



**PERANCANGAN SISTEM KENDALI POSISI *STEERING* MOTOR BLDC
BERBASIS *FIELD ORIENTED CONTROL* (FOC) MENGGUNAKAN
STM32F103RCT6 DAN SENSOR *ENCODER* PADA *AUTONOMOUS
DELIVERY VEHICLE***

LAPORAN TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat menyelesaikan pendidikan pada
Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro

Oleh :

Firda Amanda Fitri
40040322650049

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN TEKNOLOGI REKAYASA
OTOMASI
DEPARTEMEN TEKNOLOGI INDUSTRI SEKOLAH VOKASI
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2026**

LAPORAN TUGAS AKHIR

PERANCANGAN SISTEM KENDALI POSISI *STEERING* MOTOR BLDC
BERBASIS *FIELD ORIENTED CONTROL* (FOC) MENGGUNAKAN
STM32F103RCT6 DAN SENSOR *ENCODER* PADA *AUTONOMOUS*
DELIVERY VEHICLE

Diajukan oleh:

Firda Amanda Fitri

40040322650049

TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH

Menyetujui

Dosen Pembimbing



Rofiq Cahyo Prayogo, S.T., M.T.

NIP 199505292024061001

Tanggal 28 September 2026

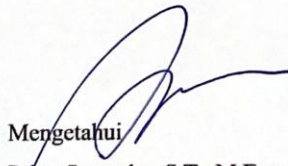
Mengetahui

Ketua

Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro



Mengetahui

Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng

NIP. 197009161998021001

Tanggal 28 September 2026

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR
PERANCANGAN SISTEM KENDALI POSISI *STEERING* MOTOR BLDC
BERBASIS *FIELD ORIENTED CONTROL* (FOC) MENGGUNAKAN
STM32F103RCT6 DAN SENSOR *ENCODER* PADA *AUTONOMOUS*
DELIVERY VEHICLE

Disusun oleh:
Firda Amanda Fitri
NIM 40040322650049

Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji pada tanggal
28 September 2026

Tim Penguji,
Dosen Pembimbing


Rofiq Cahyo Prayogo, S.T., M.T.
NIP. 199505292024061001

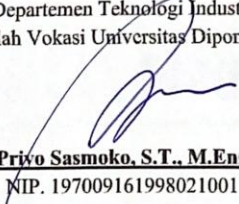
Penguji 1

Luthfansyah Mohammad, S.Tr.T., M.T.
NIP. H.7.199609132022041001

Penguji 2

Megarini Hersaputri, ST, MT
NIP. 198902142020122012

Mengetahui,
Ketua Program Studi S.Tr. Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri
Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro


Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng
NIP. 197009161998021001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Firda Amanda Fitri
NIM : 40040322650049
Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi
Judul Tugas Akhir : Perancangan Sistem Kendali Posisi *Steering*
Motor BLDC Berbasis *Field Oriented Control*
(FOC) Menggunakan STM32F103RCT6 dan
Sensor *Encoder* Pada *Autonomous Delivery*
Vehicle

Dengan ini menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh derajat keahlian di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dirujuk dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti plagiat dalam tugas akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan Mendiknas RI No.17 tahun 2010 dan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, 24 September 2026

Penulis,



Firda Amanda Fitri

KATA PENGANTAR

Puji Syukur alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, karunia, serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini dengan baik. Shalawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad SAW yang menjadi teladan dan inspirasi dalam setiap Langkah kehidupan penulis. Laporan Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T.) pada Program Studi Rekayasa Otomasi. Dalam proses penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memperoleh banyak bantuan, bimbingan, dukungan, serta doa dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Budiyono, M.Si., selaku Dekan Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro, yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas kepada penulis untuk menempuh pendidikan di Sekolah Vokasi Universitas Diponegoro.
2. Bapak Priyo Sasmoko, S.T., M.Eng., selaku Ketua Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro, yang telah memberikan arahan serta dukungan selama penulis menempuh pendidikan.
3. Bapak Rofiq Cahyo Prayogo, selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, ilmu, motivasi, kritik, serta masukan kepada penulis sejak proses perancangan, pelaksanaan penelitian, pengujian, hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro, yang telah memberikan ilmu, pengalaman, bimbingan, serta bantuan kepada penulis selama menjalani masa perkuliahan.
5. Kedua orang tua tercinta, Bapak Sumardi dan Ibu Hartini, yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, perhatian, kepercayaan, dukungan moral

