

RANCANG BANGUN SISTEM KENDALI *SWERVE DRIVE* ROBOT *AUTONOMOUS* BERBASIS *FIELD ORIENTED CONTROL* DAN *PROPORTIONAL INTEGRAL DERIVATIF CONTROL* UNTUK KONTROL POSISI

*Aufa Rofiqi Abdillah¹, M. Munadi², Mochammad Ariyanto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: aufaopexck@gmail.com

Abstrak

Robot *swerve drive* memiliki kemampuan gerak omnidireksional yang tinggi, namun memerlukan sistem kendali posisi motor steering yang cepat, presisi, dan stabil. Penelitian ini membahas perancangan dan implementasi sistem kendali tertanam (*embedded control*) untuk satu modul steering *swerve drive* berbasis motor BLDC dengan menggunakan arsitektur *cascaded control loop* pada mikrokontroler STM32F405RGT6. Arsitektur ini terdiri atas loop dalam (*inner loop*) yang menjalankan algoritma *Field-Oriented Control* (FOC) untuk mengatur arus dan torsi motor secara presisi, serta loop luar (*outer loop*) yang menggunakan kontroler PID untuk mengatur posisi sudut roda. Penelitian dilakukan melalui perancangan PCB kustom, pembuatan firmware FOC dan PID, serta pengujian eksperimental guna mengevaluasi performa sistem. Hasil pengujian *inner loop* FOC menunjukkan bahwa arus sumbu-d dapat dipertahankan mendekati 0 ampere, sesuai teori FOC untuk efisiensi maksimum. Pengujian *outer loop* PID dilakukan dengan analisis respons langkah (*step response*). Parameter awal PID menghasilkan osilasi tinggi dan waktu tunak (*settling time*) yang lama ($T_s > 2000$ ms). Setelah dilakukan tuning, terutama pada gain derivatif (K_d), sistem menunjukkan peningkatan signifikan dengan *rise time* sekitar 100 ms, *settling time* sekitar 160 ms, dan *overshoot* sebesar 2,7%. Sistem juga terbukti mampu melacak perubahan setpoint multi-langkah secara akurat dan stabil. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan arsitektur PID dan FOC pada STM32 efektif dalam menghasilkan kendali posisi motor yang cepat, dan stabil untuk aplikasi steering pada sistem *swerve drive*.

Kata Kunci: *field-oriented control* (foc); kendali posisi; motor bldc; pid; stm32

Abstract

The *swerve drive* robot provides high omnidirectional mobility but requires a fast, precise, and stable steering motor position control system. This research presents the design and implementation of an embedded control system for a single *swerve drive* steering module using a BLDC motor and a cascaded control loop architecture implemented on the STM32F405RGT6 microcontroller. The architecture consists of an inner loop running the Field-Oriented Control (FOC) algorithm to precisely regulate motor current and torque, and an outer loop using a PID controller to control the wheel's steering position. The study involves custom PCB design, firmware development for FOC and PID, and experimental testing to evaluate system performance. The inner loop FOC test results show that the d-axis current can be maintained near 0 ampere, consistent with the FOC theory for maximum efficiency. The outer loop PID performance was evaluated using step response analysis. The initial PID parameters produced high oscillations and a long settling time ($T_s > 2000$ ms). After tuning, particularly by adjusting the derivative gain (K_d), the system achieved a significant performance improvement with a rise time of approximately 100 ms, settling time of about 160 ms, and a controlled overshoot of 2.7%. The system also demonstrated accurate and stable tracking of multi-step setpoint variations. This research confirms that the PID-FOC architecture implemented on the STM32 microcontroller is effective in achieving fast, and stable motor position control for *swerve drive* steering applications.

Keywords: bldc motor; *field-oriented control* (foc); pid; position control; stm32

1. Pendahuluan

Pengembangan *Autonomous Mobile Robot* (AMR) menuntut kemampuan manuver yang tinggi untuk beroperasi di lingkungan yang dinamis dan terbatas. Salah satu solusi mekanisme penggerak yang menawarkan fleksibilitas tinggi adalah *swerve drive*. Mekanisme ini memungkinkan setiap modul roda untuk dikemudikan secara independen, sehingga robot dapat bergerak secara *holonomic* (segala arah) tanpa mengubah orientasi badannya. Berdasarkan studi Vranas & Mourtos, *swerve drive* memungkinkan robot bermanuver di ruang sempit dengan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan sistem kemudi konvensional [1]. Selain itu, perbandingan kinematika menunjukkan bahwa konfigurasi ini unggul dalam fleksibilitas lintasan dibandingkan *differential drive* maupun *ackermann steering* [2].

Meskipun memiliki keunggulan manuver, *swerve drive* memiliki tantangan dalam kompleksitas kendali yang harus menyinkronkan kecepatan dan orientasi sudut secara *real-time* [3],[11]. Metode konvensional seperti komutasi *trapezoidal* sering kali menghasilkan riak torsi (*torque ripple*) yang mengganggu stabilitas robot pada kecepatan rendah[15]. Sebagai solusi, algoritma *Field Oriented Control* (FOC) diterapkan untuk meningkatkan efisiensi dan kehalusan gerak motor BLDC [4], [12]. Penelitian Rosyidin et al. juga menegaskan bahwa penerapan kinematika yang tepat pada motor BLDC sangat krusial untuk mencapai pergerakan omnidirectional yang akurat [5].

