

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Pengujian Batas Arus Startup

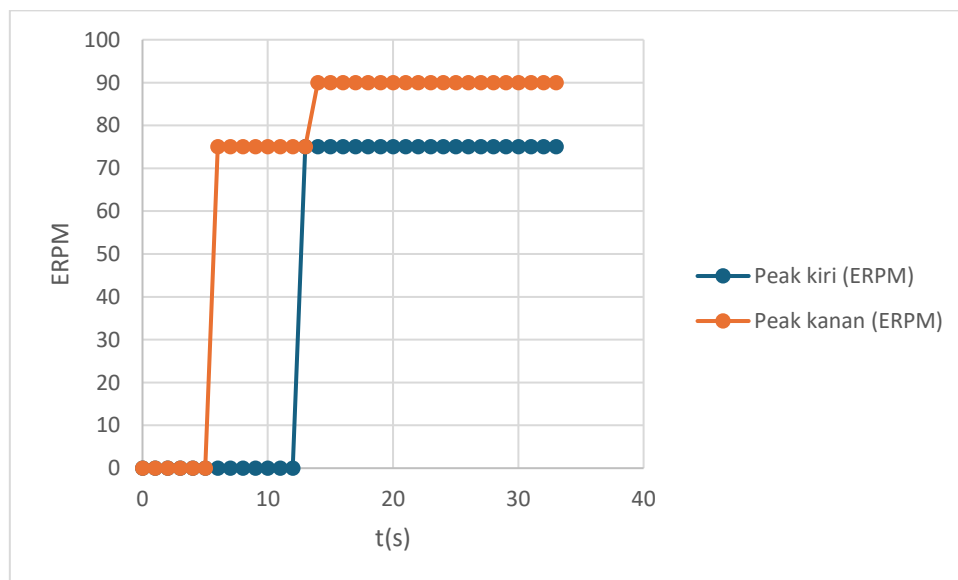
Pada tahap pengujian awal dilakukan pengujian batas arus statup terlebih dahulu untuk mengetahui pengaruh besar arus terhadap kemampuan motor menghasilkan torsi awal. Variasi batas arus diberikan sebesar 1,5 A, 2 A, dan 3 A, kemudian diamati waktu mulai bergerak serta kecepatan awal motor kiri dan kanan

Tabel 4. 1 Pengujian Batas Arus 1.5A

Waktu (s)	Batas Arus Startup (A)	Beban Aktual (kg)	Peak Kiri (ERPM)	Peak Kanan (ERPM)	Keterangan
0	1,50	50	0	0	Belum Gerak
1	1,50	50	0	0	Belum Gerak
2	1,50	50	0	0	Belum Gerak
3	1,50	50	0	0	Belum Gerak
4	1,50	50	0	0	Belum Gerak
5	1,50	50	0	0	Belum Gerak
6	1,50	50	0	75	Gerak Terdeteksi
7	1,50	50	0	75	Gerak Terdeteksi
8	1,50	50	0	75	Gerak Terdeteksi
9	1,50	50	0	75	Gerak Terdeteksi
10	1,50	50	0	75	Gerak Terdeteksi

Berdasarkan **Tabel 4. 1 Pengujian Batas Arus 1.5A**, pengujian batas arus startup sebesar 1,5 A dilakukan pada kondisi tanpa beban. Pada interval waktu 0–5 s, motor kiri dan kanan belum menunjukkan pergerakan. Gerakan pertama mulai terdeteksi pada motor

kanan pada detik ke-6 dengan nilai peak sebesar 75 ERPM, sedangkan motor kiri tetap berada pada nilai 0 ERPM hingga akhir pengujian pada detik ke-10. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa beban, batas arus startup 1,5 A belum mampu menghasilkan respons awal yang sama pada kedua motor.



Gambar 4. 1 Grafik Pengujian Batas Arus 1.5 A

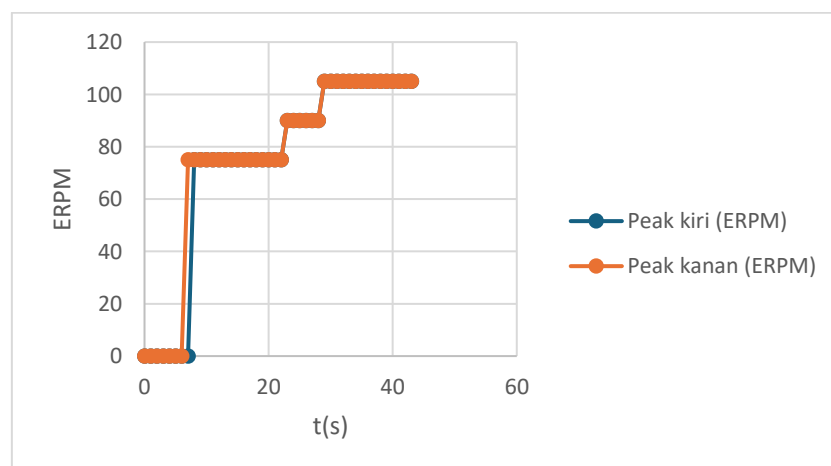
Berdasarkan grafik diatas menunjukkan bahwa motor kanan mampu menghasilkan gerakan, sedangkan motor kiri belum mampu mengatasi hambatan awal. Perbedaan respons ini dapat menunjukkan adanya perbedaan karakteristik mekanik maupun kebutuhan torsi awal antara motor kiri dan motor kanan. Selanjutnya pada pengujian kedua dengan menaikkan nilai arus sebesar 2A. Hasil dari pengujian tersebut ditunjukkan oleh Tabel 4. 2 Pengujian Batas Arus 2A

Tabel 4. 2 Pengujian Batas Arus 2A

Waktu (s)	Batas Arus Startup (A)	Beban Aktual (kg)	Peak Kiri (ERPM)	Peak Kanan (ERPM)	Keterangan
0	2,00	0	0	0	Belum Gerak
1	2,00	0	0	0	Belum Gerak
2	2,00	0	0	0	Belum Gerak