maupun material, serta pengorbanan yang tidak ternilai kepada penulis sejak awal menempuh pendidikan hingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Kakak tercinta penulis, Femylia dan Yusuf, serta keponakan tersayang, Alfath, yang senantiasa memberikan kasih sayang, perhatian, dukungan, semangat, serta kebahagiaan kepada penulis selama menjalani masa perkuliahan hingga menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Seluruh keluarga besar penulis yang senantiasa memberikan doa, perhatian, motivasi, dan dukungan kepada penulis selama menempuh pendidikan hingga menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Mikail Azka Dziaulhaq, yang senantiasa menemani penulis dalam berbagai proses selama perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir. Terima kasih atas waktu, perhatian, bantuan, dukungan, dan semangat yang diberikan, serta kesediaannya menjadi tempat berbagi cerita, bertukar pikiran, dan berkeluh kesah dalam menghadapi berbagai proses dan tantangan hingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan.
9. Nadia Nur Rufaidhah, teman sekamar sekaligus sahabat penulis sejak masa mahasiswa baru, yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama menempuh pendidikan. Terima kasih atas kebersamaan, perhatian, bantuan, semangat, serta berbagai suka dan duka yang telah dilalui bersama selama masa perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
10. Rekan satu kelompok Tugas Akhir, Azka Bintang Nur Taqwa dan Davi Rizky Pratama, yang telah menjadi rekan seperjuangan dalam proses perancangan dan pengembangan *Autonomous Delivery Vehicle (ADV)*, serta telah bekerja sama, berdiskusi, bertukar pikiran, saling membantu dalam proses integrasi sistem, pengujian, pengambilan data, hingga penyelesaian Tugas Akhir.
11. Teman-teman Satnayaka yang telah menjadi bagian dari perjalanan penulis selama masa perkuliahan serta memberikan kebersamaan, bantuan, semangat, dukungan, dan berbagai pengalaman berharga yang akan selalu menjadi bagian dari perjalanan penulis.

12. Seluruh pihak yang telah membantu dalam proses perancangan, pembuatan, integrasi, dan pengujian *Autonomous Delivery Vehicle* (ADV), baik melalui bantuan teknis, peminjaman fasilitas dan peralatan, diskusi, maupun bentuk bantuan lainnya sehingga proses penelitian dan pengambilan data Tugas Akhir dapat terlaksana dengan baik.
13. Seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan, doa, motivasi, maupun kontribusi kepada penulis selama menjalani masa perkuliahan dan penyusunan Tugas Akhir yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
14. Terakhir, kepada diri penulis sendiri yang telah berusaha untuk tetap bertahan, belajar, dan menyelesaikan setiap proses yang dilalui selama masa perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir ini. Terima kasih karena telah berusaha menyelesaikan tanggung jawab ini dengan sebaik-baiknya meskipun dalam prosesnya terdapat berbagai tantangan dan kesulitan.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai bahan perbaikan pada masa mendatang. Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan pihak-pihak yang berkepentingan.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN LAPORAN TUGAS AKHIR.....**Error! Bookmark not defined.**

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT.....	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
INTISARI.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Tugas Akhir	4
1.4 Manfaat Tugas Akhir	5
1.5 Pembatasan Masalah	5
1.6 Sistematika Tugas Akhir	7
BAB II.....	8
DASAR TEORI	8
2.1 Tinjauan Pustaka	8
2.2 Autonomous Delivery Vehicle (ADV)	12
2.3 Sistem Steering pada Autonomous Delivery Vehicle.....	13
2.3.1 Geometri <i>Steering</i> Ackermann.....	14
2.4 Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC).....	16
2.4.1 Prinsip kerja motor BLDC	17
2.4.2 Spesifikasi Motor BLDC	18
2.4.3 Model matematis motor BLDC.....	19
2.5 Sensor <i>Encoder</i> Incremental Kuadratur	21

