

Peningkatan Efisiensi Kontrol Motor Bldc Dengan Metode Six Step Berbasis Kontrol PID

^{1*}Moh Sohibur Rifky, ²Lukman Hakim, ³Fidya Eka Prahesti, ⁴M.dewi Manikta
puspitasari, ⁵Sofyan Ahmadi

^{1,2,3,4} Teknik Elektro, Universitas Nusantara PGRI Kediri
Rifkymaduraceg@gmail.com

Penulis Korespondens : Moh Sohibur Rifky

Abstrak—Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) merupakan jenis motor listrik yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri, otomasi, dan kendaraan listrik karena memiliki efisiensi tinggi, umur pakai yang panjang, serta kebutuhan perawatan yang rendah. Namun, performa motor BLDC dapat mengalami penurunan akibat ketidakstabilan kecepatan dan perubahan beban selama proses operasi. Metode penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental dengan merancang sistem kontrol motor BLDC menggunakan mikrokontroler ESP32, driver motor, sensor *Hall Effect* sebagai umpan balik kecepatan, serta algoritma PID sebagai pengendali utama. Parameter yang diamati meliputi kecepatan motor, error kecepatan, waktu respon, overshoot, dan efisiensi penggunaan daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan kontrol PID pada metode *Six Step* mampu meningkatkan kestabilan kecepatan motor dengan rata-rata error kurang dari 1%. Efisiensi sistem juga mengalami peningkatan dari 76,67% menjadi 85,00% atau meningkat sebesar 10,87%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *Six Step* berbasis kontrol PID efektif dalam meningkatkan efisiensi dan performa motor BLDC.

Kata Kunci —Motor BLDC, Six Step, PID, ESP32, Efisiensi, Kontrol Kecepatan.

Abstract *Brushless Direct Current (BLDC) motors are a type of electric motor widely used in various industrial applications, automation, and electric vehicles because they have high efficiency, long lifespan, and low maintenance requirements. However, BLDC motor performance can decrease due to speed instability and load changes during operation. The research method used is experimental, designing a BLDC motor control system using an ESP32 microcontroller, motor driver, Hall Effect sensor as speed feedback, and a PID algorithm as the main controller. The observed parameters included motor speed, speed error, response time, overshoot, and power usage efficiency. The results showed that applying PID control to the Six Step method could improve motor speed stability with an average error of less than 1%. System efficiency also increased from 76.67% to 85.00%, or an improvement of 10.87%. These results indicate that the PID-based Six Step method is effective in enhancing the efficiency and performance of BLDC motors.*

Keywords—BLDC Motor, Six Step, PID, ESP32, Efficiency, Speed Control.

This is an open access article under the CC BY-SA License.



I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi motor listrik semakin meningkat seiring kebutuhan sistem industri modern, kendaraan listrik, dan otomasi yang memerlukan motor dengan efisiensi tinggi, respon

cepat, serta konsumsi daya rendah. *Motor Brushless Direct Current* (BLDC) menjadi salah satu solusi utama karena memiliki keunggulan berupa efisiensi tinggi, torsi besar, umur pakai panjang, dan minim perawatan dibanding motor DC konvensional [1].

Penggunaan motor tidak lepas dari kemajuan teknologi. Motor BLDC merupakan jenis motor yang paling banyak digunakan karena kelebihan yang dimilikinya. Motor BLDC mempunyai efisiensi tinggi dan waktu operasi lama, hal ini disebabkan karena motor BLDC menggunakan komutasi elektrik. Desain pengaturan kecepatan motor BLDC dengan *Programmable Array Logic* sudah ada dengan menggunakan metode *six step commutation*. Desain tersebut menghasilkan sinyal tegangan tiga fasa yang berbentuk *trapezoid* untuk memutar motor dan dihasilkan kecepatan maksimum sebesar 116,8 rpm. Nilai arus akan meningkat dan tegangan akan menurun saat dilakukan pengujian dengan beban kecil [2].