Waktu (s)	Batas Arus Startup (A)	Beban Aktual (kg)	Peak Kiri (ERPM)	Peak Kanan (ERPM)	Keterangan
3	2,00	0	0	75	Gerak Terdeteksi
4	2,00	0	75	75	Gerak Terdeteksi
5	2,00	0	75	75	Gerak Terdeteksi
6	2,00	0	75	75	Gerak Terdeteksi
7	2,00	0	75	75	Gerak Terdeteksi
8	2,00	0	75	75	Gerak Terdeteksi
9	2,00	0	75	75	Gerak Terdeteksi
10	2,00	0	75	75	Gerak Terdeteksi

Berdasarkan **Tabel 4. 2 Pengujian Batas Arus 2A**, pada batas arus startup 2 A motor kanan mulai bergerak pada detik ke-3 dengan peak 75 ERPM, sedangkan motor kiri mulai bergerak pada detik ke-4 dengan peak 75 ERPM. Hal ini menunjukkan bahwa motor kanan memiliki respons awal sedikit lebih cepat dibandingkan motor kiri.



Gambar 4. 2 Grafik Pengujian Batas Arus 2A

Berdasarkan grafik, terlihat adanya selisih waktu respons awal antara motor kanan dan motor kiri. Motor kanan mencapai kondisi bergerak lebih dahulu, sedangkan motor

kiri menyusul satu detik kemudian. Setelah kedua motor bergerak, nilai peak keduanya cenderung stabil pada sekitar 75 ERPM. Pola ini menunjukkan bahwa batas arus startup 2 A sudah mampu menggerakkan kedua motor dengan respons yang relatif seragam setelah fase awal gerakan.

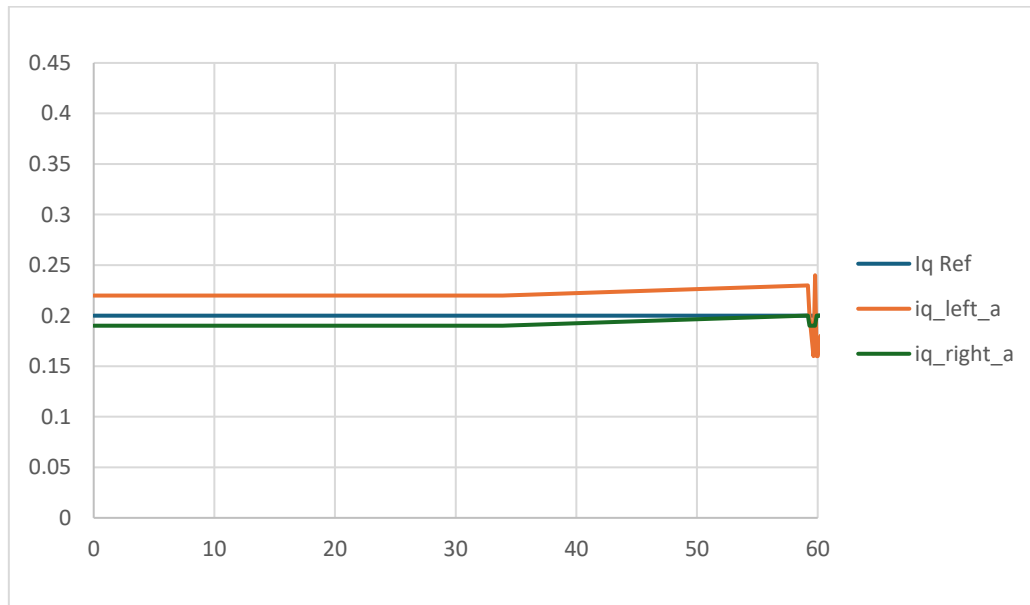
Pengujian selanjutnya dilakukan dengan menetapkan nilai arus sebesar 0.2 A dan membandingkan dengan nilai arus aktual untuk mengetahui respon motor dapat bergerak

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Tracking Arus Referensi dan Arus Aktual Sumbu-q

elapsed_s	Target rpm	ERPM	ERPM	Vbus	Id	Iq Kiri	iq_right_a	Iq Ref
		Kiri	Kanan					
33.768	35	21.46667	36.86667	42.1	0	0.22	0.19	0.2
33.896	35	21.46667	36.86667	42.1	0	0.22	0.19	0.2
59.194	35	16.13333	34.46667	42.1	0	0.23	0.2	0.2
59.313	35	21.8	36.4	42.1	0	0.2	0.19	0.2
59.651	35	23.4	35.73333	42.1	-0.005	0.16	0.19	0.2
59.78	35	23	34.46667	42.1	0	0.24	0.19	0.2
59.909	35	25.66667	33.73333	42.1	0	0.16	0.2	0.2
60.015	35	26.66667	33.73333	42.1	0	0.16	0.2	0.2
60.225	35	20.93333	36.86667	42.1	0	0.18	0.2	0.2
60.344	35	20.93333	36.86667	42.1	0	0.18	0.2	0.2
60.525	35	24.53333	33.53333	42.1	0	0.18	0.22	0.2
60.688	35	19.33333	36.46667	42.1	0	0.2	0.18	0.2
60.833	35	21.06667	33.2	42.1	0.005	0.23	0.2	0.2
60.938	35	26.06667	33.93333	42.1	0	0.19	0.22	0.2
61.147	35	21.73333	32.06667	42.1	-0.005	0.17	0.23	0.2
61.292	35	25.13333	33.8	42.1	0	0.17	0.22	0.2
61.438	35	20.53333	35.86667	42.1	0	0.18	0.21	0.2
61.542	35	19.33333	35.2	42.1	0	0.23	0.2	0.2
61.687	35	20.33333	35.53333	42.1	0	0.2	0.19	0.2
61.792	35	21.66667	35.66667	42.1	0	0.22	0.2	0.2
61.937	35	19.13333	34.46667	42.1	0	0.22	0.2	0.2