2.5.1	Prinsip <i>Encoder</i> Kanal A/B.....	21
2.5.2	Konversi <i>Count Encoder</i> menjadi Sudut <i>Steering</i>	22
2.5.3	Hubungan Sudut Mekanik dan Sudut Elektrik	23
2.6	<i>Field Oriented Control</i> (FOC)	24
2.6.1	Konsep Dasar FOC	25
2.6.2	Pengukuran dan Rekonstruksi Arus Fasa.....	26
2.6.3	Transformasi Clarke	28
2.6.4	Transformasi Park	29
2.6.5	Pengendali PI Arus d-q	30
2.6.6	Transformasi Invers Park	31
2.7	<i>Space Vector PWM</i> (SVPWM)	32
2.8	Sistem Kendali Posisi <i>Steering</i>	33
2.8.1	<i>Error</i> Posisi <i>Steering</i>	34
2.8.2	Pengendali PID Posisi (PID dengan $K_d = 0$)	34
2.8.3	Arsitektur Cascade Posisi-FOC	36
2.8.4	Saturasi, Anti-Windup, dan <i>Soft Limit</i>	37
2.9	Controller Hoverboard	37
2.9.1	Mikrokontroler STM32F103RCT6.....	38
2.9.2	Arsitektur Controller Hoverboard	38
2.9.3	Inverter Tiga Fasa dan Current Sensing.....	39
2.10	Parameter Evaluasi Kinerja Sistem.....	40
2.10.1	Steady-State <i>Error</i> dan RMSE.....	40
2.10.2	<i>Repeatability</i> dan Simetri <i>Steering</i>	41
2.10.3	Respons Arus FOC dan <i>Duty cycle</i>	41
2.10.4	Respons Terhadap Variasi Beban	42
BAB III		43
METODE PENELITIAN.....		43
3.1	Diagram Blok Sistem	43
3.1.1	Diagram Blok Sistem Keseluruhan Autonomous Delivery Vehicle	

3.1.2	Diagram Blok Distribusi Daya.....	46
3.1.3	Diagram Blok Kendali Steering.....	48
3.2	Flowchart Sistem.....	49
3.3	Perancangan Mekanikal dan Desain Tiga Dimensi Autonomous Delivery Vehicle	53
3.3.1	Desain Tiga Dimensi ADV	53
3.4	Spesifikasi dan Fitur Sistem.....	58
3.4.1	Spesifikasi perangkat Keras.....	58
3.4.2	Spesifikasi Sistem Kendali dan Perangkat Lunak.....	59
3.4.3	Fitur Sistem	61
3.5	Teknik Fabrikasi dan Perakitan.....	62
3.5.1	Fabrikasi Mekanikal.....	62
3.5.2	Fabrikasi dan Perakitan Elektrikal	65
3.5.3	Perakitan PCB dan Wiring.....	67
3.6	Konfigurasi Controller STM32F103RCT6.....	69
3.6.1	Konfigurasi Sistem Clock	71
3.6.2	Konfigurasi Timer dan PWM.....	71
3.6.3	Konfigurasi <i>Encoder</i>	72
3.6.4	Konfigurasi ADC dan Sensor Arus.....	74
3.6.5	Konfigurasi Komunikasi Serial.....	76
3.6.6	Konfigurasi Interrupt dan Loop Kendali.....	76
3.6.7	Sistem Proteksi dan Watchdog.....	77
3.7	Implementasi Field-Oriented Control	79
3.7.1	Struktur kendali FOC	79
3.7.2	Akuisisi Arus Motor.....	80
3.7.3	Transformasi Clarke.....	80
3.7.4	Transformasi Park	82
3.7.5	Pengendali PI Arus d-q	82
3.7.6	Transformasi Inverse Park	84
3.7.7	Space Vector PWM.....	84

