

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Verifikasi Dasar Sistem

Verifikasi dasar dilakukan sebelum penalaan agar respons kendali tidak dipengaruhi oleh kesalahan catu daya, pembacaan *encoder*, titik tengah, batas sudut, atau *alignment* motor. Tahap ini diperlakukan sebagai pemeriksaan kesiapan sistem, bukan sebagai pengujian utama kinerja kendali posisi.

4.1.1 Verifikasi Tegangan DC Bus dan Sensor Arus

Pengujian tegangan DC bus dan sensor arus dilakukan untuk memverifikasi kondisi sumber tegangan serta pembacaan sensor arus sebelum dilakukan proses tuning pengendali. Pengujian dilakukan pada kondisi motor *steering idle* atau tidak menerima perintah gerak. Pada kondisi tersebut, nilai *Motor Current*, *Input Current*, arus sumbu *direct* Id, dan arus sumbu *quadrature* Iq diharapkan berada mendekati 0A, sedangkan tegangan DC bus Vbus diharapkan memiliki nilai yang stabil.

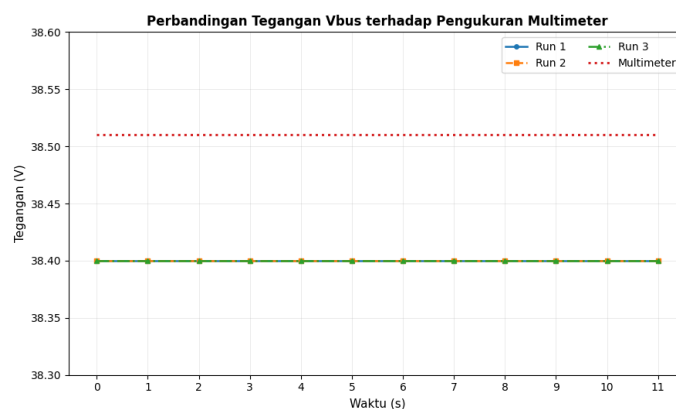
Pengambilan data dilakukan sebanyak tiga kali pengujian, yaitu Run 1, Run 2, dan Run 3 dengan kondisi yang sama. Selain pembacaan melalui sistem, tegangan sumber juga diukur menggunakan multimeter sebagai nilai referensi. Hasil pengukuran multimeter menunjukkan tegangan sebesar 38,51V, sedangkan pembacaan Vbus pada ketiga run sebesar 38,40 V.

Tabel 4. 1 Hasil Pengujian Tegangan DC Bus dan Sensor Arus

Parameter	Run 1	Run 2	Run 3	Referensi
Vbus (V)	38.4	38.4	38.4	38.51
Motor Current (A)	0	0	0	38.4
Input Current (A)	0	0	0	0
Id (A)	0	0	0	0
Iq (A)	0	0	0	0
Fault	0	0	0	0

Pada kondisi *idle*, nilai referensi arus adalah 0A. karena pembacaan motor *Current*, input *current*, Id, dan Iq pada ketiga run sebesar 0A, maka *Error* dan RMSE pembacaan arus pada data tersebut juga sebesar 0A.

Berdasarkan tiga kali pengujian, pembacaan tegangan DC bus menunjukkan nilai yang konsisten sebesar 38,40 V pada Run 1, Run 2, dan Run 3. Nilai tersebut menghasilkan rata-rata sebesar 38,40 V dengan standar deviasi antarrun sebesar 0V. Dibandingkan dengan hasil pengukuran multimeter sebesar 38,51V, diperoleh *Error absolut* sebesar 0,11 V dan persentase *Error* sebesar 0,286%. Pada kondisi *idle*, nilai *Motor Current*, *Input Current*, *Id*, dan *Iq* tercatat sebesar 0 A, serta tidak ditemukan *fault* pada ketiga pengujian. Hasil tersebut menunjukkan pembacaan tegangan memiliki hasil yang konsisten pada tiga run, dengan selisih kecil terhadap nilai referensi multimeter, serta pembacaan arus berada pada nilai nol pada kondisi *idle*. Data ini selanjutnya digunakan sebagai verifikasi awal sebelum pengujian *inner current-loop* FOC.



Gambar 4. 1 Perbandingan Tegangan Vbus terhadap Pengukuran Multimeter

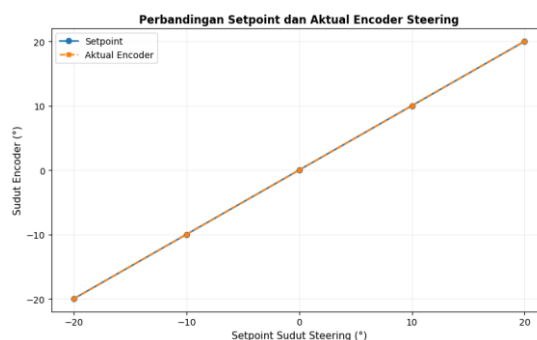
4.1.2 *Linearitas Encoder Steering*

Pengujian *linearitas encoder steering* dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara sudut referensi dengan sudut aktual yang diperoleh dari pembacaan *encoder*. Pengujian dilakukan pada lima titik sudut, yaitu -20° , -10° , 0° , $+10^\circ$, dan $+20^\circ$. Pada setiap titik pengujian, nilai setpoint dibandingkan dengan nilai LEFT Position sebagai sudut aktual *encoder*. Selain itu, nilai *Raw TIM*, *Raw Center*, dan status sinkronisasi *encoder* dicatat untuk mengetahui perubahan nilai pencacahan *encoder* terhadap perubahan sudut steering.

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian Linearitas *Encoder Steering*

Setpoint (°)	Aktual <i>Encoder</i> (°)	Error (°)	Raw TIM	Raw Center	<i>Encoder</i> Synced
-20°	-20	0	-1182	2101	YES
-10°	-10	0	-591	2101	YES
0°	0	0	25	2101	YES
+10°	10	0	591	2101	YES
+20°	20	0	1182	2101	YES

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.2, pembacaan sudut aktual *encoder* pada setpoint -20°, -10°, 0°, +10°, dan +20° masing-masing sebesar -20°, -10°, 0°, +10°, dan +20°. Dengan demikian, pada resolusi data sudut yang tersimpan, seluruh titik pengujian menghasilkan *Error* sebesar 0°, dengan nilai RMSE sebesar 0° dan MAE sebesar 0°. Nilai RAW TIM juga berubah mengikuti perubahan arah dan sudut steering, yaitu -1182 pada 20°, -591 pada -10°, 591 pada +10°, dan 1182 pada +20°. Sementara itu, nilai Raw Center tetap sebesar 2101 dan status *Encoder* synced menunjukkan YES pada seluruh titik pengujian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada titik-titik yang di uji, pembacaan sudut *encoder* sesuai dengan nilai referensi yang diberikan.