Berdasarkan **Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Tracking Arus Referensi dan Arus Aktual Sumbu-q**, pengujian dilakukan dengan referensi arus sumbu-q Iq Ref sebesar 0,2 A dan target kecepatan 35 ERPM. Hasil pengujian menunjukkan bahwa arus aktual Iqmotor kiri berada pada rentang 0,16–0,24 A, sedangkan motor kanan berada pada rentang 0,18–0,23 A. Nilai tersebut berada di sekitar arus referensi 0,2 A, sehingga menunjukkan bahwa pengendalian arus sumbu-q mampu mengikuti nilai referensi meskipun masih terdapat fluktuasi selama motor beroperasi. Sementara itu, nilai Id

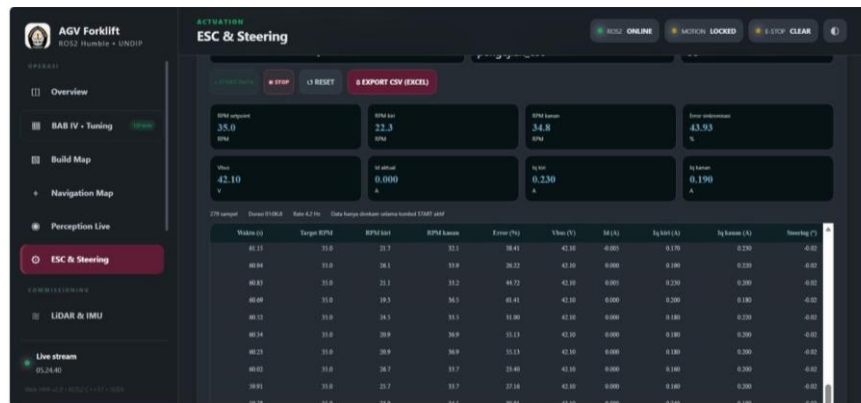
berada pada kisaran $-0,005$ hingga $0,005$ A atau mendekati 0 A, sesuai dengan prinsip FOC yang menjaga komponen arus sumbu-d tetap minimum. Pada kondisi tersebut kedua motor tetap menghasilkan respons putaran, dengan ERPM aktual yang berfluktuasi terhadap target 35 ERPM. Respons arus dan kecepatan motor secara lebih jelas ditunjukkan pada grafik berikutnya.



Gambar 4. 3 Respons Arus Iq Aktual terhadap Arus Referensi Iq 0,2

Berdasarkan **Gambar 4. 3 Respons Arus Iq Aktual terhadap Arus Referensi Iq 0,2** nilai arus referensi Iq Ref ditetapkan sebesar 0,2 A. Arus aktual Iq motor kiri dan kanan mampu mengikuti nilai referensi tersebut dengan fluktuasi yang relatif kecil. Berdasarkan data pengujian, Iq motor kiri berada pada rentang 0,16–0,24 A, sedangkan Iq motor kanan berada pada rentang 0,18–0,23 A. Fluktuasi di sekitar nilai referensi menunjukkan adanya respons dinamis pengendali arus ketika motor beroperasi. Meskipun terdapat penyimpangan sesaat, nilai Iq aktual cenderung kembali mendekati referensi 0,2 A. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian arus FOC mampu mempertahankan komponen arus penghasil torsi di sekitar nilai referensi yang diberikan.

Pengujian juga di validasi oleh tampilan GUI untuk verifikasi nilai aktual arus. Tampilan GUI ditunjukkan oleh **Gambar 4. 4 Tampilan GUI Verifikasi Arus**



Gambar 4. 4 Tampilan GUI Verifikasi Arus

Gambar 4. 4 Tampilan GUI Verifikasi Arus menunjukkan tampilan GUI yang digunakan pada proses verifikasi arus motor BLDC. Melalui GUI tersebut, parameter pengujian dapat dipantau secara real-time, meliputi nilai ERPM motor kiri dan kanan, tegangan bus Vbus, arus Id, arus Iq aktual, serta nilai Iq referensi. Tampilan ini digunakan untuk memastikan bahwa nilai arus aktual yang diterima dari sistem sesuai dengan nilai referensi yang diberikan selama pengujian. Data yang ditampilkan pada GUI selanjutnya direkam sebagai data pengujian untuk dianalisis dalam bentuk tabel dan grafik.

4.2 Pengujian Pengaruh Gain terhadap Respon Kecepatan pada Seluruh Setpoint

Pada pengujian yang dilakukan, setelah batas operasi awal ditentukan, pengujian dilanjutkan pada pengaruh parameter pengendali kecepatan. Loop kecepatan bekerja sebagai outer loop yang membandingkan kecepatan referensi dengan kecepatan aktual, kemudian menghasilkan referensi arus Iq untuk inner loop FOC. Pengujian gain dilakukan dengan mengubah satu parameter pada satu waktu sehingga pengaruh Kp dan Ki dapat diamati secara terpisah melalui overshoot, RMSE, dan steady-state error (SSE). Selain itu pada pengujian ini nilai setpoint tetap pada 500 ERPM dengan variasi Kp dan Ki yang diubah-ubah.