3.7.8	Pengendalian Inverter Tiga Fasa.....	85
3.7.9	Kendali posisi steering	86
3.8	Sistem Telemetry dan Monitoring	88
3.8.1	Data Telemetry.....	89
3.8.2	Alur Komunikasi Telemetry	90
3.8.3	Monitoring pada HMI dan ROS Web	91
3.9	Metode Tuning Sistem	91
3.9.1	Tahapan Tuning	92
3.9.2	Tuning FOC	93
3.9.3	Tuning Kendali Posisi	93
3.9.4	Prosedur Pengujian Bertahap	94
3.9.5	Kriteria Penentuan Parameter	95
BAB IV		97
PENGUJIAN DAN ANALISA.....		97
4.1	Verifikasi Dasar Sistem.....	97
4.1.1	Verifikasi Tegangan DC Bus dan Sensor Arus.....	97
4.1.2	<i>Linearitas Encoder Steering</i>	98
4.1.3	Verifikasi Titik Tengah	99
4.1.4	Verifikasi Batas Sudut dan Simetri Awal	100
4.1.5	Verifikasi Aligment Steering	101
4.2	Validasi Inner Current-Loop FOC	102
4.2.1	Pengujian Variasi Kp-Loop Arus.....	103
4.2.2	Pengujian variasi Ki Current Loop	104
4.2.3	Pengujian Variasi Referensi Iq.....	105
4.3	Penentuan dan Tuning Gain Pengendali Posisi.....	107
4.3.1	Pengujian Variasi Kp Pengendali Posisi	107
4.3.2	Pengujian Variasi Ki Pengendali Posisi	108
4.3.3	Pengujian Variasi Kd Pengendali Posisi	110
4.3.4	Penentuan Parameter PID Akhir	112
4.4	Validasi Kinerja dengan Gain Akhir	113

4.4.1	Setpoint Absolut.....	113
4.4.2	Respons Langkah $\pm 10^\circ$	113
4.4.3	Respons Langkah $\pm 20^\circ$	114
4.4.4	Repeatability Steering $\pm 20^\circ$	115
4.4.5	Simetri Arah Kiri dan Kanan	115
4.5	Pengujian Beban dan Karakteristik Torsi	116
4.5.1	Tracking Beban (0-3) Galon	117
4.5.2	Karakteristik Torsi Terhadap Beban	118
BAB V.....		120
PENUTUP.....		120
5.1	Kesimpulan	120
5.2	Saran.....	121
DAFTAR PUSTAKA		123
LAMPIRAN.....		126

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Autonomous Delivery Vehicle [1]	13
Gambar 2. 2 Geometri Steering Ackerman [14]	15
Gambar 2. 3 Struktur Motor BLDC yang Terdiri dari Stator, Rotor, Magnet Permanen, dan Komponen Mekanik Pendukung	17
Gambar 2. 4 Struktur dan Orientasi Medan Magnet Pada Motor BLDC [17]	18
Gambar 2. 5 BLDC Segway Ninebot.....	18
Gambar 2. 6 Bentuk Gelombang <i>Encoder</i> Kuadratur Kanal A dan B [21]	22
Gambar 2. 7 Diagram Ruang Vektor Tegangan [30].....	32
 Gambar 3. 1 Blok Diagram Keseluruhan	44
Gambar 3. 2 Blok Diagram Power	47
Gambar 3. 3 Blok Diagram Kontrol FOC	48
Gambar 3. 4 Flowchart Sistem Keseluruhan Autonomous Delivery Vehicle	50
Gambar 3. 5 Flowchart Kendali Posisi Steering	52
Gambar 3. 6 Desain penutup kompartemen elektronik dan penempatanperangkat pada ADV.....	54
Gambar 3. 7 Desain pemasangan penutup kompartemen elektronik pada ADV..	55
Gambar 3. 8 Desain tiga dimensi ADV tampak bawa	56
Gambar 3. 9 Proses Pengelasan dan Fabrikasi Rangka.....	63
Gambar 3. 10 Proses Pemotongan dan Perapian Material Logam.....	63
Gambar 3. 11 Proses Pemotongan Panel Kompartemen Menggunakan Laser Cutting.....	64
Gambar 3. 12 Proses Pengeboran dan Pemasangan Panel pada Rangka	65
Gambar 3. 13 Diagram Wiring Sistem Elektrikal.....	66
Gambar 3. 14 Skematik PCB Antarmuka STM32F411CEU6.....	67
Gambar 3. 15 Layout PCB.....	68
Gambar 3. 16 Hoverboard Controller	70
Gambar 3. 17 Skematik Umum Hoverboard Controller	70
Gambar 3. 18 Potongan Program Konfigurasi <i>Encoder</i> Incremental Menggunakan TIM4	73
Gambar 3. 19 Skematik Koneksi <i>Encoder</i>	73
Gambar 3. 20 Rangkaian Current Sensing pada Hoverboard Controller.....	74
Gambar 3. 21 Potongan Program Kalibrasi Offset ADC Sensor Arus	75
Gambar 3. 22 Potongan Program Pemantauan Watchdog Sistem	78
Gambar 3. 23 Potongan Program Transformasi Clarke, Park, dan Invers Park....	81
Gambar 3. 24 Potongan Program Pengendali PI Arus dan Pembatasan Integrator	83
Gambar 3. 25 Potongan Program Implementasi Space Vector PWM	85