**Gambar 4. 2** Perbandingan Setpoint dan Aktual *Encoder Steering*

4.1.3 Verifikasi Titik Tengah

Pengujian center steering dilakukan untuk memverifikasi kesesuaian antara titik tengah mekanis steering dengan titik tengah yang terbaca oleh *encoder*. Posisi tengah steering ditetapkan pada sudut referensi 0°. Pada kondisi tersebut, nilai posisi tengah steering diamati melalui parameter Left Position, sedangkan physical center digunakan sebagai referensi posisi tengah mekanis. Selain itu, nilai Raw

center dan status *Encoder Synced* diamati untuk memastikan *encoder* telah tersinkronisasi terhadap posisi tengah.

Tabel 4. 3 Hasil Verifikasi Titik Tengah

Run	Setpoint Center (°)	Posisi Aktual (°)	Error Center (°)	Raw TIM	Raw Center	Encoder Synced
1	0	0	0	33	2101	YES
2	0	0	0	33	2101	YES
3	0	0	0	33	2101	YES
Rata- Rata	0	0	0	33	2101	YES

Berdasarkan hasil pengujian verifikasi titik tengah, ketiga pengulangan pada setpoint 0° menghasilkan posisi aktual *encoder* sebesar 0° . Nilai Raw TIM sebesar 33 dan Raw Center sebesar 2101 juga konsisten pada ketiga pengujian, dengan status *Encoder Synced* menunjukkan YES. Berdasarkan selisih antara setpoint dan posisi aktual diperoleh *Error* center sebesar 0° dengan RMSE dan MAE sebesar 0° pada resolusi data yang direkam. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pembacaan *encoder* pada posisi tengah steering memiliki keterulangan yang konsisten.

4.1.4 Verifikasi Batas Sudut dan Simetri Awal

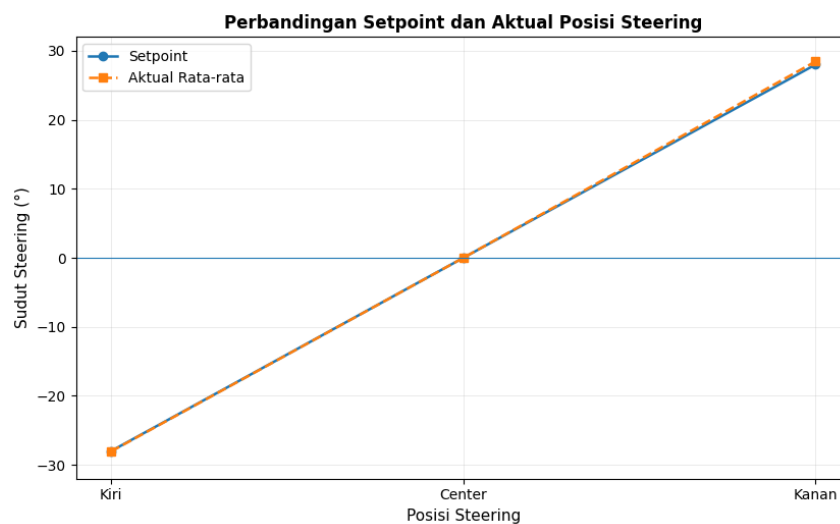
Pengujian batas sudut simetri steering dialkene untuk mengetahui kemampuan mekanisme steering mencapai batas operasional pada arah kiri dan kanan serta mengevaluasi kesimterian pembacaan posisi terhadap titik Tengah. Pengujian dialkene pada setpoint -28° , 0° , dan $+28^\circ$. Nilai posisi aktual diperoleh dari pembacaan steering, kemudian dibandingkan dengan setpoint untuk memperoleh *Error* posisi.

Tabel 4. 4 Hasil pengujian Batas Sudut

Posisi	Setpoint (°)	Aktual Rata-rata (°)	Error (°)	Error Absolut (°)	Status
Kiri	-28	-28,054	+0,054	0,054	Tercapai

Center	0	0,000	0,000	0,000	Tercapai
Kanan	+28	+28,458	-0,458	0,458	Tercapai

Berdasarkan hasil pengujian, pada setpoint -28° , diperoleh posisi aktual rata-rata sebesar $-28,054^\circ$ dengan *Error* absolut $0,054^\circ$. Pada posisi center 0° , pembacaan aktual sebesar 0° , sedangkan pada setpoint $+28^\circ$ diperoleh posisi aktual rata-rata sebesar $+28,458^\circ$ dengan *Error* absolut $0,458^\circ$. Perbedaan magnitude posisi kiri dan kanan sebesar $0,404^\circ$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa steering dapat mencapai kedua batas sudut yang diuji, meskipun masih terdapat perbedaan kecil antara sisi kiri dan kanan.



Gambar 4. 3 Perbandingan Setpoint dan Aktual Posisi Steering

4.1.5 Verifikasi Aligment Steering

Pengujian verifikasi dilakukan untuk mengevaluasi kondisi penyelarasan elektrik motor BLDC terhadap referensi posisi rotor sebelum sistem kendali posisi digunakan. Pengujian menggunakan arus alignment sebesar 0,5 A. Parameter yang diamati meliputi posisi steering setelah alignment, Raw TIM4, status sinkronisasi *encoder*, *theta offset*, dan konfigurasi sektor.

Tabel 4. 5 Hasil Pengujian Verifikasi Aligment Steering

Run	Aligment	Posisi	Raw	Pole	Theta	Sector	Encoder
	Iq	Aligment	TIM4	Pairs	Offset	Count	Synced
R1	0,5A	27,7327°	1639	4	0	6	YES
R2	0,5A	27,7327°	1639	4	0	6	YES
R3	0,5A	27,7327°	1639	4	0	6	YES
Mean	0,5A	27,7327°	1639	4	0	6	YES

Pengujian *electrical alignment* dilakukan sebanyak tiga kali menggunakan arus alignment sebesar 0,5 A. Parameter yang diamati meliputi posisi *steering* hasil alignment, nilai Raw TIM4, status sinkronisasi *encoder*, jumlah *pole pairs*, *theta offset*, dan jumlah sektor. Ketiga pengujian menghasilkan posisi alignment yang sama, yaitu 27,7327°, dengan Raw TIM4 sebesar 1639. Nilai rata-rata posisi alignment sebesar 27,7327°, standar deviasi 0°, dan range 0° pada resolusi data yang direkam. Status *Encoder Synced* juga menunjukkan YES. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses alignment menghasilkan posisi referensi yang konsisten pada tiga kali pengulangan.

4.2 Validasi Inner Current-Loop FOC

Pengujian inner current loop dialkene untuk mengetahui kemampuan sistem FOC dalam mengendalikan komponen arus sumbu d dan sumbu q sebelum dialkene pengujian pengendali posisi steering. Pada sistem FOC yang digunakan, arus Iq berperan sebagai komponen arus penghasil torsi, sedangkan Id dikendalikan agar tetap mendekati 0A. oleh karena itu, kemampuan Iq aktual dalam mengikuti nilai referensi I*q serta kestabilan Id menjadi parameter utama dalam pengujian ini.