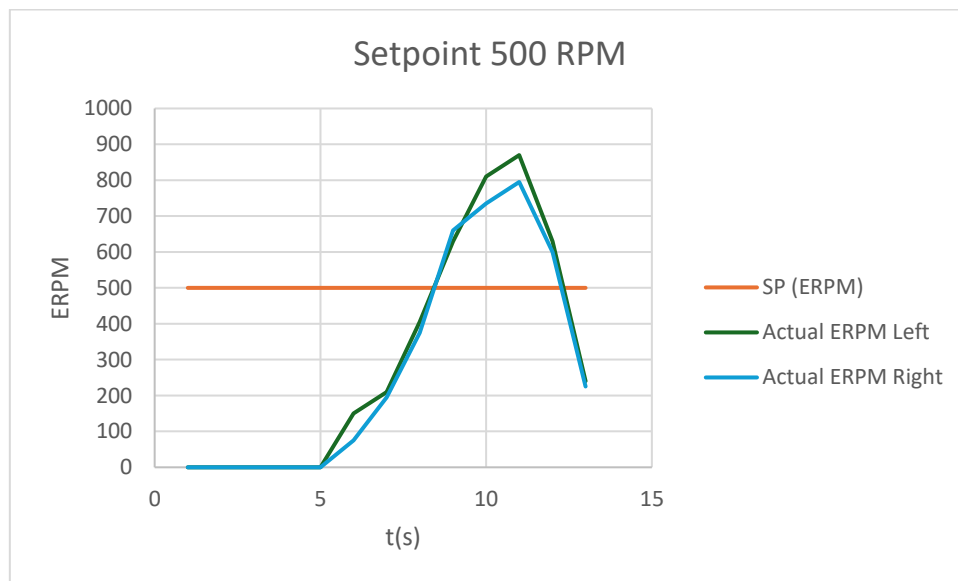
4.2.1 Pengujian 1

Pada pengujian 1 dilakukan dengan setup nilai Kp 0.002 dan nilai Ki 0.05. nilai Kp dan Ki pada motor kanan dan kiri dibuat sama dan pengujian dilakukan selama 10 detik. Berikut data hasil pengujian

Tabel 4. 4 Pengujian Variasi 1

SP (ERPM)	Actual	Actual	Kp		Ki	Ki Right
	ERPM Left	ERPM Right	Left	Ki Left	Right	
500	0	0	0.002	0.05	0.002	0.05
500	0	0	0.002	0.05	0.002	0.05
500	0	0	0.002	0.05	0.002	0.05
500	0	0	0.002	0.05	0.002	0.05
500	0	0	0.002	0.05	0.002	0.05
500	150	75	0.002	0.05	0.002	0.05
500	210	195	0.002	0.05	0.002	0.05
500	405	375	0.002	0.05	0.002	0.05
500	630	660	0.002	0.05	0.002	0.05
500	810	735	0.002	0.05	0.002	0.05
500	870	795	0.002	0.05	0.002	0.05
500	630	600	0.002	0.05	0.002	0.05
500	240	225	0.002	0.05	0.002	0.05
500	0	0	0.002	0.05	0.002	0.05

Berdasarkan hasil pengujian pada setpoint 500 ERPM dengan nilai Kp 0.002 dan Ki 0.5. kedua motor mulai memberikan respons setelah beberapa detik pengujian. Kecepatan motor kemudian meningkat melewati nilai setpoint, dengan nilai maksimum sebesar 870 ERPM pada motor kiri dan 795 ERPM pada motor kanan. Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa kombinasi parameter tersebut masih menghasilkan overshoot pada respons kecepatan motor. Untuk memperjelas karakteristik respons kecepatan terhadap setpoint, data hasil pengujian tersebut selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara waktu dan kecepatan aktual motor



Gambar 4. 5 Pengujian Variasi 1

Berdasarkan grafik respons pada setpoint 500 ERPM, motor kiri dan motor kanan mulai mengalami kenaikan kecepatan setelah sekitar detik ke-5. Kedua respons kemudian meningkat melewati nilai setpoint, sehingga terjadi overshoot. Motor kiri mencapai nilai puncak sekitar 870 ERPM, sedangkan motor kanan sekitar 795 ERPM. Setelah mencapai puncak, kecepatan kedua motor menurun kembali dan mendekati setpoint pada sekitar detik ke-12, namun belum menunjukkan kondisi tunak yang stabil karena pada akhir pengujian nilai kecepatan kembali turun cukup signifikan. Perbedaan nilai puncak antara motor kiri dan kanan menunjukkan bahwa karakteristik respons kedua motor tidak sepenuhnya identik meskipun menggunakan parameter pengendali yang sama

4.2.2 Pengujian 2

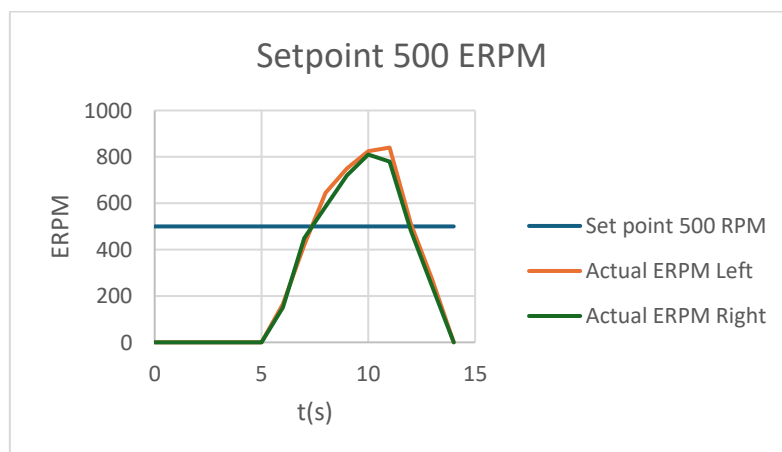
Pada pengujian kedua dilakukan dengan setup pemberian nilai K_p dan K_i yang berbeda antara motor kanan dan kiri. Pada motor kiri nilai K_p 0.002, K_i 0.05. Sementara itu pada motor kanan nilai K_p 0.004, K_i 0.05 dan pengujian dilakukan selama 10 sekon. Berikut data hasil pengujian

Tabel 4. 5 Pengujian Variasi 2

t [s]	SP (ERPM)	Actual ERPM	Actual ERPM	K_p Left	K_i Left	K_p Right	K_i Right
		Left	Right				