Motor listrik banyak digunakan dalam aplikasi sehari-hari. Hanya saja motor listrik yang sering digunakan yaitu motor DC dan motor induksi. Keunggulan motor DC sendiri memiliki efisiensi yang tinggi, namun motor DC mempunyai kerugian yaitu masih menggunakan brush dalam komutasi yang mengakibatkan biaya perawatan yang mahal. Brush pada motor DC juga dapat mengalami kerusakan karena brush akan menimbulkan arching dalam proses komutasinya. Untuk memenuhi kebutuhan performa yang baik, torsi tinggi, kecepatan tinggi, dan biaya perawatan yang lebih murah maka mesin listrik yang cocok digunakan adalah motor *Brushless Direct Current* (BLDC)[3].

Inverter merupakan teknologi converter yang digunakan untuk mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). (Authoritative Dictionary of IEEE). AC yang dikonversi dapat menyesuaikan kebutuhan tegangan serta frekuensi dengan bantuan *transformator*, saklar, dan sirkuit kontrol yang tepat. Ada berbagai macam jenis inverter, jenis inverter yang banyak digunakan diantaranya adalah *six step* inverter. Aplikasi dari six-step inverter 3 fasa sendiri ini faktanya banyak digunakan di industri. Listrik 3 fasa merupakan listrik AC (alternating current) yang mempunyai 3 penghantar dimana ketiga penghantar tersebut memiliki tegangan sama namun setiap fasanya memiliki perbedaan 120° . Listrik 3 fasa sering disebut dengan system R-S-T. 3 fasa yang di simbolkan “R”, “S” , “T” untuk setiap penghantar pada setiap fasa dan simbol “N” pada penghantar netral. Inverter 3 fasa merupakan inverter dengan tegangan keluaran berupa tegangan bolak-balik (AC) 3 fasa yang berbentuk gelombang persegi. Rangkaian inverter 3 fasa tunggal sederhana terdiri dari 6 buah komponen switching yakni S1, S2, S3, S4, S5, S6 dan membutuhkan 6 sinyal PWM untuk dapat [4]

Kontrol PID merupakan sistem kendali konvensional yang umum digunakan untuk mengatur kecepatan motor DC berkat struktur sederhana dan kemudahan implementasinya. Pengendalian ini menggabungkan tiga parameter proportional, integral, dan derivative- untuk menghasilkan sinyal kontrol. Selain memiliki struktur yang sederhana dan mudah diimplementasikan, kontrol PID juga terbukti mampu memberikan kinerja yang baik dalam berbagai kondisi. Namun, pengendali PID memiliki keterbatasan, terutama dalam menangani sistem nonlinier dan perubahan parameter lingkungan[5].

Penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan karena hingga saat ini masih terdapat keterbatasan dalam penerapan Motor BLDC berupa efisiensi tinggi, torsi besar, umur pakai lebih lama, serta perawatan yang lebih rendah dibandingkan motor konvensional. Namun, dalam pengoperasiannya masih terdapat beberapa kendala seperti ketidakstabilan kecepatan, respon sistem yang kurang optimal, serta terjadinya rugi-rugi daya akibat metode pengendalian

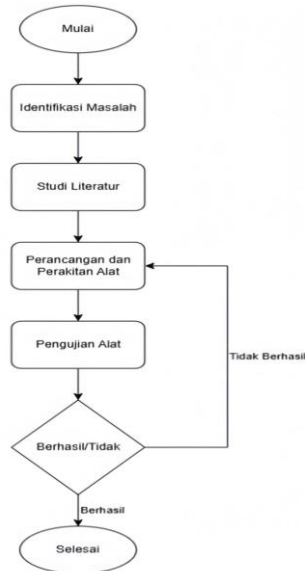
yang belum maksimal. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem kontrol yang mampu meningkatkan performa dan efisiensi kerja motor BLDC, penelitian ini diharapkan dapat menjadi solusi inovatif sekaligus referensi bagi pengembangan karena dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi sistem kendali motor listrik yang lebih hemat energi dan memiliki performa yang lebih baik. Selain itu, hasil penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan sistem penggerak pada kendaraan listrik dan industri modern yang saat ini terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan teknologi ramah lingkungan dan efisiensi energi.