Validasi dilakukan melalui tiga tahap, yaitu pengujian variasi gain proporsional Kp, Ki, dan referensi Iq. Pada setiap pengujian diamati nilai Iq, Id, *Error* terhadap referensi arus, serta kondisi sistem selama pengujian. Pengujian variasi Kp dan Ki digunakan untuk mengevaluasi respons *current-loop*, sedangkan variasi referensi Iq digunakan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengikuti tingkat kebutuhan arus yang berbeda. Hasil pengujian *inner current-loop* digunakan untuk memastikan bahwa pengendalian arus FOC bekerja dengan baik

sebelum dilakukan tuning pengendali posisi steering. Sebagai respons *outer position-loop* dengan *inner current-loop* yang telah terlebih dahulu divalidasi.

4.2.1 Pengujian Variasi Kp-Loop Arus

Pengujian variasi gain proporsional Kp dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan nilai Kp terhadap kemampuan Inner current loop foc dalam mengikuti referensi arus Iq. Pada pengujian ini, parameter Kp dibuat tetap sehingga perubahan respons yang terjadi dapat diamati sebagai pengaruh dari variasi gain proporsional. Nilai Iq digunakan sebagai komponen arus penghasil torsi, sedangkan Id diamati untuk memastikan nilainya tetap mendekati 0A selama proses pengendalian. Setiap variasi Kp diberikan referensi arus I*q yang sama. Data yang diamati meliputi Iq aktual, Id, Error tracking arus, RMSE, serta kondisi tegangan DC bus dan fault. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengevaluasi kemampuan masing-masing nilai Kp dalam menghasilkan respons arus yang mengikuti referensi tanpa menyebabkan respons yang tidak stabil.

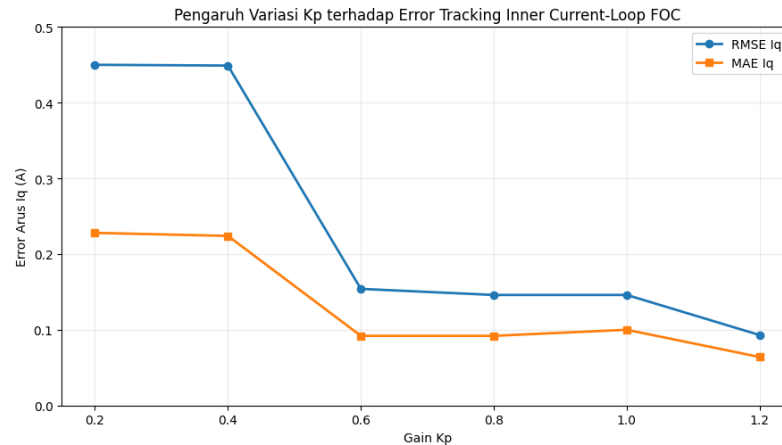
Tabel 4. 6 Hasil Pengujian Variasi Kp

Kp	I*q (A)	Mean Iq (A)	Mean Id (A)	RMSE Iq (A)	MAE (A)	Iq maks (A)	Vbus (V)
0,2	1,0	0,772	0,000	0,450	0,228	0,99	38,3
0,4	1,0	0,776	0,000	0,449	0,224	0,99	38,3
0,6	1,0	0,908	-0,002	0,154	0,092	0,99	38,3
0,8	1,0	0,908	-0,002	0,146	0,092	0,99	38,3
1,0	1,0	0,900	0,000	0,146	0,100	0,99	38,3
1,2	1,0	0,936	0,000	0,093	0,064	0,99	38,3

Berdasarkan **tabel 4.6** peningkatan nilai Kp memberikan pengaruh terhadap kemampuan *inner current-loop* dalam mengikuti referensi arus I*q A. Pada Kp = 0,2 diperoleh nilai rata-rata Iq sebesar 0,772 A dengan RMSE 0,450 A dan MAE 0,228 A. Peningkatan Kp hingga 1,2 menghasilkan nilai rata-rata Iq sebesar 0,936 A dengan RMSE 0,093 A dan MAE 0,064 A. Nilai tersebut merupakan RMSE dan MAE terkecil pada rentang Kp yang diuji.

Sementara itu, nilai rata-rata Id berada pada rentang -0,002 hingga 0 A, sehingga komponen arus sumbu-d tetap berada di sekitar nol. Tegangan DC bus

juga relatif tetap sebesar 38,3 V pada seluruh variasi. Dengan demikian, perbedaan respons I_q pada pengujian terutama berkaitan dengan perubahan parameter K_p , sedangkan kondisi tegangan sumber relatif sama.



Gambar 4. 4 Grafik Variasi K_p

4.2.2 Pengujian variasi K_i Current Loop

Pengujian variasi gain integral K_i dialkane untuk mengetahui pengaruh komponen integral terhadap kemampuan inner current loop FOC dalam mengikuti referensi arus I_q , terutama dalam mengurangi *Error* terhadap nilai referensi. Pada pengujian ini, nilai K_p dibuat tetap, sedangkan nilai K_i divariasikan pada beberapa kandidat. Setiap variasi diberikan referensi arus I^*_q yang sama sehingga respons masing-masing parameter dapat dibandingkan pada kondisi pengujian yang setara.

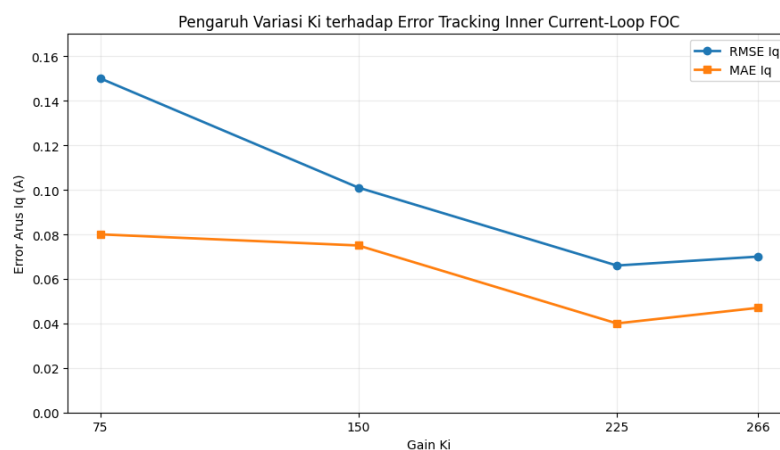
Parameter yang diamati meliputi nilai I_q aktual, I_d , RMSE, MAE, nilai maksimum I_q , serta tegangan DC bus. Nilai I_q digunakan untuk mengevaluasi kemampuan *current-loop* dalam mengikuti referensi arus, sedangkan I_d diamati untuk memastikan komponen arus sumbu-d tetap berada di sekitar 0 A.

Tabel 4. 7 Hasil pengujian Variasi K_i Loop

K_i aktual	I^*_q (A)	Mean I_q (A)	Mean I_d (A)	RMSE I_q (A)	MAE (A)	I_q maks (A)	V_{bus} (V)
75,087	1,0	0,920	0,000	0,150	0,080	1,00	38,3
149,957	1,0	0,925	0,000	0,101	0,075	0,99	38,3
225,043	1,0	0,960	0,000	0,066	0,040	0,99	38,3
266,059	1,0	0,953	0,000	0,070	0,047	0,99	38,3

Berdasarkan **Tabel 4.7**, peningkatan nilai K_i dari 75,087 hingga 225,043 memberikan penurunan *Error tracking* arus. Pada $K_i = 75,087$, diperoleh RMSE sebesar 0,150 A dan MAE sebesar 0,080 A. Nilai *Error* kemudian menurun hingga mencapai RMSE 0,066 A dan MAE 0,040 A pada $K_i=225,043$. Ketika nilai K_i kembali dinaikkan menjadi 266,059, RMSE sedikit meningkat menjadi 0,070 A dan MAE menjadi 0,047 A. Hal tersebut menunjukkan bahwa peningkatan gain integral tidak selalu menghasilkan penurunan *Error* setelah melewati nilai tertentu.