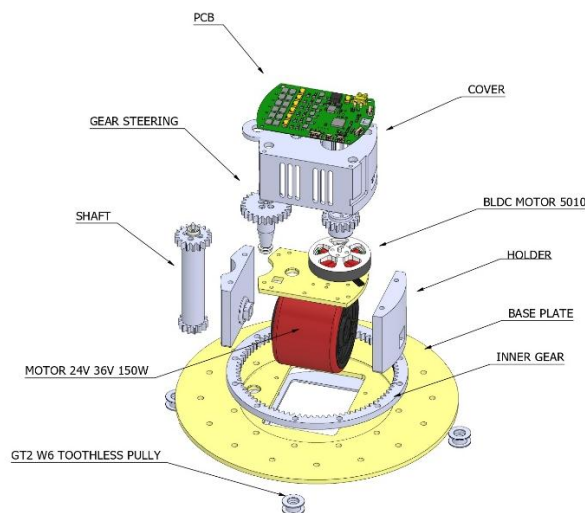
Penelitian ini mengusulkan penggunaan arsitektur *Cascade Control* yang mengintegrasikan FOC pada *inner loop* dan PID pada *outer loop*. Pendekatan ini bertujuan untuk mengatasi masalah ketidaklinieran sistem dan gangguan eksternal, sebagaimana dibahas dalam strategi kendali pelacakan jalur kendaraan otonom [6]. Dengan memanfaatkan mikrokontroler STM32 dan umpan balik encoder presisi, sistem diharapkan mampu menghasilkan respon posisi yang cepat, stabil, dan hemat energi.

2. Metodologi Penelitian

2.1 Desain Mekanis

Desain mekanis modul *swerve drive* yang di tunjukan pada Gambar 1 dirancang dengan mempertimbangkan aspek presisi odometri, kekompakan dimensi, dan fleksibilitas rotasi. Struktur mekanis terdiri dari dua aktuator utama, yaitu *wheeled motor* untuk traksi dan *steering motor* untuk kendali arah. Konfigurasi Transmisi Penggerak Pada mekanisme penggerak roda (*wheeled motor*), motor BLDC diaplikasikan menggunakan konfigurasi *direct drive* tanpa adanya rasio roda gigi tambahan. Pendekatan ini dipilih untuk mengeliminasi *backlash* pada transmisi yang sering kali menjadi sumber kesalahan (*error*) pada pembacaan odometri robot [8]. Sebaliknya, motor BLDC pada bagian *steering* ditempatkan di atas modul roda dan dihubungkan menggunakan rasio roda gigi (*gear ratio*). Penggunaan reduksi gigi pada *steering* bertujuan untuk melipatgandakan torsi agar mampu memutar. arah roda dengan beban gesek lantai, sekaligus menciptakan dimensi modul yang ringkas (*compact*) secara keseluruhan.