Gambar 3. 26 Potongan Program Kendali Posisi Steering dan Pembentukan Referensi Arus Sumbu-q	87
Gambar 4. 1 Perbandingan Tegangan Vbus terhadap Pengukuran Multimeter	98
Gambar 4. 2 Perbandingan Setpoint dan Aktual <i>Encoder Steering</i>	99
Gambar 4. 3 Perbandingan Setpoint dan Aktual Posisi Steering	101
Gambar 4. 4 Grafik Variasi Kp	104
Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Respons Arus Iq pada Variasi Ki.....	105
Gambar 4. 6 Tracking Arus Iq Terhadap Variasi Referensi Iq	107
Gambar 4. 7 Pengaruh Variasi Kp Terhadap <i>Error Tracking</i> Posisi Steering....	108
Gambar 4. 8 Pengaruh Variasi Ki Terhadap <i>Error Tracking</i> Posisi Steering.....	109

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Tinjauan Pustaka	8
Tabel 2. 2 Spesifikasi Motor BLDC Segway-Ninebot.....	18
Tabel 2. 3 Fungsi Mikrokontroler STM32F103RCT6.....	38
 Tabel 3. 1 Keterangan Komponen pada Desain 3D Autonomous Delivery Vehicle	 56
Tabel 3. 2 Spesifikasi Perangkat Keras Autonomous Delivery Vehicle.....	58
Tabel 3. 3 Spesifikasi Sistem Kendali dan Perangkat Lunak ADV	60
Tabel 3. 4 Parameter Utama Pengujian.....	89
Tabel 3. 5 Kriteria Penentuan Parameter Kendali.....	95
 Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Tegangan DC Bus dan Sensor Arus	 97
Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Linearitas <i>Encoder Steering</i>	99
Tabel 4. 3 Hasil Verifikasi Titik Tengah	100
Tabel 4. 4 Hasil pengujian Batas Sudut	100
Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Verifikasi Aligment Steering.....	102
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Variasi Kp.....	103
Tabel 4. 7 Hasil pengujian Variasi Ki Loop	104
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Variasi Referensi Iq	106
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Variasi Kp.....	108
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Variasi Ki.....	109
Tabel 4. 11 Hasil Akhir Posisi Akhir	112
Tabel 4. 12 Hasil Pengujian Tracking Setpoint Absolut.....	113
Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Respon Step $\pm 10^\circ$	114
Tabel 4. 14 Respons $\pm 20^\circ$	114

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. 1 Pengujian Data.....	126
Lampiran 1. 2 Pengujian Tanpa Beban	126
Lampiran 1. 3 Proses Pembuatan Mekanik.....	126

INTISARI

PERANCANGAN SISTEM KENDALI POSISI PI *STEERING* MOTOR BLDC BERBASIS *FIELD ORIENTED CONTROL* (FOC) MENGUNAKAN STM32F103RCT6 DAN SENSOR *ENCODER* PADA *AUTONOMOUS DELIVERY VEHICLE*