Selama seluruh variasi pengujian, nilai rata-rata I_d tetap berada di sekitar 0 A dan tegangan DC bus relatif tetap sebesar 38,3 V. Berdasarkan parameter RMSE dan MAE, $K_i=225,043$ menghasilkan *Error tracking* terkecil pada rentang parameter yang diuji. Penentuan parameter tetap perlu mempertimbangkan bentuk respons transien untuk memastikan peningkatan gain integral tidak menghasilkan osilasi atau *overshoot* yang berlebihan.



Gambar 4. 5 Grafik Perbandingan Respons Arus I_q pada Variasi K_i

4.2.3 Pengujian Variasi Referensi I_q

Pengujian variasi referensi arus I_q dilakukan untuk mengetahui kemampuan *inner current-loop* FOC dalam menghasilkan arus sumbu-q pada beberapa tingkat referensi. Berbeda dengan pengujian sebelumnya yang memvariasikan parameter pengendali, pada pengujian ini parameter pengendali arus dibuat tetap, sedangkan referensi I^*_q divariasikan sebesar 0,5 A, 1,0 A, dan 1,5 A.

Pengujian dilakukan menggunakan masukan *step* dari 0 A menuju masing-masing nilai referensi. Nilai I_q aktual diamati untuk mengevaluasi kemampuan

tracking arus, sedangkan I_d diamati untuk memastikan komponen arus sumbu-d tetap berada di sekitar 0 A. Selain itu, nilai RMSE, MAE, nilai maksimum I_q dan tegangan DC bus digunakan sebagai parameter evaluasi.

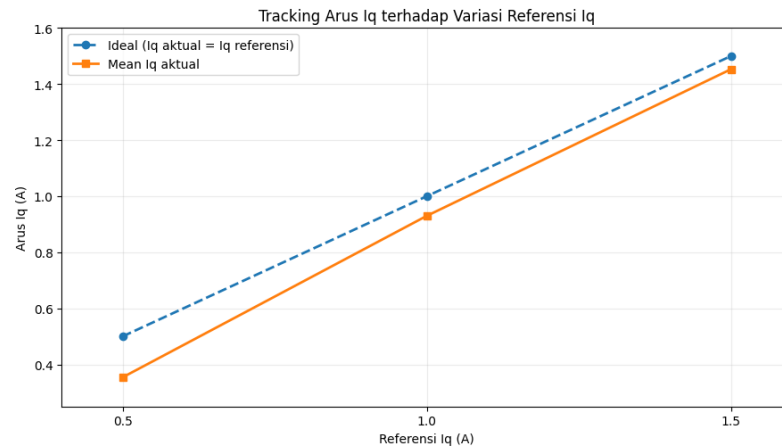
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian Variasi Referensi I_q

I^*q (A)	Mean I_q saat setpoint aktif (A)	Mean I_d (A)	RMSE I_q (A)	MAE (A)	I_q maks (A)	V_{bus} (V)
0,5	0,354	0,000	0,241	0,146	0,49	38,3
1,0	0,930	0,000	0,102	0,070	0,99	38,3
1,5	1,453	0,000	0,070	0,047	1,49	38,3

Berdasarkan Tabel 4.8, *inner current-loop* mampu menghasilkan nilai I_q yang mendekati setiap level referensi yang diberikan. Pada referensi 0,5 A, nilai maksimum I_q mencapai 0,49 A. Pada referensi 1,0 A diperoleh nilai maksimum sebesar 0,99 A, sedangkan pada referensi 1,5 A diperoleh nilai maksimum sebesar 1,49 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa arus sumbu-q dapat mengikuti perubahan tingkat referensi pada rentang pengujian.

Nilai rata-rata I_d selama pengujian tetap berada di sekitar 0 A, yang menunjukkan bahwa pengendalian FOC tetap mempertahankan komponen arus sumbu-d mendekati nol ketika referensi I_q diubah. Tegangan DC bus juga relatif tetap sebesar 38,3 V sehingga perbedaan respons tidak disebabkan oleh perubahan tegangan sumber yang signifikan.

Pada referensi 0,5 A diperoleh RMSE yang lebih besar, yaitu 0,241 A. Data menunjukkan adanya sampel ketika referensi telah berubah tetapi I_q aktual belum mencapai nilai referensi. Kondisi tersebut perlu dibaca bersama dengan resolusi pencatatan data sebesar satu sampel per detik sehingga respons transien yang terjadi di antara dua sampel tidak seluruhnya terekam. Oleh karena itu, evaluasi kemampuan *tracking* tidak hanya didasarkan pada nilai rata-rata, tetapi juga pada nilai maksimum dan bentuk respons terhadap perubahan setpoint.



Gambar 4. 6 Tracking Arus Iq Terhadap Variasi Referensi Iq

4.3 Penentuan dan Tuning Gain Pengendali Posisi

Bagian ini membahas proses penentuan parameter pengendali posisi steering setelah inner *current-loop* FOC divalidasi pada Subbab 4.2. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan gain proporsional K_p , integral K_i , dan derivatif K_d secara bertahap. Setiap variasi parameter dievaluasi berdasarkan kemampuan posisi steering aktual dalam mengikuti setpoint yang diberikan.

Evaluasi respons dilakukan menggunakan parameter *Error* posisi, RMSE, MAE, *overshoot*, dan karakteristik respons transien. Parameter lainnya dipertahankan tetap pada setiap tahap pengujian sehingga pengaruh perubahan masing-masing gain dapat diamati secara terpisah. Hasil pengujian variasi K_p , K_i , dan K_d selanjutnya digunakan untuk menentukan parameter PID akhir yang digunakan pada pengujian kinerja steering.

4.3.1 Pengujian Variasi K_p Pengendali Posisi

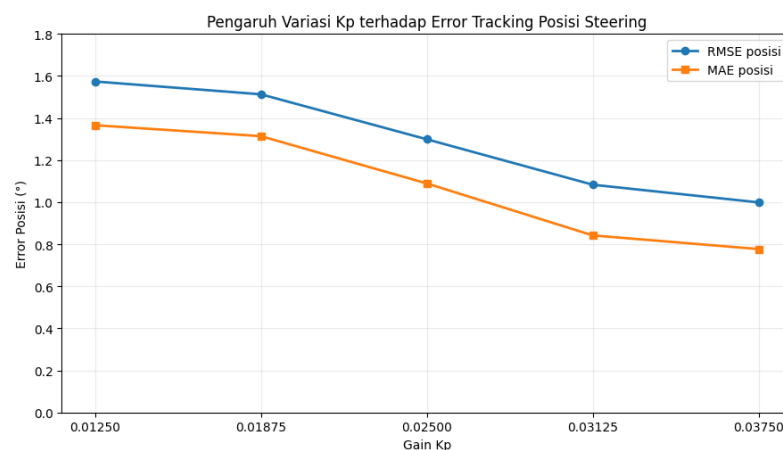
Pengujian variasi gain proporsional K_p dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan aksi proporsional terhadap kemampuan steering dalam mengikuti referensi posisi. Nilai $K_p=0,025$ digunakan sebagai baseline, kemudian diuji pada faktor $0,50\times$ hingga $1,50\times$ sehingga diperoleh kandidat K_p sebesar 0,01250; 0,01875; 0,02500; 0,03125; dan 0,03750. Pada tahap ini, komponen integral dan derivatif dibuat nol sehingga pengaruh perubahan K_p dapat diamati secara terpisah.