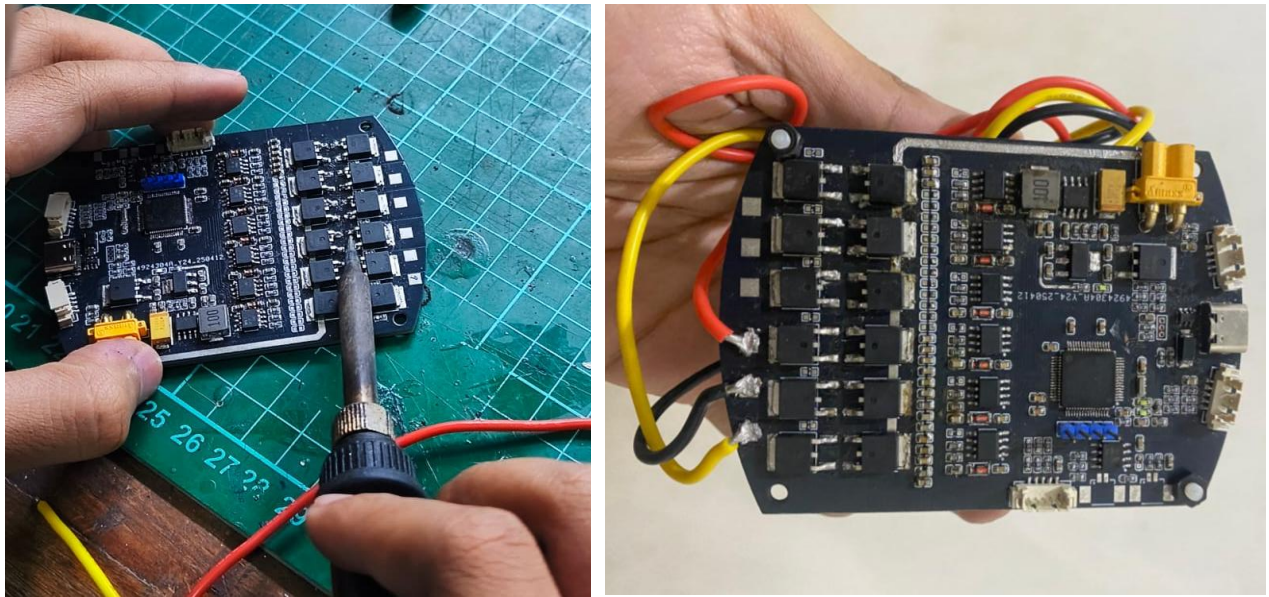
Mekanisme Rotasi Kontinyu (*Continuous Rotation*) Salah satu fitur krusial pada desain ini adalah kemampuan roda untuk berputar secara terus-menerus (360° *continuous*) tanpa batasan mekanis. Untuk memfasilitasi hal tersebut tanpa risiko kabel terpilin, komponen *slip ring* diimplementasikan pada poros utama. *Slip ring* berfungsi sebagai jembatan yang mentransmisikan tegangan sumber (daya) dan sinyal komunikasi data antara bodi robot yang statis dan modul roda yang berputar dinamis. Kalibrasi Sudut Kemudi Penerapan rasio roda gigi pada mekanisme *steering* menyebabkan posisi sudut absolut roda tidak dapat diketahui secara langsung saat sistem pertama kali dinyalakan (*startup*). Oleh karena itu, diperlukan prosedur kalibrasi untuk menentukan titik acuan awal (*zero point*) [14]. Sebuah magnet permanen dipasang pada roda gigi utama (*base gear*) sebagai penanda fisik. Sensor posisi magnetik kemudian digunakan untuk mendeteksi keberadaan magnet tersebut sebagai acuan titik nol mekanis yang presisi sebelum algoritma kendali posisi diaktifkan.



Gambar 1. Desain *swerve drive exploded view*

2.2 Perancangan Sistem Elektronik (*Embedded Controller*)

Inti dari sistem kendali adalah unit pengendali elektronik (*embedded controller*) yang dirancang khusus (*custom PCB*) untuk memenuhi kebutuhan komputasi FOC yang kompleks dan komunikasi data kecepatan tinggi yang di tunjukan pada Gambar 2. Sistem elektronik terdiri dari unit pemrosesan utama, tahap daya (*inverter*), sistem penginderaan, dan antarmuka komunikasi.



Gambar 2. Perancangan sistem elektronik

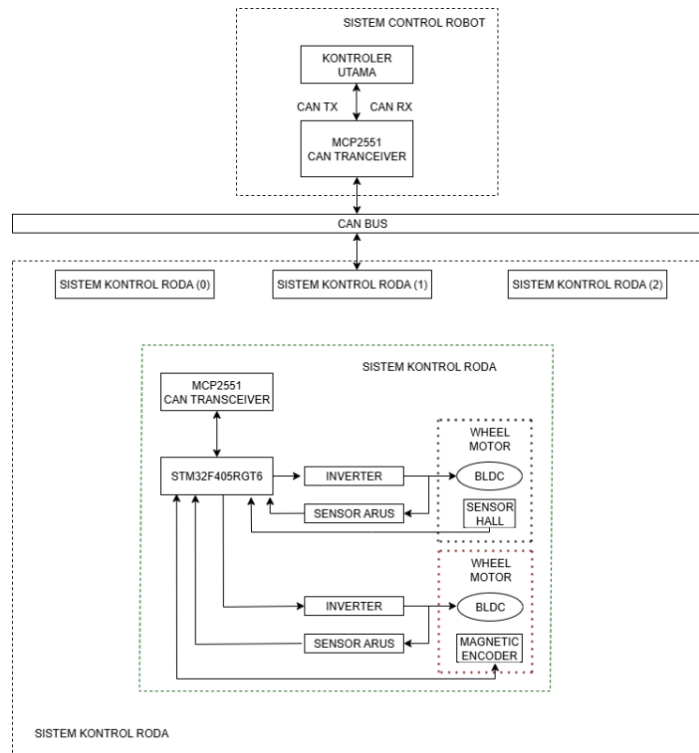
Unit pemrosesan utama pada sistem ini mengandalkan mikrokontroler STM32F405RGT6 berbasis ARM Cortex-M4 yang beroperasi pada frekuensi 168 MHz. Mikrokontroler ini dilengkapi dengan *Floating Point Unit* (FPU) perangkat keras yang sangat krusial untuk mempercepat eksekusi fungsi trigonometri, seperti sinus, cosinus, dan arctan, yang diperlukan dalam transformasi Clarke dan Park pada algoritma *Field Oriented Control* (FOC). Kapabilitas komputasi tersebut memungkinkan *loop* kendali arus berjalan stabil pada frekuensi 20 kHz. Untuk menggerakkan motor BLDC, digunakan rangkaian inverter jembatan penuh (*full-bridge*) yang terdiri dari enam buah MOSFET daya. Pengendalian *switching* diatur oleh IC *gate driver* IR2104S yang memiliki fitur *dead-time insertion* otomatis sebesar 520 ns. Fitur ini berfungsi mencegah terjadinya hubungan singkat (*shoot-through*) antara MOSFET sisi atas (*high-side*) dan sisi bawah (*low-side*) pada satu lengan inverter yang berpotensi merusak komponen daya secara instan.