0	500	0	0	0.002	0.05	0.004	0.05
1	500	0	0	0.002	0.05	0.004	0.05
2	500	165	150	0.002	0.05	0.004	0.05
3	500	420	450	0.002	0.05	0.004	0.05
4	500	645	585	0.002	0.05	0.004	0.05
5	500	750	720	0.002	0.05	0.004	0.05
6	500	825	810	0.002	0.05	0.004	0.05
7	500	840	780	0.002	0.05	0.004	0.05
8	500	510	480	0.002	0.05	0.004	0.05
9	500	270	240	0.002	0.05	0.004	0.05
10	500	0	0	0.002	0.05	0.004	0.05

Berdasarkan **Tabel 4. 5 Pengujian Variasi 2**, pada setpoint 500 ERPM dengan Kp kiri 0,002, Ki kiri 0,05, Kp kanan 0,004, dan Kikanan 0,05, kedua motor mulai memberikan respons setelah beberapa detik pengujian. Kecepatan aktual kemudian meningkat dan sempat melewati nilai setpoint, dengan nilai puncak sekitar 840 ERPM pada motor kiri dan 810 ERPM pada motor kanan. Data ini menunjukkan bahwa respons kedua motor masih mengalami overshoot dan belum sepenuhnya stabil pada setpoint 500 ERPM. Untuk memperjelas karakteristik respons tersebut, data pada **Tabel 4. 5 Pengujian Variasi 2** selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara waktu dan kecepatan aktual motor



Gambar 4. 6 Pengujian Variasi 2

Berdasarkan **Tabel 4. 5 Pengujian Variasi 2**, motor kiri dan kanan menunjukkan pola respons yang hampir sama. Kedua motor mampu mencapai dan melewati setpoint

500 ERPM, dengan nilai puncak sekitar 840 ERPM pada motor kiri dan 810 ERPM pada motor kanan. Kondisi tersebut menunjukkan masih terdapat overshoot yang cukup besar sehingga respons belum stabil pada setpoint. Oleh karena itu, parameter gain selanjutnya perlu disesuaikan untuk mengurangi overshoot dan meningkatkan kestabilan respons motor.

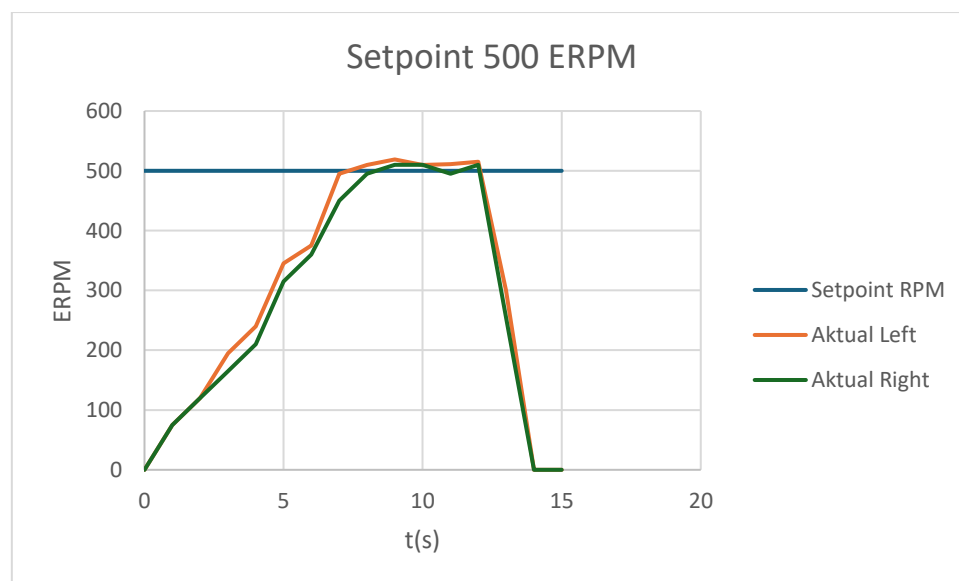
4.2.3 Pengujian 3

Pada pengujian ketiga dilakukan dengan setup pemberian nilai Kp dan Ki yang berbeda antara motor kanan dan kiri. Pada motor kiri nilai Kp 0.002, Ki 0.01. Sementara itu pada motor kanan nilai Kp 0.004, Ki 0.01 dan pengujian dilakukan selama 15 sekon. Durasi waktu berbeda dengan pengujian pertama dan kedua agar mengetahui kestabilan respon system. Berikut data hasil pengujian dari pengujian 3

Tabel 4. 6 Pengujian Variasi 3

t [s]	SP (ERPM)	Actual	Actual	Kp Left	Ki Left	Kp Right	Ki Right
		ERPM Left	ERPM Right				
0	500	0	0	0.002	0.01	0.004	0.01
1	500	75	75	0.002	0.01	0.004	0.01
2	500	120	120	0.002	0.01	0.004	0.01
3	500	195	165	0.002	0.01	0.004	0.01
4	500	240	210	0.002	0.01	0.004	0.01
5	500	345	315	0.002	0.01	0.004	0.01
6	500	375	360	0.002	0.01	0.004	0.01
7	500	495	450	0.002	0.01	0.004	0.01
8	500	510	495	0.002	0.01	0.004	0.01
9	500	519	510	0.002	0.01	0.004	0.01
10	500	510	510	0.002	0.01	0.004	0.01
11	500	511	495	0.002	0.01	0.004	0.01
12	500	515	510	0.002	0.01	0.004	0.01
13	500	300	255	0.002	0.01	0.004	0.01
14	500	0	0	0.002	0.01	0.004	0.01
15	500	0	0	0.002	0.01	0.004	0.01

