overshoot*, serta perlu disertai kriteria kuantitatif error yang dapat diterima untuk aplikasi ADV