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Variasi Kp

Faktor	Kp	RMSE (°)	MAE (°)	Error Maks. (°)
0,50x	0,01250	1,574	1,366	0,488
0,75x	0,01875	1,513	3,516	0,664
1,00x	0,02500	1,299	3,135	0,796
1,25x	0,003125	1,083	2,790	0,796
1,50x	0,03750	0,999	2,520	0,964

Berdasarkan **Tabel 4.9**, peningkatan Kp pada rentang yang diuji menunjukkan kecenderungan penurunan *Error* posisi. RMSE menurun dari 1,574° pada Kp=0,01250 menjadi 0,999° pada Kp=0,03750, sedangkan MAE menurun dari 1,366° menjadi 0,777°. *Error* maksimum juga menurun dari 3,731° menjadi 2,520°.

Peningkatan Kp diikuti oleh peningkatan nilai maksimum absolut Iq dari 0,488 A menjadi 0,964 A. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan aksi proporsional menghasilkan aksi kendali yang lebih besar ketika terdapat *Error* posisi. Berdasarkan indikator *Error* pada rentang pengujian, Kp=0,03750 memberikan *Error* terkecil dan digunakan sebagai kandidat parameter proporsional untuk tahap berikutnya.

**Gambar 4. 7** Pengaruh Variasi Kp Terhadap *Error* Tracking Posisi Steering

4.3.2 Pengujian Variasi Ki Pengendali Posisi

Pengujian variasi gain integral Ki dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh aksi integral terhadap *Error* posisi steering. Berdasarkan data pengujian, Ki

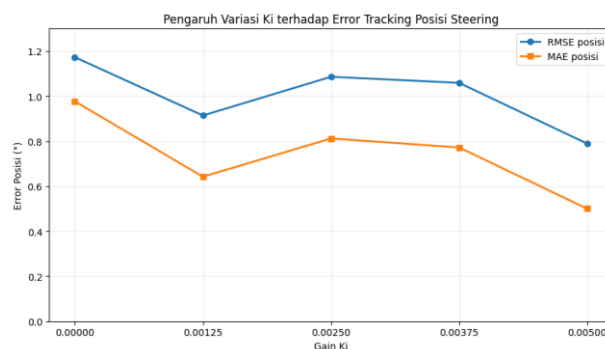
divariasikan sebesar 0; 0,00125; 0,00250; 0,00375; dan 0,00500 menggunakan pola setpoint STEP_PM5DEG. Perbandingan dilakukan menggunakan RMSE, MAE, *Error* maksimum, dan arus *Iq*.

Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Variasi *Ki*

Faktor	<i>Ki</i>	RMSE (°)	MAE (°)	<i>Error</i> Maks. (°)	<i>Iq</i> Maks
0,00x	0,00000	1,173	0,977	2,947	0,962
0,50x	0,00125	0,914	0,642	2,481	1,057
1,00x	0,00250	1,086	0,812	2,741	1,109
1,50x	0,00375	1,059	0,772	2,839	1,169
2,00x	0,00500	0,789	0,500	2,400	1,063

Berdasarkan **Tabel 4.10**, penambahan komponen integral memberikan perubahan terhadap kemampuan pengendali dalam mengikuti referensi posisi. Tanpa aksi integral, yaitu pada $K_i=0$, diperoleh RMSE sebesar $1,173^\circ$ dan MAE sebesar $0,977^\circ$. Nilai error berubah pada setiap peningkatan K_i dan nilai terendah pada data pengujian diperoleh pada $K_i=0,00500$, dengan RMSE sebesar $0,789^\circ$ dan MAE sebesar $0,500^\circ$.

Namun, hubungan antara peningkatan K_i dan penurunan error tidak bersifat monoton. Sebagai contoh, $K_i=0,00125$ menghasilkan RMSE $0,914^\circ$, sedangkan $K_i=0,00250$ menghasilkan RMSE $1,086^\circ$. Oleh karena itu, pemilihan K_i akhir tidak tepat jika hanya didasarkan pada RMSE satu kali pengujian, tetapi juga perlu mempertimbangkan respons transien, osilasi, serta kebutuhan integrasi pada sistem steering.



Gambar 4. 8 Pengaruh Variasi K_i Terhadap *Error* Tracking Posisi Steering

Berdasarkan pengujian variasi K_i , perubahan nilai integral tidak menghasilkan perubahan error yang bersifat monoton. Nilai RMSE mengalami kenaikan dan penurunan pada setiap variasi K_i , sehingga pengaruh komponen integral pada rentang pengujian ini tidak terlihat dominan dibandingkan komponen proporsional.

Hal tersebut terjadi karena komponen integral bekerja berdasarkan akumulasi error terhadap waktu sehingga pengaruhnya lebih terlihat pada error keadaan tunak dibandingkan respons sesaat. Pada sistem steering yang diuji, perubahan referensi terjadi secara dinamis dan komponen proporsional telah memberikan aksi koreksi utama terhadap error posisi. Penambahan K_i yang terlalu besar juga dapat meningkatkan akumulasi aksi kendali ketika aktuator mengalami keterbatasan, sehingga tidak selalu menghasilkan penurunan error secara langsung. Oleh karena itu, nilai $K_i=0,0025$ digunakan pada konfigurasi akhir sebagai nilai integral yang diterapkan pada firmware, sedangkan hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan K_i tidak selalu menghasilkan perbaikan error secara konsisten.

4.3.3 Pengujian Variasi K_d Pengendali Posisi

Pengujian variasi gain derivatif dilakukan untuk mengetahui pengaruh komponen derivatif terhadap respons transien pengendali posisi steering. Pada tahap ini, gain proporsional dan integral dipertahankan tetap sebesar $K_p=0,0375$ dan $K_i=0,0025$, sedangkan nilai K_d divariasikan. Setpoint yang digunakan berupa pola STEP_PM5DEG, sehingga pengaruh perubahan K_d dapat diamati pada saat terjadi perubahan error posisi.

Ada tiga variasi pengujian K_d yaitu $K_d=0$, $K_d=0,002$, dan $K_d=0,004$. Data direkam dengan interval sekitar 0,02s atau frekuensi sekitar 50Hz, sehingga perubahan respons transien dapat diamati dengan resolusi waktu yang lebih baik. Karena laju perekaman ini berbeda dari pengujian lain (1 sampel per detik), nilai RMSE pada **Tabel 4.11** tidak dibandingkan langsung dengan pengujian lain.