Berdasarkan tabel hasil pengujian dengan setpoint 500 ERPM, Kp kiri sebesar 0,002, Ki kiri 0,01, Kp kanan 0,004, dan Ki kanan 0,01, kedua motor menunjukkan kenaikan kecepatan secara bertahap hingga mendekati setpoint. Motor kiri mencapai sekitar 519 ERPM, sedangkan motor kanan sekitar 510 ERPM, sehingga respons keduanya sudah lebih dekat terhadap nilai target dengan overshoot yang relatif kecil. Untuk memperjelas pola perubahan kecepatan terhadap waktu, selanjutnya ditunjukkan dalam bentuk grafik respons motor kiri dan kanan. sebagai berikut



Gambar 4. 7 Pengujian Variasi 3

Berdasarkan **Gambar 4. 7 Pengujian Variasi 3**, motor kiri dan kanan mampu mengikuti setpoint 500 ERPM dengan respons yang lebih stabil dan overshoot yang relatif kecil. Nilai maksimum motor kiri sekitar 519 ERPM dan motor kanan sekitar 510 ERPM. Kondisi ini menunjukkan bahwa kombinasi gain pada pengujian ini menghasilkan respons yang lebih mendekati setpoint dibandingkan variasi sebelumnya. Berdasarkan respon tersebut akan penentuan nilai Kp dan Ki untuk motor kiri dan kanan pada variasi pengujian 3 dipilih.

4.3 Karakteristik Arus Id dan Iq pada Variasi Kp dan Ki Final

Nilai Kp dan Ki final dari hasil tuning telah ditetapkan yaitu untuk motor kiri nilai Kp 0.002, Ki 0.01, sementara itu pada motor kanan nilai Kp 0.004, Ki 0.01 Nilai tersebut merupakan nilai final yang dipakai untuk menggerakkan roda BLDC. Melalui

data nilai tuning tersebut dipakai untuk respon arus Iq. Pengujian dilakukan selama 20 sekon. Data hasil pengujian ditunjukkan oleh **Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Respon Kecepatan**

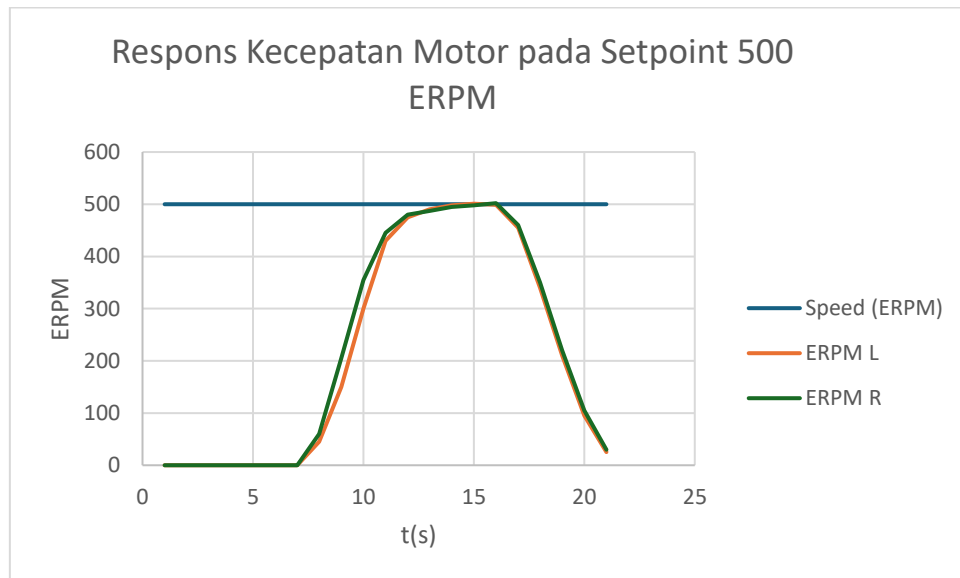
Tabel 4. 7 Hasil Pengujian Respon Kecepatan

t (s)	Speed (ERPM)	ERP M L	ERP M R	I ref (A)	I motor L (A)	Imotor R (A)	Iq L (A)	Iq R (A)	Id L (A)	Id R (A)	Vbus (V)
1	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
2	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
3	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
4	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
5	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
6	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
7	500	0	0	1.5	0	0	0	0.01	0	0	42.2
-											
8	500	45	60	1.5	-0.09	0	0.06	0.15	0.03	0.01	42.2
9	500	150	205	1.5	0	0.38	0.19	0.38	0	0	42.2
10	500	300	355	1.5	-0.45	0.71	0.45	0.71	0.01	0.02	42.2
11	500	430	445	1.5	0.52	0	0.5	0.23	0	-0.02	42.2
12	500	475	480	1.5	0.25	0	0.23	0.26	0	0	42.2
13	500	490	487	1.5	0.25	0	0.23	0.24	0	0	42.2
14	500	498	495	1.5	0.28	0	0.26	0.24	0	0	42.2
15	500	501	498	1.5	0.26	0.25	0.25	0.24	0.01	0	42.2
16	500	499	502	1.5	0.25	0.26	0.24	0.25	0	-0.01	42.2
17	500	455	460	1.5	0.2	0.21	0.19	0.2	0	0	42.2
18	500	340	350	1.5	0.16	0.17	0.15	0.16	0	0.01	42.2
19	500	210	220	1.5	0.12	0.13	0.11	0.12	0	0	42.2
20	500	95	105	1.5	0.08	0.09	0.07	0.04	0	0	42.2
21	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
22	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
23	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
24	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2
25	500	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	42.2

Berdasarkan data tersebut ditentukan nilai arus referensi sebesar 1.5A, Nilai 1.5 A juga dipilih menjadi nilai setpoint Iq dikarenakan pada nilai tersebut kecepatan juga mulai stabil

4.3.1 Respon Kecepatan

Pengujian dilakukan pada sistem Field Oriented Control (FOC) dengan setpoint kecepatan motor sebesar 500 ERPM. Nilai referensi arus pada pengujian ditetapkan sebesar 1,5 A. Pengamatan pertama dilakukan terhadap respons kecepatan motor kiri dan kanan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mencapai setpoint yang diberikan. Hasil respons kecepatan ditunjukkan pada **Gambar 4. 8 Respon Kecepatan Motor Kiri dan Kanan**



