

## Alat Penstabil Kecepatan Motor BLDC Menggunakan Kontrol PID

Sutedjo, Bening Putri Permata Putih\*, Ony Asrarul Qudsi, Luki Septya Mahendra

Jurusan Teknik Elektro Industri, Departemen Teknik Elektro – Politeknik Elektronika Negeri Surabaya  
Surabaya, Indonesia

\*beningputripp@gmail.com

**Abstract**— Human needs for energy are increasing day by day, but over time the availability of fossil fuels such as oil, natural gas, and coal is decreasing day by day. The decreasing availability of fossil fuels is caused by the use of vehicles as a means of transportation. Electric vehicles are an alternative when the availability of fossil fuels is decreasing. There are various types of motors that can be used in electric vehicles, and one of them is the Brushless Direct Current (BLDC) motor which has many advantages when compared to other motors. In this final project, the speed control of the BLDC motor uses six step communication with PID control, in which the six step communication circuit is used to change the DC source voltage to 3 phase AC. And the use of PID control is to accelerate the process towards steady state from the speed of the BLDC motor, as well as to stabilize the rotation speed at a set point using a standard speed in the city of 30 km/hour or 500 RPM. However, this final project will focus more on the response of the BLDC motor to the PID control given with  $K_p = 4.9505$ ,  $K_i = 0.266156$ ,  $K_d = 18.4158$ . And the results show that the speed of the BLDC motor can be stable below the set point value of 498 RPM. Then a braking is also carried out to show the PID control is working properly, and for braking it can reduce the motor speed to 498 RPM.

**Abstrak**— Kebutuhan manusia akan energi semakin hari semakin meningkat, namun seiring perkembangan zaman ketersediaan bahan bakar fosil seperti minyak, gas alam, dan batu bara semakin hari semakin menurun. Ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin menurun ini diakibatkan oleh penggunaan kendaraan sebagai alat transportasi. Kendaraan listrik merupakan sebuah alternatif di saat ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin menurun. Terdapat berbagai jenis motor yang bisa digunakan pada kendaraan listrik, dan salah satunya yaitu motor *Brushless Direct Current* (BLDC) yang memiliki banyak kelebihan jika di bandingkan dengan motor lainnya. Pada Tugas Akhir kali ini kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan six step communication dengan kontrol PID, yang mana rangkaian six step communication ini digunakan untuk mengubah tegangan sumber DC ke AC 3 fasa. Dan digunakannya kontrol PID ini untuk mempercepat proses menuju *steady state* dari kecepatan motor BLDC, serta menstabilkan kecepatan putaran secara dengan *set point* menggunakan kecepatan standar dalam kota sebesar 30 km/jam atau sebesar 500 RPM. Namun, pada penelitian ini akan lebih fokus pada respons motor BLDC terhadap kontrol PID yang diberikan dengan  $K_p = 4.9505$ ,  $K_i = 0.266156$ ,  $K_d = 18.4158$ . Dan hasil menunjukkan bahwa kecepatan motor BLDC bisa stabil di bawah nilai *set point* yaitu 498 RPM. Kemudian dilakukan juga sebuah pengereman untuk memperlihatkan kontrol PID sudah bekerja dengan baik, dan untuk pengereman bisa menurunkan kecepatan motor hingga 498 RPM.

**Kata Kunci**— Motor BLDC; electric vehicles; Six Step Communication; Kontrol PID; 3 phase AC

### I. PENDAHULUAN

**B**AHAN bakar fosil saat ini hari demi hari semakin menipis sehingga banyak para ahli yang terus menerus meneliti mengenai kendaraan berbasis tenaga listrik seperti mobil listrik. Mobil listrik merupakan sebuah alternatif disaat ketersediaan bahan bakar fosil yang semakin menurun. Selain itu, dengan adanya mobil listrik juga bisa menjadi pengganti mobil sehari-hari yang menggunakan bahan bakar energi minyak bumi

yang dapat menyebabkan sumber daya alam berupa minyak terus mengalami pengurangan. Mobil listrik ini memiliki keunggulan yaitu sangat ramah lingkungan. Mobil listrik juga tidak menimbulkan polusi pada lingkungan, serta tidak perlu menggunakan BBM sebagai sumbernya.