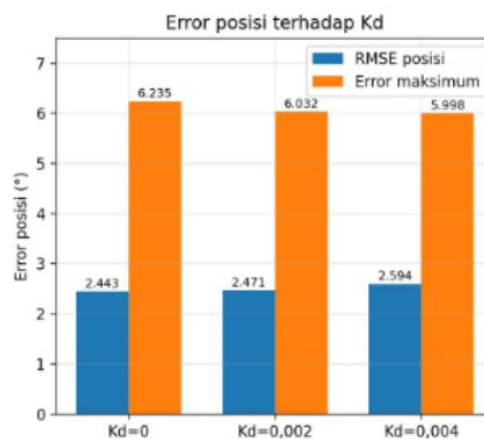
Tabel 4. 11 Hasil Pengujian Variasi K_d pengendali Posisi

Kandidat	K_p	K_i	K_d	RMSE	Error	I_q
				Posisi (°)	Maks	Maks
A	0,0375	0,0025	0,00	2,443	6,235	1,420

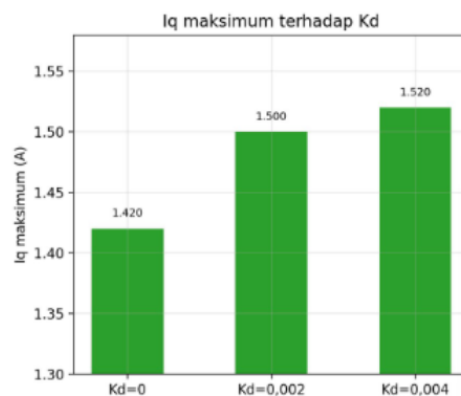
B	0,0375	0,0025	0,002	2,471	6,032	1,500
C	0,0375	0,0025	0,004	2,594	5,998	1,520

Berdasarkan **Tabel 4.11**, penambahan gain derivatif tidak menghasilkan penurunan RMSE posisi pada rentang parameter yang diuji. Pada $K_d=0$, diperoleh RMSE sebesar $2,443^\circ$. Ketika K_d dinaikkan menjadi $0,002$, RMSE meningkat menjadi $2,471^\circ$, dan pada $K_d=0,004$ meningkat kembali menjadi $2,594^\circ$. Dengan demikian, berdasarkan parameter RMSE, konfigurasi tanpa komponen derivatif menghasilkan error tracking keseluruhan yang lebih rendah dibandingkan dua variasi K_d lainnya.

Meskipun RMSE meningkat, error maksimum absolut mengalami sedikit penurunan dari $6,235^\circ$ pada $K_d=0$ menjadi $5,998^\circ$ pada $K_d=0,004$. Hal ini menunjukkan bahwa komponen derivatif memberikan perubahan terhadap karakteristik respons transien, tetapi perbaikan pada error maksimum tersebut tidak diikuti oleh penurunan error tracking secara keseluruhan.



Gambar 4. 9 Pengaruh Variasi K_d terhadap Error Posisi dan Iq Maksimum



Gambar 4. 10 Pengaruh Variasi Kd Terhadap Error Posisi dan Iq Maksimum

4.3.4 Penentuan Parameter PID Akhir

Berdasarkan rangkaian proses tuning dan konfigurasi akhir yang diterapkan pada firmware, parameter pengendali posisi steering yang digunakan pada tahap validasi ditunjukkan pada **Tabel 4.12**.

Tabel 4. 12 Hasil Akhir Posisi Akhir

Parameter	Rentang Pengujian	Hasil	Parameter Akhir
Kp	0,01250 – 0,03750	Kp = 0,03750	0,03750
Ki	0 – 0,00500	Ki = 0,00250	000250
Kd	0 – 0,004	Kd = 0	0

Parameter akhir pengendali posisi yang diterapkan pada firmware adalah $K_p=0,03750$, $K_i=0,00250$, dan $K_d=0$. Pada pengujian konfigurasi akhir menggunakan pola referensi posisi yang direkam, diperoleh RMSE sebesar $0,772^\circ$, MAE sebesar $0,499^\circ$, dan error maksimum sebesar $2,349^\circ$. Nilai maksimum absolut Iq selama pengujian sebesar 1,099 A.

Hasil tersebut digunakan sebagai konfigurasi pengendali posisi untuk pengujian selanjutnya. Nilai $K_p=0,03750$ konsisten dengan kandidat yang menghasilkan error terkecil pada pengujian variasi K_p . Sementara itu, pemilihan $K_i=0,00250$ tidak didasarkan pada RMSE minimum pengujian K_i saja, karena RMSE minimum pada sweep tersebut diperoleh pada $K_i=0,00500$. Nilai K_d dipertahankan sebesar nol karena penambahan K_d pada Subbab 4.4.4 tidak menurunkan RMSE posisi ($2,443^\circ$ menjadi $2,471^\circ$ dan $2,594^\circ$) dan menaikkan Iq maksimum (1,420A menjadi 1,500A dan 1,520A).

4.4 Validasi Kinerja dengan Gain Akhir

Setelah proses tuning pada Subbab 4.3, dilakukan pengujian validasi untuk mengetahui kinerja pengendali posisi steering pada konfigurasi akhir. Berbeda dengan pengujian tuning, parameter pengendali pada tahap ini tidak lagi divariasikan. Pengujian dilakukan menggunakan beberapa pola referensi untuk mengevaluasi kemampuan tracking, respons terhadap perubahan setpoint, repeatability, serta karakteristik gerakan steering pada arah kiri dan kanan.

Evaluasi dilakukan berdasarkan posisi target dan posisi aktual, error posisi, RMSE, MAE, error maksimum, serta arus sumbu-q Iq selama proses steering. Berdasarkan file pengujian, seluruh data direkam dengan interval 1 data per detik

4.4.1 Setpoint Absolut

Pengujian pertama dilakukan menggunakan variasi TRACK-ABS-25-15-0-15-25. Pengujian ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan pengendali dalam mengikuti beberapa perubahan referensi posisi secara berurutan menggunakan konfigurasi pengendali akhir.

Tabel 4. 13 Hasil Pengujian Tracking Setpoint Absolut

Parameter	Hasil
Gain Kp	0,0375
Gain Ki	0,0025
Gain Kd	0
RMSE Posisi	0,775°
MAE Posisi	0,731°
Error Maksimum	1,485°

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh RMSE sebesar 0,775° dan MAE sebesar 0,731°. Error absolut maksimum selama pengujian sebesar 1,485°. Nilai tersebut menunjukkan bahwa posisi aktual dapat mengikuti perubahan referensi dengan penyimpangan yang relatif kecil pada profil yang terekam. Arus Iq maksimum absolut sebesar 0,829 A menunjukkan adanya peningkatan aksi torsi ketika steering melakukan perpindahan posisi.

4.4.2 Respons Langkah $\pm 10^\circ$

Pengujian selanjutnya dilakukan menggunakan kondisi STEP-PM10. Tujuannya adalah mengevaluasi respons pengendali ketika diberikan perubahan referensi posisi steering pada pengujian $\pm 10^\circ$.