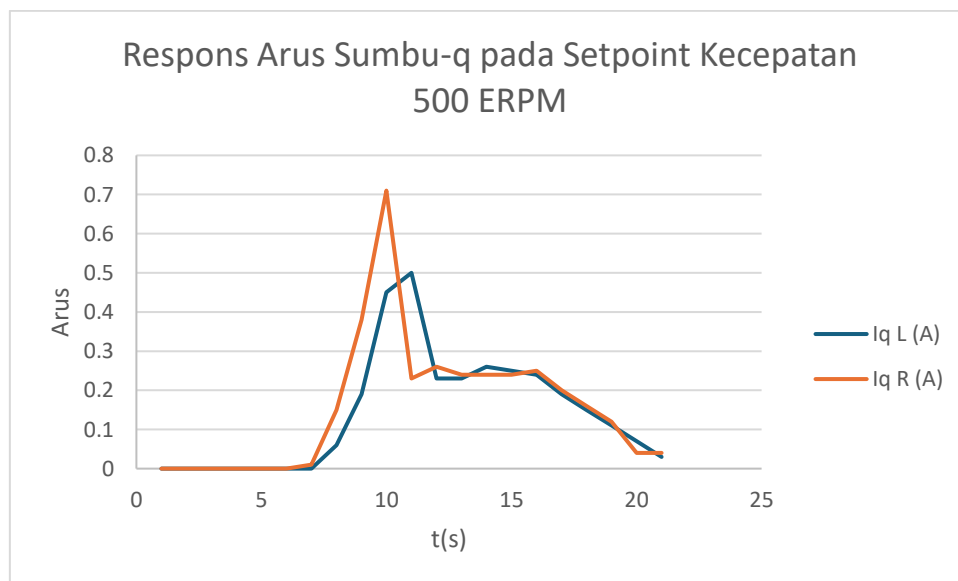
Gambar 4. 8 Respon Kecepatan Motor Kiri dan Kanan

Berdasarkan **Gambar 4. 8 Respon Kecepatan Motor Kiri dan Kanan**, motor kiri dan motor kanan menunjukkan respons kecepatan yang relatif serupa terhadap setpoint sebesar 500 ERPM. Pada awal pengujian kedua motor berada pada kondisi diam, kemudian kecepatan mulai meningkat setelah motor menerima perintah penggerak. Motor kanan menunjukkan kenaikan kecepatan yang sedikit lebih cepat dibandingkan motor kiri pada fase awal percepatan. Selanjutnya, kedua motor secara bertahap mendekati setpoint 500 ERPM. Pada kondisi mendekati tunak, kecepatan motor kiri mencapai sekitar 501 ERPM dan motor kanan sekitar 502 ERPM. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kedua motor mampu mencapai nilai yang sangat dekat dengan setpoint 500 ERPM, dengan penyimpangan maksimum pada bagian tersebut sekitar 2 ERPM. Setelah fase tersebut, kecepatan kedua motor mengalami penurunan hingga mendekati 0 ERPM. Penurunan ini menunjukkan fase deselerasi setelah perintah penghentian motor diberikan. Hasil respons kecepatan ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menganalisis perubahan arus sumbu-q I_q . Analisis I_q dilakukan

untuk mengetahui perubahan komponen arus pembentuk torsi pada saat motor mengalami fase percepatan, mendekati kecepatan tunak, dan deselerasi

4.3.2 Respon Arus Iq

Pengujian dilakukan pada setpoint kecepatan 500 ERPM dengan nilai referensi arus yang ditetapkan sebesar 1,5 A. Respons arus sumbu-q diamati pada motor kiri dan kanan selama fase percepatan, kondisi mendekati kecepatan tunak, dan deselerasi.

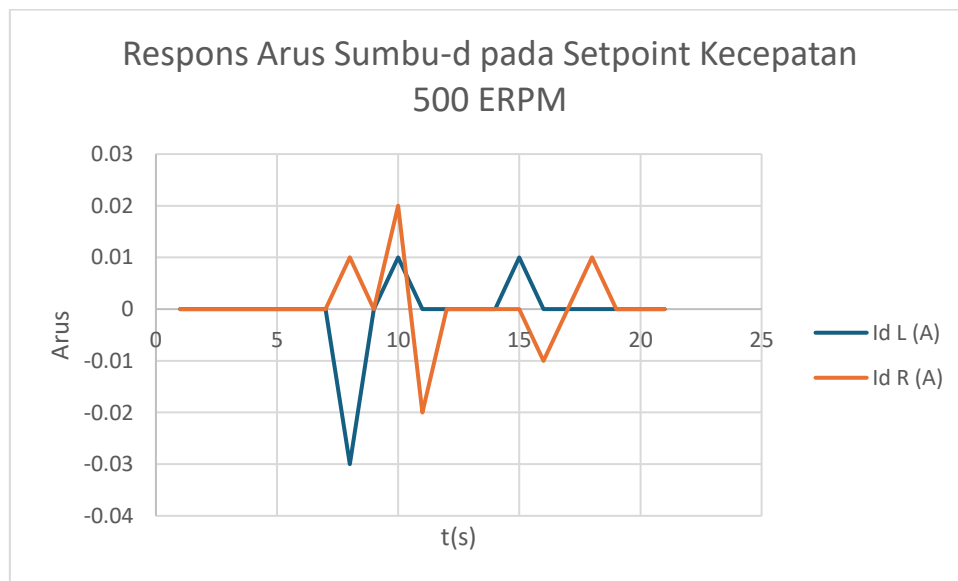


Gambar 4. 9 Respons Arus Sumbu-q Iq Motor Kiri dan Kanan pada Setpoint Kecepatan 500 ERPM