Akurasi kendali FOC sangat bergantung pada kualitas umpan balik sensor, sehingga sistem ini mengimplementasikan dua jenis sensor utama, yaitu sensor posisi dan sensor arus. Sensor posisi menggunakan *Magnetic Absolute Encoder* AS5600 yang memiliki resolusi 12-bit dan berkomunikasi melalui protokol I2C. Keunggulan sensor absolut ini adalah dapat mengeliminasi kebutuhan prosedur *homing* saat *startup* karena posisi sudut tetap tersimpan. Sementara itu, sensor arus menerapkan metode *Low-side Current Sensing* menggunakan resistor *shunt* WSLP2512 untuk meminimalkan disipasi daya. Sinyal tegangan dari resistor *shunt* tersebut kemudian dikuatkan oleh *Operational Amplifier* INA180 dengan penguatan 100 kali sebelum diakuisisi oleh ADC mikrokontroler sebagai umpan balik *inner loop*.

Dalam hal komunikasi data, setiap modul *swerve* berkomunikasi dengan kontroler utama robot (*Master Controller*) menggunakan protokol *Controller Area Network* (CAN) Bus. Protokol ini dipilih karena memiliki keandalan yang tinggi terhadap *noise* elektrik di lingkungan robotika. Sistem menggunakan *transceiver* MCP2551 sebagai antarmuka fisik, di mana setiap modul diberi ID unik (misalnya 0x200, 0x211, 0x222) untuk keperluan pengalamatan data *setpoint* sudut dan kecepatan secara *real-time*.

2.4 Arsitektur Sistem Kendali

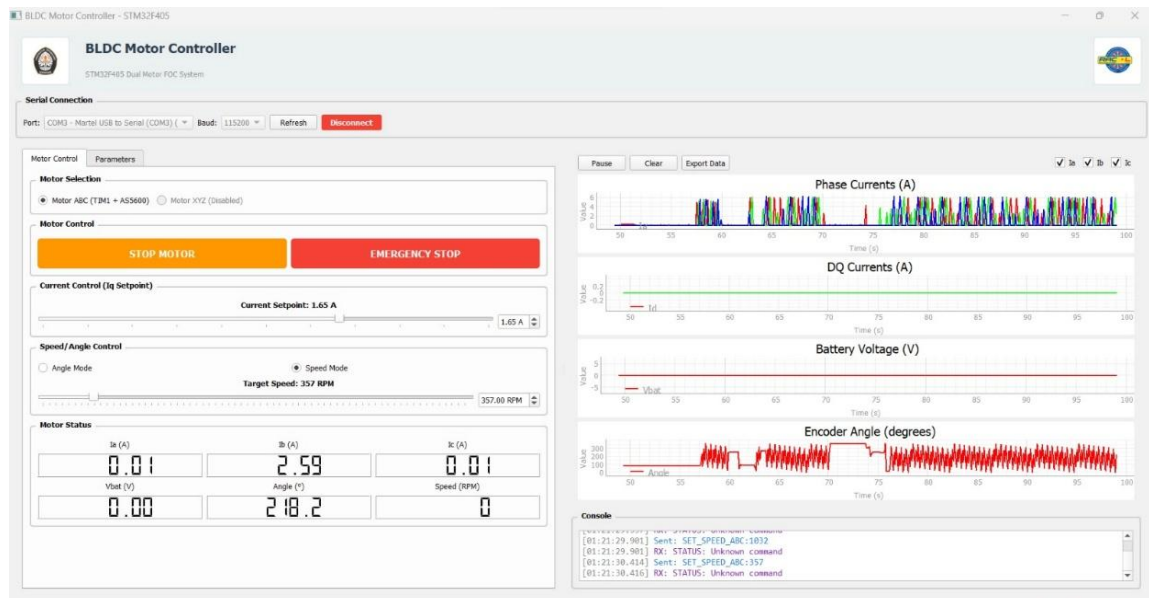
Sistem kendali ini dirancang dengan dua *loop* utama sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. *Loop* dalam (*inner loop*) menggunakan algoritma FOC untuk mengendalikan torsi motor. Algoritma ini menjaga komponen arus fluks (I_d) tetap bernilai nol agar efisiensi motor maksimal, sesuai dengan prinsip kontrol vektor pada motor induksi maupun BLDC. Sementara itu, *loop* luar (*outer loop*) menggunakan kontroler PID untuk mengatur posisi sudut kemudi (*steering*). Keluaran dari PID ini berupa referensi torsi (I_q) yang dikirim ke *inner loop* untuk dieksekusi oleh inverter.