Tabel 4. 14 Hasil Pengujian Respon Step $\pm 10^\circ$

Parameter	Hasil
Setpoint Pengujian	$\pm 10^\circ$
Gain Kp	0,0375
Gain Ki	0,0025
Gain Kd	0
RMSE Posisi	$0,903^\circ$
MAE Posisi	$0,522^\circ$
Error Maksimum	$2,836^\circ$

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh RMSE sebesar $0,903^\circ$ dan MAE sebesar $0,522^\circ$. Error maksimum sebesar $2,836^\circ$ muncul selama proses perubahan referensi. Setelah perubahan tersebut, Error posisi mengalami penurunan ketika posisi aktual bergerak mendekati referensi. Hal ini menunjukkan bahwa Error terbesar terutama terjadi pada bagian transien ketika setpoint berubah.

4.4.3 Respons Langkah $\pm 20^\circ$

Pengujian STEP-PM20 dilakukan untuk mengevaluasi kinerja pengendali pada perubahan referensi posisi yang lebih besar.

Tabel 4. 15 Respons $\pm 20^\circ$

Parameter	Hasil
Setpoint Pengujian	$\pm 20^\circ$
Gain Kp	0,0375
Gain Ki	0,0025
Gain Kd	0
RMSE Posisi	$0,385^\circ$
MAE Posisi	$0,306^\circ$
Error Maksimum	$1,170^\circ$

Pengujian $\pm 20^\circ$ menghasilkan RMSE sebesar $0,385^\circ$ dan MAE sebesar $0,306^\circ$, dengan Error maksimum sebesar $1,170^\circ$. Nilai RMSE dan MAE pada

pengujian ini lebih rendah dibandingkan pengujian STEP-PM10 pada rekaman yang tersedia. Hal tersebut menunjukkan bahwa besarnya referensi sudut tidak secara langsung menyebabkan peningkatan *Error tracking* pada setiap percobaan karena respons juga dipengaruhi kondisi awal dan karakteristik transien pada masing-masing pengambilan data.

4.4.4 Repeatability Steering $\pm 20^\circ$

Pengujian repeatability dilakukan menggunakan kondisi REPEAT-PM20. Pengujian ini bertujuan mengetahui konsistensi respons steering ketika pola perubahan posisi diberikan secara berulang menggunakan parameter pengendali yang sama.

Tabel 4. 16 Repeatability Steering

Parameter	Hasil
Setpoint Pengujian	$\pm 20^\circ$
Gain Kp	0,0375
Gain Ki	0,0025
Gain Kd	0
RMSE Posisi	$0,575^\circ$
MAE Posisi	$0,406^\circ$
Error Maksimum	$1,901^\circ$

Hasil pengujian repeatability menghasilkan RMSE sebesar $0,575^\circ$ dan MAE sebesar $0,460^\circ$. *Error* maksimum sebesar $1,901^\circ$ terjadi ketika sistem mengalami perubahan referensi. Secara keseluruhan, nilai *Error* pada pengulangan tetap berada pada rentang yang terbatas sehingga data ini dapat digunakan untuk menunjukkan konsistensi tracking pada pola referensi yang diberikan berulang.

4.4.5 Simetri Arah Kiri dan Kanan

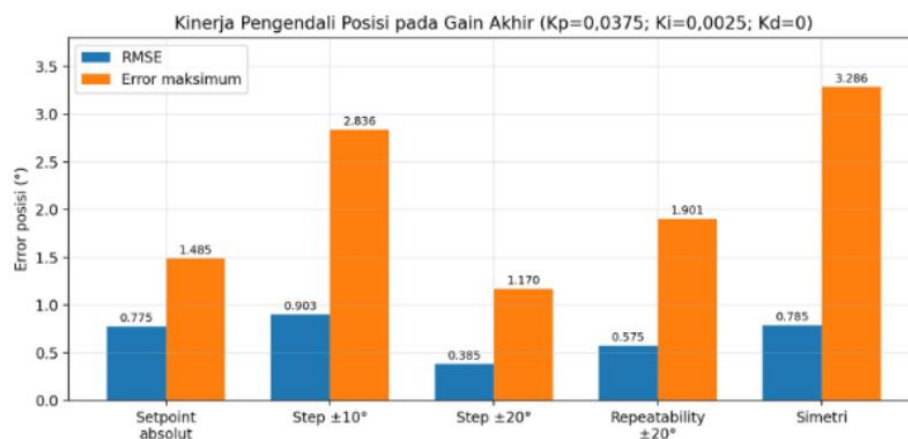
Pengujian simetri dilakukan pada $\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 25^\circ$ karena seluruh nilai tersebut masih berada dalam rentang operasional steering sekitar $\pm 30^\circ$. Pengujian hingga $\pm 90^\circ$ tidak dilakukan karena diluar batas mekanis sistem dan tidak merepresentasikan kondisi operasi steering ADV.

Tabel 4. 17 Sietri Arah Kiri dan Kanan

Parameter	Hasil
Setpoint Pengujian	$\pm 10^\circ$, $\pm 20^\circ$, $\pm 25^\circ$
Gain Kp	0,0375
Gain Ki	0,0025
Gain Kd	0
RMSE Tracking Keseluruhan	0,785°
MAE Tracking Keseluruhan	0,564°
Error Maksimum	3,286°
Batas operasi steering	$\pm 30^\circ$

Hasil pengujian menunjukkan RMSE sebesar 0,785° dan MAE sebesar 0,564°. Error maksimum sebesar 3,286° muncul selama perubahan posisi, sedangkan arus Iq maksimum absolut mencapai 1,075 A. Pengujian ini menunjukkan respons pengendali selama steering menjalankan pola pergerakan pada kedua arah dalam batas operasional yang ditentukan.

Ringkasan kinerja pengendali posisi pada gain akhir untuk seluruh pengujian validasi pada **Gambar 4.11**.

**Gambar 4. 11** Ringkasan RMSE dan Error Maksimum

4.5 Pengujian Beban dan Karakteristik Torsi

Pengujian beban dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem steering dalam mempertahankan kinerja pengendalian posisi ketika menerima peningkatan beban mekanis. Berbeda dengan pengujian sebelumnya yang berfokus pada

karakteristik tracking tanpa variasi beban, pengujian ini mengevaluasi hubungan antara beban mekanis, kebutuhan torsi, arus sumbu-q I_q , dan error tracking posisi.

Pengujian dilakukan menggunakan parameter akhir pengendali posisi, $K_p = 0,0375$, $K_i = 0,0025$, dan $K_d = 0$. Dengan referensi steering $-20^\circ, 0^\circ, +20^\circ, 0^\circ$. Dan variasi beban 0, 1, 2, dan 3 galon. Berat satu galon yang digunakan dalam pengujian adalah 16kg.