Berdasarkan grafik, arus Iq meningkat pada fase percepatan dan mencapai nilai maksimum sebesar 0,50 A pada motor kiri dan 0,71 A pada motor kanan. Setelah kecepatan motor mendekati setpoint 500 ERPM, nilai Iq menurun dan berada pada kisaran 0,24–0,25 A. Penurunan tersebut menunjukkan berkurangnya kebutuhan komponen arus pembentuk torsi setelah motor mendekati kondisi kecepatan tunak. Selanjutnya, ketika motor mengalami deselerasi, nilai Iq kembali menurun hingga mendekati 0 A

4.3.3 Pengaruh dan Arus Id

Selain pengamatan terhadap arus sumbu-q Iq, pengujian juga dilakukan terhadap arus sumbu-d Id pada motor kiri dan kanan. Pengamatan ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik komponen arus sumbu-d selama motor mengalami fase percepatan, mendekati kecepatan tunak, dan deselerasi pada setpoint kecepatan 500 ERPM. Respons arus Id motor kiri dan kanan ditunjukkan pada



Gambar 4. 10 Respons Arus Sumbu-d Id Motor Kiri dan Kanan pada Setpoint Kecepatan 500 ERPM

Berdasarkan **Gambar 4. 10 Respons Arus Sumbu-d Id Motor Kiri dan Kanan pada Setpoint Kecepatan 500 ERPM**, arus sumbu-d Id memiliki nilai referensi sebesar 0 A. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai aktual Id berada di sekitar titik referensi tersebut, meskipun terdapat penyimpangan sesaat dengan nilai minimum sekitar $-0,03$ A dan maksimum sekitar $0,01$ A. Fluktuasi tersebut terjadi pada kondisi transien dan dapat dipengaruhi oleh proses sampling serta respons pengendali arus. Setelah terjadi penyimpangan, nilai Id kembali mendekati 0 A. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali FOC berupaya mempertahankan komponen arus sumbu-d pada nilai minimum, sedangkan komponen arus sumbu-q I_q digunakan sebagai komponen utama dalam pembentukan torsi motor.

4.4 Analisis Kinerja Keseluruhan Berdasarkan Data Tuning dan Pengujian

Berdasarkan seluruh pengujian yang telah dilakukan, kinerja sistem penggerak motor BLDC berbasis *Field-Oriented Control* (FOC) dievaluasi berdasarkan kemampuan sistem dalam menghasilkan respons kecepatan motor, karakteristik arus sumbu-q I_q , karakteristik arus sumbu-d I_d , serta pengaruh parameter pengendali terhadap respons motor kiri dan kanan. Analisis keseluruhan dilakukan dengan menghubungkan hasil pengujian batas arus, tuning parameter K_p dan K_i , serta respons sistem pada beberapa setpoint kecepatan. Evaluasi tersebut digunakan untuk mengetahui sejauh mana

implementasi FOC pada controller hoverboard STM32F103RCT6 mampu mengendalikan kedua motor BLDC pada AGV forklift.

4.4.1 Analisis Respon Kecepatan

Berdasarkan hasil pengujian, kedua motor telah mampu memberikan respons terhadap perubahan setpoint yang diberikan. Perubahan nilai K_p dan K_i menghasilkan karakteristik respons yang berbeda, terutama pada nilai overshoot, RMSE, dan steady-state error. Kombinasi $K_p=0,02$ dan $K_i=0,05$ kemudian digunakan sebagai parameter akhir untuk pengujian lanjutan. Pemilihan parameter tersebut merupakan nilai berdasarkan respons keseluruhan sistem. Hal ini sesuai dengan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa pada beberapa kondisi motor mampu mendekati referensi, tetapi pada setpoint yang lebih tinggi masih ditemukan error yang cukup besar.

4.4.2 Analisis Arus I_q

Selain respons kecepatan, karakteristik arus I_q digunakan untuk mengevaluasi respons komponen arus sumbu-q selama motor bekerja. Pada sistem FOC, I_q merupakan komponen arus yang berkaitan dengan pembentukan torsi elektromagnetik motor. Oleh karena itu, perubahan I_q dapat digunakan untuk mengamati kebutuhan torsi motor ketika sistem mengalami perubahan kondisi operasi. Berdasarkan grafik pengujian, nilai I_q mengalami perubahan terutama ketika motor mulai bergerak dan melakukan penyesuaian terhadap setpoint. Ketika kebutuhan untuk mempercepat motor meningkat, nilai I_q juga mengalami peningkatan. Setelah kecepatan motor mendekati kondisi yang lebih stabil, kebutuhan arus dapat berubah mengikuti kondisi motor. Perbedaan nilai I_q antara motor kiri dan kanan menunjukkan bahwa kebutuhan arus kedua motor tidak selalu identik meskipun diberikan perintah kecepatan yang sama. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh perbedaan karakteristik motor, kondisi mekanik, sensor Hall, maupun beban pada masing-masing sisi.

4.4.3 Analisis Arus I_d

Hasil pengamatan arus I_d menunjukkan bahwa nilainya relatif kecil dan berada di sekitar 0 A selama pengujian. Kondisi ini berbeda dengan I_q yang menunjukkan perubahan lebih besar ketika motor memberikan respons terhadap perubahan kondisi operasi. Nilai I_d yang relatif kecil menunjukkan bahwa komponen arus pada sumbu-d tidak menjadi komponen dominan selama pengujian, sedangkan perubahan arus lebih

dominan terjadi pada sumbu-q. Karakteristik tersebut sesuai dengan implementasi FOC yang digunakan apabila referensi I_d ditetapkan mendekati 0 A. Dengan demikian, hasil pengamatan I_d dan I_q memberikan indikasi bahwa transformasi dan pengendalian arus pada koordinat d-q telah berjalan, walaupun performa tracking kecepatan masih membutuhkan penyempurnaan parameter pengendali