Penelitian ini memiliki kelebihan di antaranya meningkatkan efisiensi kerja motor BLDC karena Penggunaan metode kontrol PID pada sistem komutasi Six Step dapat membantu menjaga kestabilan kecepatan motor sehingga energi yang digunakan menjadi lebih efisien. dan respon kecepatan lebih stabil karena Penambahan kontrol PID memungkinkan sistem untuk mengurangi error antara kecepatan aktual dan kecepatan yang diinginkan sehingga respon motor menjadi lebih cepat dan stabil.

Penelitian ini memiliki kekurangan di antaranya efisiensi masih lebih rendah dibandingkan metode FOC Walaupun terjadi peningkatan efisiensi, performa kontrol Six Step berbasis PID umumnya masih berada di bawah metode FOC terutama pada kecepatan rendah dan nilai parameter K_p , K_i , dan K_d harus ditentukan secara tepat. Jika tuning kurang optimal, sistem dapat mengalami overshoot, osilasi, atau respon yang lambat.

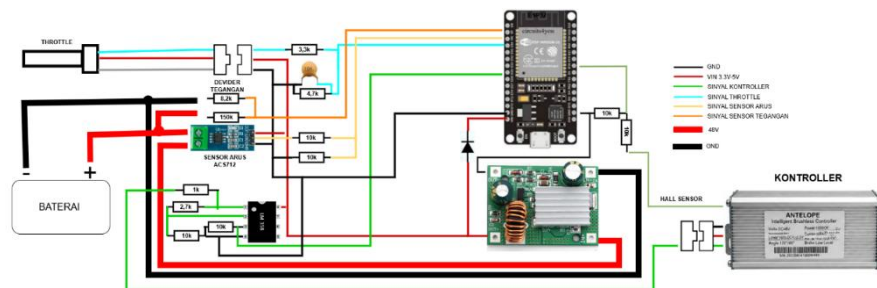
II. METODE

Penelitian yang berjudul Peningkatan Efisiensi Kontrol Motor BLDC dengan Metode *Six Step* Berbasis Kontrol PID menggunakan metode penelitian eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan meningkatkan efisiensi serta kinerja pengendalian kecepatan motor *Brushless Direct Current* (BLDC) melalui penerapan algoritma kontrol PID pada sistem komutasi Six Step. Metode eksperimen dipilih karena memungkinkan peneliti melakukan pengujian secara langsung terhadap sistem yang dirancang, sehingga dapat diketahui pengaruh penerapan kontrol PID terhadap performa motor BLDC berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengukuran.



Gambar 1. *Flowchart* Alur Pengembangan Sistem

Gambar 1 merupakan Flowchart Alur Pengembangan, Desain pengembangan ini menggunakan sistem perancangan sudut pandang logika operasional sistem melalui blok diagram, serta detail koneksi antar elemen yang menggunakan wiring diagram. Tujuan dari tahap ini adalah untuk menjelaskan bagaimana keseluruhan sistem dirancang, baik dalam hal fungsi maupun aspek teknis. Blok diagram pengembangan alat Peningkatan Efisiensi Kontrol Motor Bldc Dengan Metode *Six Step* Berbasis Kontrol Pid [6].



Gambar 2. Wiring Diagram

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi kontrol Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) menggunakan metode komutasi *Six Step* yang dikombinasikan dengan kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID). Sistem dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama, driver motor BLDC, sensor *Hall Effect* sebagai umpan balik kecepatan, serta algoritma PID untuk mengatur duty cycle PWM yang diberikan ke motor. Pengujian dilakukan pada berbagai kondisi beban dan setpoint kecepatan untuk mengetahui performa sistem kontrol yang telah dirancang [7].

Hasil implementasi menunjukkan bahwa metode Six Step mampu mengendalikan proses komutasi motor dengan baik berdasarkan sinyal posisi rotor yang diperoleh dari *sensor Hall Effect* [8]. Penambahan kontrol PID memungkinkan kecepatan motor tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban. Sistem mampu mencapai setpoint dengan waktu respon yang lebih cepat dibandingkan kontrol tanpa PID.