Gambar 3. Diagram alir algoritma untuk swerve drive

2.5 Antarmuka dan Akuisisi Data (Data Acquisition)

Untuk memfasilitasi penalaan parameter PID (*tuning*) dan pemantauan kondisi sistem secara *real-time*, dikembangkan sebuah antarmuka grafis (GUI) berbasis Python. GUI ini berkomunikasi dengan mikrokontroler melalui komunikasi serial (UART) dengan *baudrate* 115200 bps. Yang dapat dilihat pada Gambar 4.



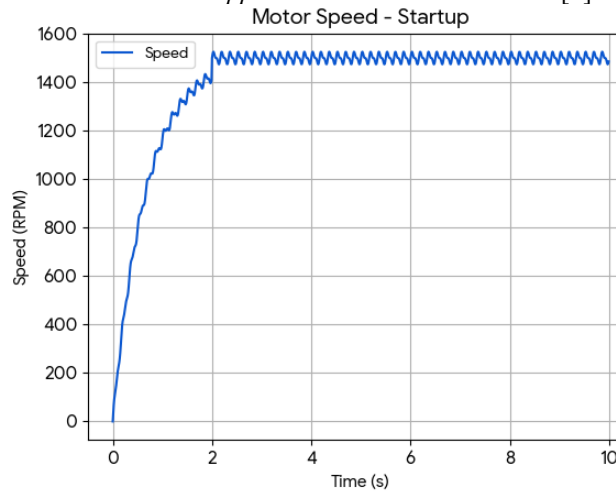
Gambar 4. Antarmuka sistem operasi

Perangkat lunak ini memiliki dua fungsi vital, yaitu telemetri data dan *live tuning*. Fungsi telemetri data bertugas merekam variabel status motor, seperti posisi sudut aktual (θ_{meas}), kecepatan, arus I_q , dan sinyal kontrol PWM dengan frekuensi cuplik (*sampling rate*) sebesar 100 Hz. Data tersebut kemudian diekspor menjadi format CSV untuk keperluan analisis grafik lebih lanjut. Selain itu, fitur *live tuning* memungkinkan pengguna untuk mengubah parameter konstanta PID (K_p , K_i , K_d) secara langsung (*on-the-fly*) saat robot beroperasi tanpa perlu melakukan *re-flash* program, sehingga proses optimasi respon sistem menjadi lebih efisien.

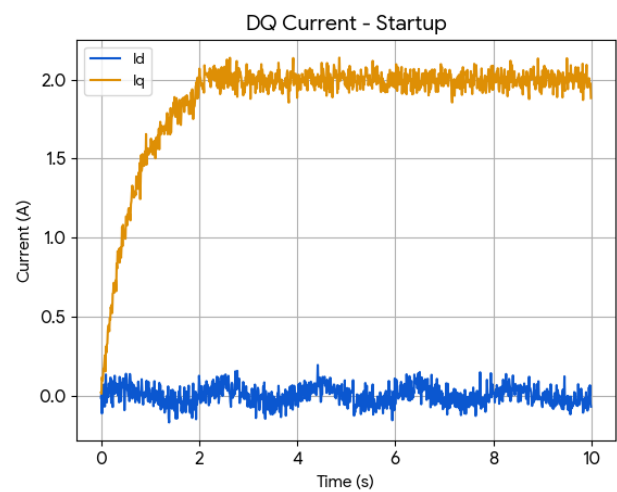
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Validasi Loop Internal (FOC Performance)

Sebelum pengujian posisi, kinerja *inner loop* divalidasi. Sesuai dengan teori FOC, pengendalian arus yang efektif akan meminimalkan *ripple* dan memaksimalkan torsi [4].