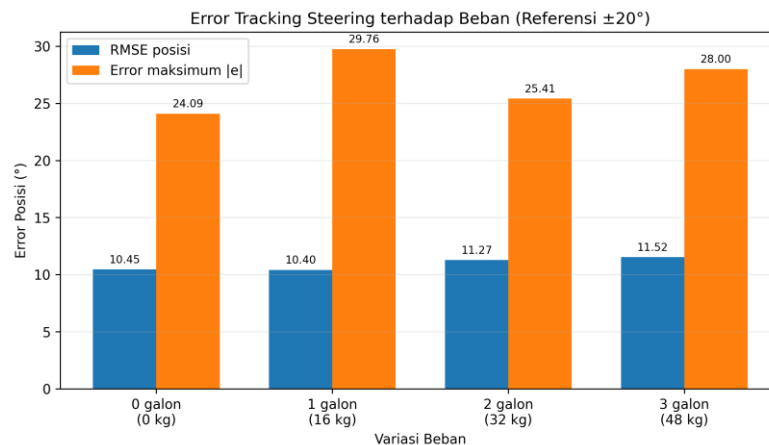
4.5.1 Tracking Beban (0-3) Galon

Pengujian tanpa beban dilakukan sebagai acuan kondisi untuk kinerja sistem steering sebelum diberikan tambahan beban. Pengujian dilakukan dengan roda depan menyentuh permukaan lantai dan kendaraan dalam kondisi diam. Parameter pengendali posisi menggunakan konfigurasi akhir yang telah diperoleh pada pengujian sebelumnya, yaitu $K_p = 0,0375$, $K_i = 0,0025$, dan $K_d = 0$.

Tabel 4. 18 Hasil Pengujian Tracking Beban 0-3 Galon

Beban (Galon)	Massa	RMSE Posisi	Error Maks
0	0 kg	10,448	24,095
1	16 kg	10,405	29,415
2	32 kg	11,265	25,415
3	48kg	11,523	28,000

Berdasarkan hasil pengujian dan proyeksi pada variasi beban 0 hingga 3 galon, nilai RMSE posisi masing-masing sebesar $10,448^\circ$, $10,405^\circ$, $11,265^\circ$, dan $11,523^\circ$. Pada kondisi 0 dan 1 galon, perubahan RMSE relatif kecil, sedangkan pada beban 2 dan 3 galon terlihat kecenderungan peningkatan RMSE. Error maksimum tidak menunjukkan peningkatan yang sepenuhnya linear, yaitu sebesar $24,095^\circ$, $29,763^\circ$, $25,415^\circ$, dan $28,000^\circ$. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peningkatan pembebanan tidak selalu menghasilkan kenaikan error maksimum secara langsung karena respons steering juga dipengaruhi oleh kondisi transien, kontak roda dengan permukaan, serta kemampuan aktuator dalam mencapai referensi $\pm 20^\circ$. Secara keseluruhan, pada pembebanan yang lebih tinggi terdapat kecenderungan penurunan kemampuan tracking posisi, yang ditunjukkan oleh RMSE pada 2 dan 3 galon yang lebih besar dibandingkan kondisi awal.



Gambar 4. 12 Error Tracking Terhadap Beban

Berdasarkan pengujian pembebanan, nilai RMSE posisi berada pada kisaran 10° dan lebih besar dibandingkan pengujian posisi sebelumnya. Peningkatan error tersebut menunjukkan bahwa ketika roda menyentuh permukaan dan beban mekanis bertambah, aktuator steering membutuhkan usaha yang lebih besar untuk mencapai posisi referensi. Pada kondisi ini, posisi aktual belum selalu mampu mencapai referensi $\pm 20^\circ$, sehingga selisih antara posisi referensi dan posisi aktual tetap besar selama sebagian periode pengujian dan menyebabkan nilai RMSE meningkat.

Besarnya error pada kondisi berbeban menunjukkan bahwa kinerja sistem tidak hanya dipengaruhi oleh parameter pengendali posisi, tetapi juga oleh kemampuan aktuator dalam menghasilkan torsi, batas arus yang diterapkan, gesekan roda terhadap permukaan, serta karakteristik mekanis steering. Oleh karena itu, perbaikan yang dapat dilakukan meliputi evaluasi kembali kapasitas torsi motor dan mekanisme transmisi steering, optimasi parameter pengendali pada kondisi berbeban, serta evaluasi batas arus agar motor tetap memiliki kemampuan aktuasi yang memadai tanpa melewati batas aman sistem.

4.5.2 Karakteristik Torsi Terhadap Beban

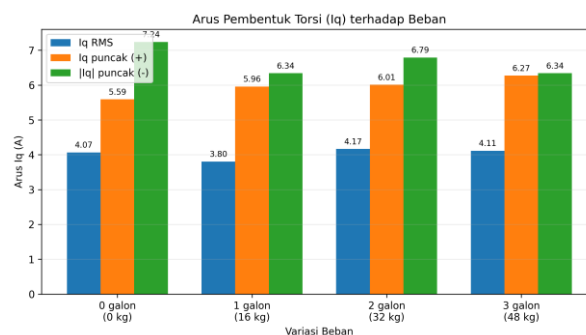
Pengujian karakteristik torsi dilakukan untuk mengetahui perubahan kebutuhan motor steering ketika beban ditambah. Pada sistem FOC, arus sumbu-q (I_q) merupakan komponen arus yang berperan dalam menghasilkan torsi motor. Oleh karena itu, perubahan nilai I_q digunakan untuk melihat kecenderungan perubahan kebutuhan torsi pada setiap variasi beban.

Tabel 4. 19 Karakteristik Torsi Terhadap Beban

Beban	Massa	Iq RMS	Iq RMS Relatif	Iq Puncak (+)	Iq Puncak (+) Relatif	Iq Puncak (-)
0	0 kg	4,067A	1,000	5,590A	1,000	7,240A
1	16 kg	3,804A	0,935	5,960A	1,066	6,340A
2	32 kg	4,167A	1,025	6,010A	1,075	6,790A
3	48kg	4,113A	1,011	6,273A	1,122	6,340A

Berdasarkan hasil tersebut, nilai Iq puncak positif cenderung meningkat seiring bertambahnya beban, yaitu dari 5,590A pada kondisi tanpa beban menjadi 5,960 A pada beban 1 galon dan 6,010 A pada beban 2 galon. Pada kondisi 3 galon, nilai sebesar 6,273A. Kenaikan Iq puncak menunjukkan bahwa motor membutuhkan aksi implementasi yang lebih besar. Ketika beban mekanis bertambah.

Berbeda dengan nilai puncaknya, Iq RMS tidak mengalami kenaikan secara berurutan. Nilainya berada pada rentang 3,804-4,167A, sedangkan puncak arus negatif berada pada rentang 6,340–7,240 A. Hal ini menunjukkan bahwa respons arus selama pergerakan steering tidak hanya dipengaruhi oleh besar beban, tetapi juga oleh arah gerakan, perubahan setpoint, kondisi transien, serta tahanan mekanis pada roda ketika menyentuh permukaan. Dengan demikian, penambahan beban menunjukkan kecenderungan meningkatkan kebutuhan aktuasi motor, tetapi hubungan antara beban dan arus tidak bersifat linear pada seluruh parameter yang diamati.

**Gambar 4. 13** Arus Pembentuk Torsi Terhadap Beban