Gambar 3. Peningkatan Efisiensi Kontrol Motor Bldc Dengan Metode Six Step Berbasis Kontrol Pid

Pengujian alat ini bertujuan untuk memvalidasi apakah sistem yang dirancang dapat berjalan sesuai ekspektasi serta mampu menjaga kestabilan efisiensi daya pada motor listrik. Data hasil pengujian sistem pada sepeda listrik secara lengkap disajikan pada Tabel 1, berikut table hasil uji :

Tabel 1. Hasil pengujian data sepeda listrik

NO	TEGANGAN DINAMIS (V)	TEGANGAN STATIS(V)	ARUS DINAMIS 50 KG (A)	ARUS DINAMIS 100 KG (A)	ARUS STATIS (A)
1	54,70	54,70	3,0	5	0,52
2	54,62	54,69	3,5	5,4	0,51
3	54,53	54,69	3,8	5,6	0,54
4	54,45	54,68	4,0	5,9	0,52
5	54,36	54,68	4,2	6,2	0,51
6	54,28	54,67	4,5	6,5	0,53
7	54,20	54,67	4,8	6,7	0,52
8	54,11	54,66	5	7	0,51
9	54,03	54,66	3,8	5,4	0,53
10	53,94	54,65	4	5,6	0,52
11	53,86	54,65	4,2	5,9	0,54
12	53,78	54,64	4,5	6,2	0,52
13	53,69	54,64	4,8	6,5	0,51
14	53,61	54,63	5	6,7	0,54
15	53,52	54,62	4	7	0,53
16	53,44	54,62	4,2	5,6	0,51
17	53,36	54,61	4,5	5,9	0,53
18	53,27	54,61	4,8	6,2	0,52
19	53,19	54,60	5	6,5	0,51
20	53,10	54,60	4,2	6,7	0,53

NO	TEGANGAN DINAMIS (V)	TEGANGAN STATIS(V)	ARUS DINAMIS 50 KG (A)	ARUS DINAMIS 100 KG (A)	ARUS STATIS (A)
21	53,02	54,59	4,5	7	0,52
22	52,94	54,59	4,8	5,4	0,54
23	52,85	54,58	5	5,6	0,53
24	52,77	54,58	4,2	5,9	0,51
25	52,68	54,57	4,5	6,2	0,53
26	52,60	54,57	4,8	6,5	0,52
27	52,52	54,56	5	6,7	0,51
28	52,43	54,55	4,2	7	0,52
29	52,35	54,55	4,5	5,9	0,54
30	52,26	54,54	4,8	6,2	0,53
31	52,18	54,54	5	6,5	0,51
32	52,10	54,53	4,5	6,7	0,53
33	52,01	54,53	4,8	7	0,52
34	51,93	54,52	5	5,4	0,51
35	51,84	54,52	4,2	5,6	0,52
36	51,76	54,51	4,5	5,9	0,51
37	51,68	54,51	4,8	6,2	0,52
38	51,59	54,50	5	6,5	0,54
39	51,51	54,49	5	6,7	0,53
40	51,42	54,49	4,2	7	0,51
41	51,34	54,48	4,5	5,9	0,53
42	51,26	54,48	4,8	6,2	0,52
43	51,17	54,47	5	6,5	0,54
44	51,09	54,47	4,5	6,7	0,53
45	51,00	54,46	4,8	7	0,51
46	50,92	54,46	5	5,4	0,53
47	50,84	54,45	4,5	5,6	0,52
48	50,75	54,45	4,8	5,9	0,51
49	50,67	54,44	5	6,2	0,52
50	50,58	54,44	4,2	6,5	0,51
51	50,50	54,43	4,5	6,7	0,53
52	50,42	54,42	4,8	7	0,51
53	50,33	54,42	5	6,2	0,53
54	50,25	54,41	4,8	6,5	0,52
55	50,16	54,41	5	6,7	0,54
56	50,08	54,40	4,5	7	0,53
57	50,00	54,40	4,8	5,4	0,51
58	49,91	54,39	5	5,6	0,53
59	49,83	54,39	4,2	5,9	0,52
60	49,74	54,38	4,5	6,2	0,51
61	49,66	54,38	4,8	6,5	0,53