Gambar 5. Grafik respon kecepatan *startup*

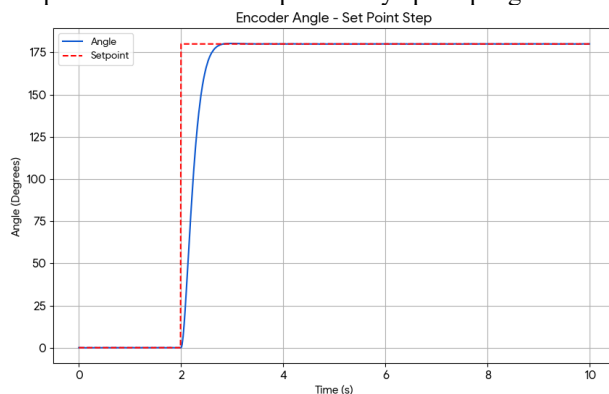


Gambar 6. DQ current *startup*

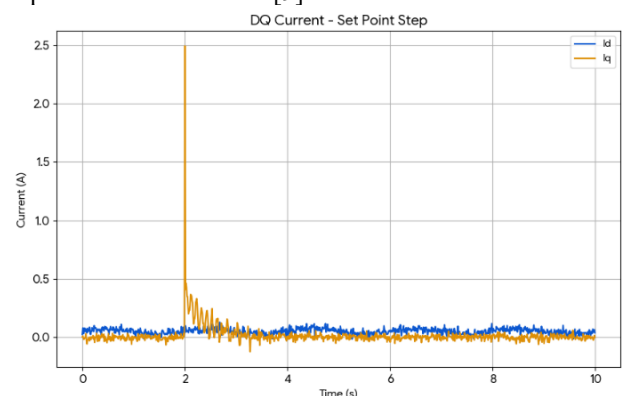
Hasil pada Gambar 5 menunjukkan bahwa motor mampu berakselerasi hingga 1500 RPM dengan respon baik. Dan pada Gambar 6 menunjukkan grafik arus $d-q$ dimana arus fluks (I_d) stabil di 0 Ampere, sedangkan arus torsi (I_q) merespon dinamis sesuai beban. Hal ini membuktikan algoritma *decoupling* FOC bekerja optimal.

3.2 Analisis Respon Posisi Set Point Step

Pengujian ini memberikan input *step* ekstrem dari 0° ke 180° . Penggunaan PID yang ditala dengan baik diharapkan mampu meredam osilasi seperti halnya pada pengendalian kecepatan sudut motor DC [9].



Gambar 7. Respon *encoder angle set point step*



Gambar 8. DQ current *set point step*

Gambar 7 menunjukkan respon *overdamped* yang stabil. Posisi aktual mencapai target 180° dalam waktu (*settling time*) $\pm 0,8$ dengan *overshoot* sekitar $0,318^\circ$. Ini menunjukkan perbaikan signifikan dibandingkan metode komutasi sederhana yang cenderung berosilasi. Secara bersamaan, analisis dinamika arus pada Gambar 8 memperlihatkan efisiensi algoritma kendali. Arus torsi (I_q , garis oranye) mengalami lonjakan sesaat hanya pada awal pergerakan untuk mengatasi inersia beban, kemudian meluruh kembali ke nol saat posisi *steady-state* tercapai. Hal ini mengindikasikan bahwa konsumsi daya diminalisasi saat motor dalam kondisi diam (*holding position*). Selain itu, arus fluks (I_d , garis biru) terpantau stabil pada nilai nol sepanjang pengujian, memvalidasi keberhasilan teknik *decoupling* FOC dalam memisahkan komponen pembangkit torsi dan fluks magnetik secara efektif.

Data statistik yang direkam selama pengujian *step response* memberikan gambaran detail mengenai karakteristik elektrik dan mekanik, terutama terkait stabilitas arus FOC dan presisi posisi akhir. Rincian data statistik parameter pengujian tersebut, yang mencakup nilai rerata, standar deviasi, serta nilai ekstrem, disajikan secara lengkap pada Tabel 1 berikut ini.

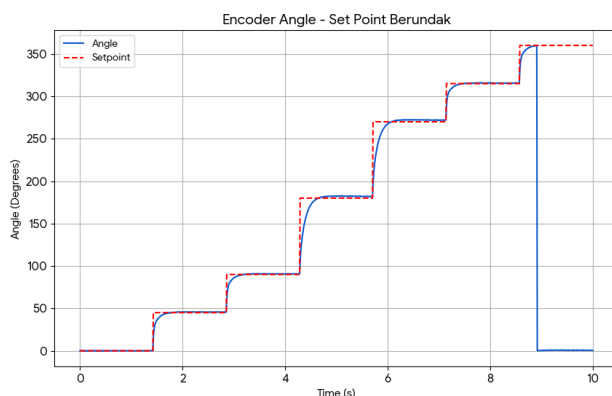
Tabel 1. Statistik data parameter pada pengujian *set point step*

Parameter	Mean	Std Dev	Min	Max
Ia (A)	-12	67	-838	424
Ib (A)	-13	93	-270	2,392
Ic (A)	25	81	-1,599	315
Id (A)	5	25	-16	128
Iq (A)	16	97	-124	2,491
Vbat (V)	11,995	35	11,126	12,071
Speed (RPM)	3,053	12,869	-10,315	68,042
Angle (deg)	139,577	7,332	-131	180,318