Saat ini, mobil listrik banyak di kembangkan serta diciptakan oleh pabrik pabrik mobil di luar negeri. Selain itu, di luar negeri bahkan mayoritas masyarakatnya menggunakan mobil listrik sebagai alat transportasi sehari hari, seperti salah satunya yaitu negara Amerika Serikat yang memiliki nilai penjualan mobil listrik yang terus menerus melonjak di tiap tahunnya. Mobil listrik tentunya akan dikombinasikan dengan berbagai

**Naskah diterima** 1 Agustus 2022, diterima setelah revisi 11 Agustus 2022, terbit online 2 September 2022. Emitor merupakan jurnal Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Surakarta yang terakreditasi Sinta 4 dengan alamat Gedung H Lantai 2 UMS, Jalan Ahmad Yani Tromol Pos 1 Surakarta Indonesia 57165.

macam komponen yang memiliki peran dalam beragam penggunaan, salah satunya adalah penggunaan metode PID untuk mengendalikan kecepatan motor listrik pada mobil listrik agar mendapatkan kriteria performa yang tepat. Pada awalnya banyak yang menggunakan motor DC sebagai penggerak, namun setelah teknologi kontrol vektor, beberapa pabrik menggunakan motor induksi sebagai penggerak. Dan seiring berkembangnya teknologi mengatakan bahwa motor *Brushless Direct Current* (BLDC) memiliki banyak kelebihan jika dibandingkan dengan motor lainnya jika digunakan untuk mobil listrik [1]. Alasan dari penggunaan motor BLDC ini yaitu karena memiliki nilai torsi dan efisiensi yang cukup baik, biaya perawatan yang tidak mahal, serta respons kecepatan yang dinamik [2].

Pada penelitian ini dipilih menggunakan motor *Brushless Direct Current* (BLDC) karena motor BLDC sendiri dapat beroperasi dengan kecepatan yang cukup tinggi sehingga sangat cocok digunakan pada mobil listrik [3–7]. Oleh karena itu dalam penelitian ini, akan dibahas mengenai rancangan sistem penstabil kecepatan pada mobil listrik dengan menggunakan kontrol PID [8]. Menggunakan kontrol PID ini untuk mempercepat proses menuju *steady state* dari kecepatan motor BLDC, serta menstabilkan kecepatan putaran secara otomatis [9–12]. Kemudian pada sistem kali ini akan diberikan 1 nilai *set point* sebagai kecepatan dari mobil listrik yaitu sebesar 30 km/jam. Yang mana, kecepatan di *setting* dalam 1 nilai *set point* bertujuan untuk menghemat energi dari mobil listrik.

Mobil Hemat Energi akan berjalan stabil di lintasan jalur yang halus, namun jika dilakukan pada medan yang berkerikil akan beresiko yang cukup buruk terhadap alat. Hal ini karena kecepatan dari mobil listrik yang tetap stabil di nilai *set point* yang diberikan. Dan pada penelitian ini terdapat beberapa kendala yang menyebabkan pengujian tidak dilakukan hingga ke pembebanan menggunakan mobil listrik. Sehingga penelitian fokus pada respons dari motor BLDC terhadap kontrol PID yang diberikan [13].

## II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan motor *brushless dc* (BLDC) yang digerakan oleh rangkaian daya berupa inverter tiga fase dengan menggunakan kontrol PID.

### i. Motor Brushless Direct Current (BLDC)

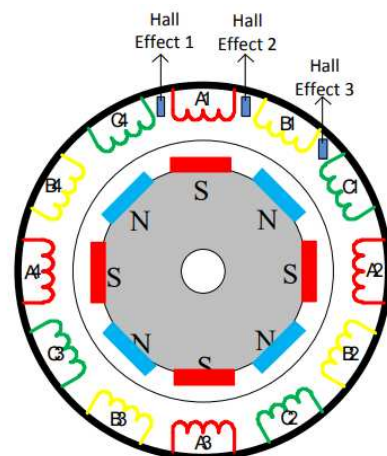
Motor BLDC adalah motor listrik tiga fase yang sumbuernya menggunakan tegangan DC. Seperti motor listrik pada umumnya, motor BLDC juga terdiri dari ba-

gian rotor dan stator. Pada bagian rotor motor BLDC terdapat sebuah permanen magnet yang memiliki kutub yang tetap. Dan pada bagian stator motor BLDC terdapat sebuah belitan yang dapat berubah kutub tergantung dari arus yang diberikan. Pada motor BLDC ini tidak menggunakan *brush* dan komutator yang menyebabkan motor BLDC tidak membutuhkan perawatan yang mahal.