NO	TEGANGAN DINAMIS (V)	TEGANGAN STATIS(V)	ARUS DINAMIS 50 KG (A)	ARUS DINAMIS 100 KG (A)	ARUS STATIS (A)
62	49,58	54,37	5	6,7	0,51
63	49,49	54,37	5	7	0,53
64	49,41	54,36	4,5	6,5	0,52
65	49,32	54,35	4,8	6,7	0,54
66	49,24	54,35	5	7	0,53
67	49,16	54,34	4,2	5,4	0,51
68	49,07	54,34	4,5	5,6	0,53
69	48,99	54,33	4,8	5,9	0,52
70	48,90	54,33	5	6,2	0,51
71	48,82	54,32	3,5	6,5	0,53
72	48,74	54,32	3,8	6,7	0,51
73	48,65	54,31	4	7	0,53
74	48,57	54,31	4,2	6,7	0,52
75	48,48	54,30	4,5	7	0,54
76	48,40	54,29	4,8	5,4	0,51
77	48,32	54,29	5	5,6	0,53
78	48,23	54,28	3,8	5,9	0,51
79	48,15	54,28	4	6,2	0,53
80	48,06	54,27	3,5	6,5	0,52
81	47,98	54,27	3,8	6,7	0,54
82	47,90	54,26	4	7	0,52
83	47,81	54,26	4,2	5,4	0,54
84	47,73	54,25	4,5	5,6	0,51
85	47,64	54,25	4,8	5,9	0,53
86	47,56	54,24	5	6,2	0,51
87	47,48	54,24	3,8	6,5	0,53
88	47,39	54,23	4	6,7	0,52
89	47,31	54,22	3,8	7	0,54
90	47,22	54,22	4	5,6	0,52
91	47,14	54,21	4,2	5,9	0,54
92	47,06	54,21	4,5	6,2	0,51
93	46,97	54,20	4,8	5,6	0,53
94	46,89	54,20	5	5,9	0,51
95	46,80	54,19	3,8	6,2	0,53
96	46,72	54,19	4	6,5	0,52
97	46,64	54,18	4,2	6,7	0,53
98	46,55	54,18	4,5	7	0,51
99	46,47	54,17	4,8	5,6	0,53
100	46,38	54,17	5	5,9	0,52

Pengujian alat dilakukan sebanyak 100 kali pengambilan data untuk mengetahui kinerja sistem, stabilitas tegangan, serta efisiensi konsumsi arus listrik pada motor penggerak dalam dua

kondisi beban yang berbeda, yaitu beban 50 kg dan beban 100 kg. Data lengkap pengujian disajikan pada Tabel 1. Berdasarkan data yang diperoleh, dilakukan analisis mendalam mengenai hubungan antara tegangan (statis dan dinamis) serta pengaruh penambahan beban terhadap arus listrik yang mengalir pada sistem. Pertama analisis Karakteristik Penurunan Tegangan (*Voltage Drop*) [9] Tegangan merupakan indikator utama kapasitas energi yang tersisa pada baterai serta respons sistem terhadap beban. Dari data pengujian, terdapat perbedaan perilaku yang signifikan antara Tegangan Statis dan Tegangan Dinamis: Tegangan Statis (Kondisi Tanpa Beban/Diam): Tegangan statis menunjukkan grafik penurunan yang sangat stabil dan linier, dimulai dari 54,70V pada pengujian pertama hingga mencapai 54,17V pada pengujian ke-100. Penurunan total hanya sebesar 0,53V Hal ini menandakan bahwa sistem manajemen baterai mampu mempertahankan stabilitas tegangannya dengan sangat baik ketika tidak diberi beban dinamis. Tegangan Dinamis (Kondisi Berjalan): Tegangan dinamis mengalami penurunan yang jauh lebih drastis seiring dengan meningkatnya durasi atau jumlah pengujian. Tegangan awal tercatat sebesar 54,70V dan merosot hingga 46,38V di akhir pengujian (mengalami penurunan sebesar 8,32V. Fenomena selisih antara tegangan statis dan dinamis ini dikenal sebagai *voltage drop* (jatuh tegangan). Jatuh tegangan terjadi akibat adanya resistansi internal baterai serta hambatan dalam sirkuit saat motor listrik menarik arus besar untuk menggerakkan beban. Kedua terdapat Pengaruh Beban (50 KG vs 100 KG) Terhadap Arus Dinamis