Firda Amanda Fitri

Autonomous Delivery Vehicle (ADV) membutuhkan sistem *steering* yang mampu mengikuti referensi sudut secara akurat dan stabil. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan kendali posisi *steering* menggunakan motor *Brushless Direct Current* (BLDC) Segway-Ninebot dengan *encoder* incremental kuadratur sebagai umpan balik posisi dan *Field Oriented Control* (FOC) pada *hoverboard controller* berbasis STM32F103RCT6. Struktur kendali berupa *cascade* dengan loop arus d-q sebagai *inner loop* dan pengendali posisi sebagai *outer loop*, dengan SVPWM sebagai modulasi. Verifikasi menunjukkan pembacaan *encoder* tanpa selisih pada lima titik uji -20° hingga $+20^\circ$ dan posisi tengah yang konsisten pada tiga pengulangan. Loop arus mampu mengikuti referensi I_q 0,5–1,5 A dengan I_q maksimum 0,49; 0,99; dan 1,49 A serta I_d tetap di sekitar 0 A. Penalaan menghasilkan $K_p = 0,0375$, dan $K_i = 0,0025$, sehingga pengendali posisi bekerja sebagai PI; penambahan K_d tidak menurunkan RMSE ($2,443^\circ$ menjadi $2,471^\circ$ dan $2,594^\circ$). Dengan parameter tersebut, RMSE posisi berada pada $0,385$ – $0,903^\circ$ pada pengujian setpoint absolut serta respons langkah $\pm 10^\circ$ dan $\pm 20^\circ$, $0,575^\circ$ pada pengujian *repeatability* $\pm 20^\circ$, dan $0,785^\circ$ pada pengujian simetri. Pada kondisi roda menyentuh lantai dengan beban 0–3 galon (0–48 kg), RMSE posisi meningkat menjadi $10,405$ – $11,523^\circ$ dengan I_q puncak positif 5,59–6,27 A. Hasil menunjukkan sistem FOC berfungsi dan mampu mengendalikan posisi *steering* dengan baik pada kondisi ringan, sedangkan kinerja pada kondisi roda berkontak dengan lantai dan berbeban masih perlu ditingkatkan melalui penalaan ulang, kompensasi gesekan, dan analisis kebutuhan torsi.

Kata kunci: *Autonomous Delivery Vehicle*, BLDC, *Field Oriented Control*, *steering*, STM32F103RCT6

ABSTRACT

DESIGN OF A BLDC MOTOR STEERING POSITION CONTROL PI SYSTEM BASED ON FIELD-ORIENTED CONTROL (FOC) USING STM32F103RCT6 AND AN *ENCODER* SENSOR FOR AN AUTONOMOUS DELIVERY VEHICLE

Firda Amanda Fitri

An Autonomous Delivery Vehicle (ADV) requires a steering system that can track angular references accurately and stably. This study designs and implements a steering position controller using a Segway-Ninebot Brushless Direct Current (BLDC) motor, with a quadrature incremental encoder as position feedback and Field Oriented Control (FOC) on an STM32F103RCT6-based hoverboard controller. The control structure is a cascade with a d-q current loop as the inner loop and a position controller as the outer loop, using SVPWM. Verification showed no difference between the reference and encoder readings at five test points from -20° to $+20^\circ$, and a consistent center position over three repetitions. The current loop tracked I_q references of 0.5–1.5 A, with maximum I_q of 0.49, 0.99, and 1.49 A and I_d remaining near 0 A. Tuning resulted in $K_p = 0.0375$, and $K_i = 0.0025$, so the position controller operates as a PI controller; adding K_d did not reduce the RMSE (2.443° to 2.471° and 2.594°). With these parameters, the position RMSE was 0.385 – 0.903° in the absolute setpoint test and the $\pm 10^\circ$ and $\pm 20^\circ$ step responses, 0.575° in the $\pm 20^\circ$ repeatability test, and 0.785° in the symmetry test. With the wheels in contact with the floor and loads of 0–3 gallons (0–48 kg), the position RMSE increased to 10.405 – 11.523° , with positive peak I_q of 5.59–6.27 A. The results show that the FOC-based system works and controls steering position well under light conditions, while performance with the wheels in contact with the floor and under load still needs improvement through re-tuning, friction compensation, and torque-requirement analysis.

Keywords: Autonomous Delivery Vehicle, BLDC, Field Oriented Control, steering, STM32F103RCT6