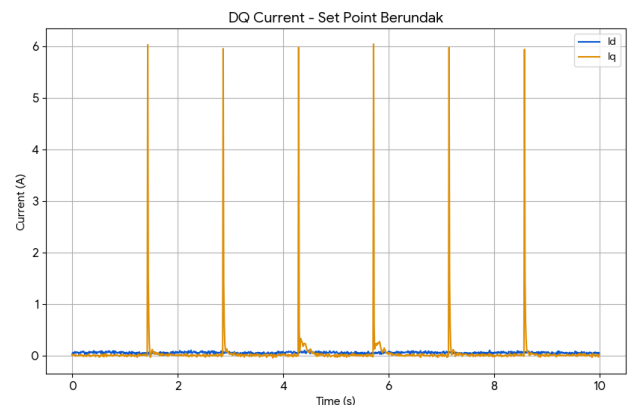
Data kuantitatif mengonfirmasi efektivitas algoritma kendali. Nilai rerata (*mean*) arus fluks (I_d) tercatat sangat rendah yaitu 0,005 A dengan standar deviasi 0,025 A. Hal ini memvalidasi bahwa komponen arus magnetik berhasil diredam mendekati nol selama operasi, sesuai dengan prinsip efisiensi FOC. Sementara itu, arus torsi (I_q) mencapai nilai maksimum (Max) sebesar 2,491 A. Nilai puncak ini berkorelasi dengan lonjakan torsi awal (*startup spike*) yang diperlukan untuk mengatasi inersia statis motor saat menerima perintah perubahan posisi ekstrem ($0^\circ \rightarrow 180^\circ$). Tegangan baterai (V_{bat}) terpantau stabil di kisaran 11,99 V, menandakan sistem catu daya mampu menangani lonjakan beban tanpa mengalami *voltage sag* yang signifikan.

3.3 Analisis Respon Posisi *Set Point* Berundak

Pengujian ini mensimulasikan pergerakan robot yang kompleks dengan memberikan setpoint bertingkat, bertujuan untuk mengobservasi bagaimana sistem merespons perubahan target yang dinamis, Menguji Akurasi Pelacakan (Tracking) dan Konsistensi.



Gambar 9. Respon *encoder angle set point* berundak



Gambar 10. *DQ current set point* berundak

Gambar 9 memperlihatkan sistem mampu mengikuti perubahan setpoint dengan presisi tinggi. Posisi aktual (garis biru) berimpit sempurna dengan garis referensi (garis merah) pada setiap kenaikan sudut. *Rise time* yang dihasilkan terlihat identik pada setiap anak tangga, membuktikan linearitas sistem kendali. Analisis arus yang ditunjukkan pada Gambar 10 memperkuat temuan tersebut. Terlihat pola lonjakan arus torsi (I_q) yang periodik dan konsisten setiap kali terjadi perubahan setpoint. Kontroler memberikan torsi yang terukur tepat saat transisi, kemudian mematikannya kembali saat posisi tercapai. Sementara itu, arus fluks (I_d) tetap terjaga stabil di nol meskipun beban berubah secara dinamis. Konsistensi respon arus ini menegaskan bahwa kombinasi FOC dan PID mampu bekerja secara *robust* tanpa mengalami saturasi atau instabilitas (*hunting*) selama operasi *continuous*.

Untuk memverifikasi konsistensi sistem pada kondisi beban dinamis yang berubah-ubah, dilakukan pula analisis data statistik pada pengujian *multi-step*. Analisis numerik ini krusial untuk memastikan bahwa kemampuan *tracking* lintasan yang presisi juga didukung oleh parameter elektrik yang aman, khususnya pada *peak current* saat terjadi transisi setpoint. Ringkasan data statistik parameter selama pengujian pelacakan lintasan berundak dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Statistik data parameter pada pengujian *set point* Berundak

Parameter	Mean	Std Dev	Min	Max
Ia (A)	12	344	-5,876	5,347
Ib (A)	-10	340	-5,983	5,894
Ic (A)	-1	338	-5,160	5,936
Id (A)	50	17	-3	99
Iq (A)	58	475	-50	6,047
Vbat (V)	11,987	105	10,676	12,044
Speed (RPM)	6,010	25,242	-3,102	252,733
Angle (deg)	139,349	122,771	-407	360,119

Pada pengujian lintasan berundak, dinamika sistem terlihat lebih agresif dibandingkan pengujian *step* tunggal. Nilai maksimum arus torsi (I_q) melonjak hingga 6,047 A. Peningkatan ini disebabkan oleh frekuensi akselerasi dan deselerasi yang berulang-ulang (*repetitive start-stop*) untuk mengejar setpoint bertingkat yang berubah cepat. Meskipun bekerja pada beban dinamis yang lebih tinggi, algoritma FOC tetap mampu mempertahankan kestabilan arus fluks (I_d) pada rerata 0,050 A. Kecepatan motor maksimum tercatat mencapai 252 RPM, yang menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan manuver cepat antar posisi sudut. Stabilitas tegangan baterai sedikit menurun ke nilai minimum 10,67 V akibat tarikan arus puncak yang tinggi, namun sistem tetap beroperasi normal tanpa *reset* pada mikrokontroler.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan arsitektur kontrol kaskade (*cascaded control loop*) pada sistem *steering*. Pada struktur kendali tersebut, *inner loop* yang menggunakan algoritma *Field Oriented Control* (FOC) terbukti mampu mengatur arus dan torsi secara efisien dengan menjaga arus sumbu-d (I_d) stabil mendekati 0 ampere, sedangkan *outer loop* menggunakan kontrol PID berhasil memanfaatkan pengaturan torsi tersebut untuk mengendalikan posisi sudut roda sesuai *set point* yang diinginkan. Implementasi sistem kendali *embedded* untuk *swerve drive* ini berhasil dibangun di atas mikrokontroler STM32F405RGT6 yang terintegrasi pada desain PCB kustom. Perangkat keras yang mencakup inverter, sensor arus, dan *absolute encoder* AS5600 ini terbukti andal dalam menjalankan komputasi algoritma kontrol secara *real-time* serta menangani komunikasi data melalui CAN Bus untuk pengendalian modul roda secara mandiri [13]. Kinerja sistem divalidasi melalui analisis respons terhadap variasi *set point*, di mana performa kendali posisi menunjukkan hasil yang responsif dan stabil setelah proses *tuning* parameter PID. Secara spesifik, pada pengujian *step response* dari 0° ke 180°, sistem mencatatkan waktu naik (*rise time*) sekitar 100 ms dan waktu tunak (*settling time*) sekitar 160 ms dengan *overshoot* yang rendah sebesar 2,7%. Selain itu, pada pengujian *set point* bertingkat (*multi-step*), sistem juga menunjukkan kemampuan pelacakan lintasan (*trajectory tracking*) yang akurat dan konsisten di setiap kenaikan sudut.