Beban mekanis yang diberikan pada sepeda listrik berbanding lurus dengan kebutuhan torsi pada motor. Untuk menghasilkan torsi yang lebih besar, motor listrik secara otomatis akan menarik arus listrik (I) yang lebih besar dari baterai. Kondisi Beban 50 KG: Pada fluktuasi beban ini, arus dinamis bergerak di kisaran rata-rata 3,0A hingga 5,0A. Motor bekerja relatif ringan sehingga konsumsi daya tidak terlalu menguras energi baterai secara ekstrem. Kondisi Beban 100 KG: Ketika beban dilipatgandakan menjadi 100 kg, kebutuhan arus dinamis melonjak secara signifikan ke kisaran 5,4A hingga 7,0A. Peningkatan beban sebesar 100% (dari 50 kg ke 100 kg) menyebabkan lonjakan penarikan arus rata-rata sekitar 40-80%. Hal ini membuktikan bahwa efisiensi daya sepeda listrik sangat dipengaruhi oleh bobot pengendara/beban yang diangkut. Semakin berat beban, semakin besar daya nyata $P = V \cdot I$ yang dikeluarkan baterai, yang berimplikasi pada percepatan habisnya kapasitas baterai. Terakhir yaitu Analisis Arus Statis [10] (Kondisi Standby/Idle) Arus statis diukur untuk mengetahui konsumsi daya *baseline* sistem saat alat dalam kondisi aktif namun sepeda tidak berjalan (kondisi *standby*). Berdasarkan data 1 hingga 100, arus statis menunjukkan nilai yang sangat stabil dan konsisten pada rentang 0,51A hingga 0,54A. Konsumsi arus yang rendah dan stabil ini mengindikasikan bahwa komponen kontroler, sensor, maupun sistem monitoring yang dibuat tidak mengalami kebocoran arus (*current leakage*) yang berarti. Alat mampu menjaga efisiensi daya saat dalam posisi diam atau tidak digunakan berjalan.

Tabel 2. Hasil Pengujian Respon Sistem analog dan digital

Parameter	Tanpa PID (s)	Dengan PID (s)
<i>Rise Time</i>	2,4 s	1,1 s
<i>Settling Time</i>	3,8 s	1,8 s
<i>Overshoot</i>	15%	4%

<i>Steady State Error</i>	5,20%	0,80%
---------------------------	-------	-------

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan kontrol PID memberikan peningkatan performa yang signifikan. Rise time dan settling time menjadi lebih cepat, *overshoot* berkurang, serta *steady-state error* menjadi lebih kecil. Dengan demikian, motor mampu mencapai kondisi stabil dalam waktu yang lebih singkat.

Tabel 3. Perbandingan Efisiensi Sistem

Metode Kontrol	Daya Masukan (W)	Daya Keluaran (W)	Efisiensi (%)
Six Step Tanpa PID	120	92	76,67
Six Step + PID	120	102	85

Efisiensi sistem motor BLDC dihitung menggunakan perbandingan antara daya keluaran (output) dengan daya masukan (input) yang dinyatakan dalam persen (%).

Keterangan:

- η = Efisiensi sistem (%)
- P_{out} = Daya keluaran motor (Watt)
- P_{in} = Daya masukan sistem (Watt)

1. Perhitungan Efisiensi Metode Six Step Tanpa PID

Diketahui:

- Daya masukan (P_{in}) = 120 Watt
- Daya keluaran (P_{out}) = 92 Watt

Substitusi ke dalam rumus:

Hasil perhitungan:

$$\eta = 76,67\%$$

2. Perhitungan Efisiensi Metode Six Step dengan PID

Diketahui:

- Daya masukan (P_{in}) = 120 Watt
- Daya keluaran (P_{out}) = 102 Watt

Substitusi ke dalam rumus:

Hasil perhitungan:

$$\eta = 85,00\%$$

$$\eta = \frac{85 - 6,67}{76,67} \times 100\%$$

Dari hasil pengujian diperoleh peningkatan efisiensi sekitar **10,87%** dibandingkan sistem tanpa PID.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai Peningkatan Efisiensi Kontrol Motor BLDC dengan Metode *Six Step* Berbasis Kontrol PID, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode Six Step yang dikombinasikan dengan kontrol PID mampu meningkatkan performa dan efisiensi kerja motor BLDC. Sistem yang dirancang berhasil mengendalikan kecepatan motor secara lebih stabil dengan tingkat kesalahan (error) yang rendah terhadap nilai

setpoint yang diberikan penggunaan kontrol PID terbukti mampu memperbaiki karakteristik respon sistem, ditunjukkan dengan waktu respon yang lebih cepat, overshoot yang lebih kecil, serta nilai steady-state error yang lebih rendah dibandingkan metode *Six Step* tanpa PID. Selain itu, kontrol PID dapat mempertahankan kestabilan putaran motor ketika terjadi perubahan beban, sehingga kinerja motor menjadi lebih optimal. Hasil pengujian juga menunjukkan adanya peningkatan efisiensi penggunaan daya listrik pada motor BLDC. Efisiensi sistem meningkat karena kontrol PID mampu mengatur sinyal PWM secara lebih tepat sesuai kebutuhan motor, sehingga rugi-rugi energi dapat diminimalkan. Dengan demikian, metode *Six Step* berbasis kontrol PID dapat dijadikan sebagai solusi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi, kestabilan, dan akurasi kontrol kecepatan motor BLDC pada berbagai aplikasi industri dan sistem otomasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Anugrah, R. F., P.K, I. D., & Dewantara, B. Y. (2020). *Kontrol Motor Brushless DC Menggunakan Six Step Comutation dengan Kontrol PID (Proportional Integral Derivative)*. 7(2).
- [2] Diono, Pratama, Y. R., & Kurniawan, B. (2025). *Perbandingan metode PID dan Fuzzy Logic Control dalam sinkronisasi dua motor DC*. 17(2), 97–108.
- [3] Jati, B. P., & Hapsari, J. P. (2022). *ESC Fullbridge 3 Fasa Motor BLDC Berdaya Besar Menggunakan Kontroler Arduino*. 5(02), 2–7.
- [4] Prawesti, R. D., & Pracoyo, A. (2021). *Rancang Bangun Six-Step Inverter 3 Fasa Sebagai Modul Pembelajaran Elektronika Daya*. 8(9).
- [5] Rusli, M. R., Jati, M. P., Ari, M., Nugroho, B., & Asrarul, O. (2022). *BLDC Motor Drives with A Programmable Simplified C-Block to Generate Accurate Six-Step PWM Based on STM32 Microcontroller*. 7(November), 112–118.
- [6] Satira, I. K., & Maffira, I. (2022). *Rancang Bangun Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC dengan Kontrol Propotional, Integral, and Derivative (PID) berbasis Arduino* (Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Ujung Pandang).
- [7] Aziz, M. A., & Tindyo Prasetyo, S. T. (2021). *Analisis Performa Pid pada Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- [8] Prahesti, F. E., Asfani, D. A., Negara, I. M. Y., & Dewantara, B. Y. (2020, July). Three-phase induction motor short circuit stator detection using an external flux sensor. In *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)* (pp. 375-380). IEEE.
- [9] Ahmadi, S., Indrawati, E. M., Maulidina, M., Prasetyo, K. R. T., Puspitasari, M. D. M., Prahesti, F. E., ... & Suwardono, A. (2023, October). The Vessel Design for Magnetohydrodynamics Based on the Atmega 8535 Microcontroller. In *2023 1st International Conference on Advanced Engineering and Technologies (ICONNIC)* (pp. 180-184). IEEE.
- [10] Prahesti, F. E., Indrawati, E. M., Delfianti, R., & Ukhti, V. A. (2023). Protection Coordination Analysis Study Considering The Arcflash In The Electrical System Of PLTU Paiton Unit III Using IEEE Standard 1584-2002. *Jurnal Edukasi Elektro*, 7(2), 121-132.