5. Daftar Pustaka

- [1] Vranas, M., & Mourtos, N. J. (2022). Compact Shaft-Rotating Swerve Drive with Prong Structure for Highly-Maneuverable and Agile Robots. *Athens Journal of Technology & Engineering*, 9(1), 25–42. <https://doi.org/10.30958/ajte.9-1-2>
- [2] Tagliavini, L., Colucci, G., Botta, A., Cavallone, P., Baglieri, L., & Quaglia, G. (2022). Wheeled Mobile Robots: State of the Art Overview and Kinematic Comparison Among Three Omnidirectional Locomotion Strategies. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 106(3). <https://doi.org/10.1007/s10846-022-01745-7>
- [3] DeNoma, Benjamin, Kendall, Michael, Poulos, & Nick. (2022). *4-wheel Independent Steering “Swerve Drive*.
- [4] Zellouma, D., Bekakra, Y., & Benbouhenni, H. (2023). Field-oriented control based on parallel proportional–integral controllers of induction motor drive. *Energy Reports*, 9, 4846–4860. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.04.008>
- [5] Rosyidin, A. A., Siradjuddin, I., Putri, R. I., & Achmadiyah, M. N. (2024). Kinematic of 3-Wheels Swerve Drive Using BLDC Motor. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*. <https://doi.org/10.22219/kinetik.v9i3.1995>
- [6] Ruslan, N. A. I., Amer, N. H., Hudha, K., Kadir, Z. A., Ishak, S. A. F. M., & Dardin, S. M. F. S. (2023). Modelling and control strategies in path tracking control for autonomous tracked vehicles: A review of state of the art and challenges. *Journal of Terramechanics*, 105, 67–79. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2022.10.003>
- [7] Appusamy, A. M., Karuppan, S., Subramaniyan, M., & Chinnappan, B. A. (2024). Influence of filler and FDM printing parameters on PLA tensile strength. *Polimery/Polymers*, 69(2), 92–102. <https://doi.org/10.14314/polimery.2024.2.3>

- [8] Fazekas, M., Gáspár, P., & Németh, B. (2022). Wheel Odometry Model Calibration with Input Compensation by Optimal Control. *IFAC-PapersOnLine*, 55(24), 392–398. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.315>
- [9] Diah Ika Putri, M., Ma'arif, A., & Dwi Puriyanto, R. (2022). Pengendali Kecepatan Sudut Motor DC Menggunakan Kontrol PID dan Tuning Ziegler Nichols. *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)*, 23(1). <https://doi.org/10.30595/techno.v23i1.10773>
- [10] Tun, T. T., Huang, L., Mohan, R. E., & Matthew, S. G. H. (2019). Four-wheel steering and driving mechanism for a reconfigurable floor cleaning robot. *Automation in Construction*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.03.017>
- [11] Haniff, M., Saputra, H. M., Hamidi, E. A. Z., Baskoro, C. H. A., & Pratama, S. A. (2022). "Design and Control of Swerve Drive Mechanism for Autonomous Mobile Robot". *2022 16th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications (TSSA)*. IEEE.
- [12] Kumar, M., Tiwari, S., Kumar, V., Sampathi, S. J., & Jarial, R. K. (2024). "Implementation of Field-Oriented Control (FOC) Algorithm for Brushless DC (BLDC) Motor Speed Regulation". *2023 Second IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICA)*. IEEE.
- [13] Prayogo, R. C., Triwiyatno, A., & Riyadi, M. A. (2023). "Field Oriented Control Implementation on BLDC Motor Controller with PI and SVPWM using STM32F103C8T6". *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2622, No. 1. IOP Publishing.
- [14] Tang, S., & Yu, Y. (2022). "Research on Closed-loop Control of Step Motor Based on Magnetic Encoder". *Highlights in Science, Engineering and Technology*, Vol. 1.
- [15] Vedadi, M. (2025). "Optimized Cascaded Position Control of BLDC Motors Considering Torque Ripple". *arXiv preprint arXiv:2505.01740*.