Pada motor BLDC ini terdapat sebuah *hall effect* sensor yang berguna untuk menentukan komutasi motor BLDC dan menentukan kecepatan yang konstan. Pada *hall effect* sensor ini, saat mendeteksi kutub selatan (S) maka akan memberikan keluaran “0” dan saat mendeteksi kutub utara (N) maka akan memberikan keluaran “1”. Dengan diberikannya arus 3 fase ini, maka medan magnet dan polaritas akan terus berubah ubah. Putaran dari motor BLDC akan terjadi saat adanya medan magnet antara rotor dan stator [14]. Tiap kumparan pada stator akan terjadi medan putar magnet dengan kecepatan yang dapat dihitung dalam Persamaan 1 berikut.

$$N_s = \frac{120f}{p} \quad (1)$$

dengan:  $f$  adalah frekuensi tegangan input (Hz/s),  $p$  adalah jumlah kutub (pole), dan  $120 = 360^\circ$  (1 putaran): 3 fase motor.



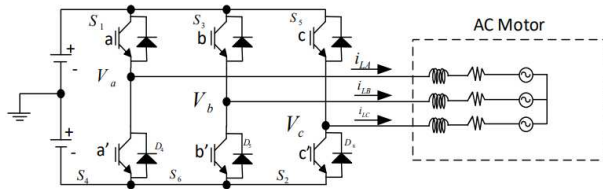
Gambar 1: Kontruksi Motor BLDC

### ii. Inverter 3 fase

Untuk menggerakkan motor BLDC diperlukan sebuah inverter 3 fase. Inverter 3 fase ini memiliki peranan untuk menggantikan sikat pada motor DC. Sehingga dengan adanya inverter 3 fase ini tidak perlu dilakukan perawatan pada sikat dan komutator motor BLDC.

Pada inverter 3 fase ini akan mengalirkan arus untuk menghasilkan kutub utara dan kutub selatan.

Inverter merupakan sebuah rangkaian yang berfungsi untuk mengubah arus dan tegangan DC menjadi arus dan tegangan AC. Pada inverter tiga fase yang digunakan untuk motor BLDC ini membutuhkan 6 komponen *switching* yang akan disusun seperti Gambar 2.



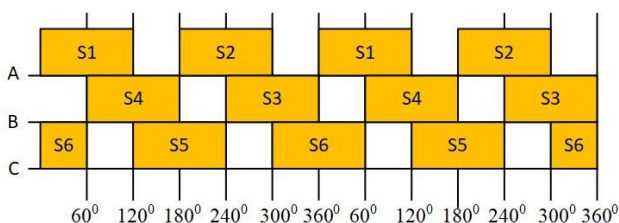
**Gambar 2:** Rangkaian Inverter 3 fase

Pada inverter 3 fase akan terdapat enam *switch* yang dapat diatur kondisi ON dan OFF. Pada inverter 3 fase kali ini akan digunakan IGBT sebagai *switching*, yang mana tiap satu buah IGBT terdapat dua *switch* di dalamnya. Oleh karena itu pada inverter 3 fase kali ini akan digunakan tiga buah IGBT seperti terlihat dalam Tabel 1.

**Tabel 1:** Konfigurasi Inverter 3 fase

$S_6$	$S_5$	$S_4$	$S_3$	$S_2$	$S_1$	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$
1	0	0	1	0	0	0	$V_{dc}$	$-V_{dc}$
1	0	0	0	0	1	$V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
0	0	1	0	0	1	$V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
0	1	1	0	0	0	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$
0	1	0	0	1	0	$-V_{dc}$	0	$V_{dc}$
0	0	0	1	1	0	$-V_{dc}$	$V_{dc}$	0

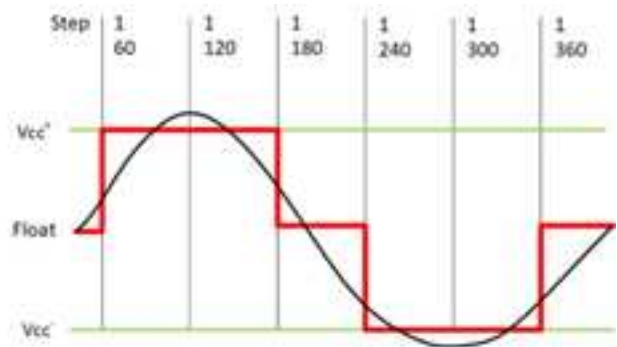
Dari enam macam konfigurasi konfigurasi *switching* dari inverter yang dilakukan terus menerus secara berulang maka akan menghasilkan rasio putaran  $360^\circ$  [15]. Pada Gambar 3 merupakan penjelasan sinyal *switching* dengan komutasi sebesar  $120^\circ$ . Pada komutasi  $120^\circ$  ini, akan terdapat 2 sinyal yang masuk ke tiap fase secara bergantian [16].



**Gambar 3:** Gelombang Komutasi  $120^\circ$

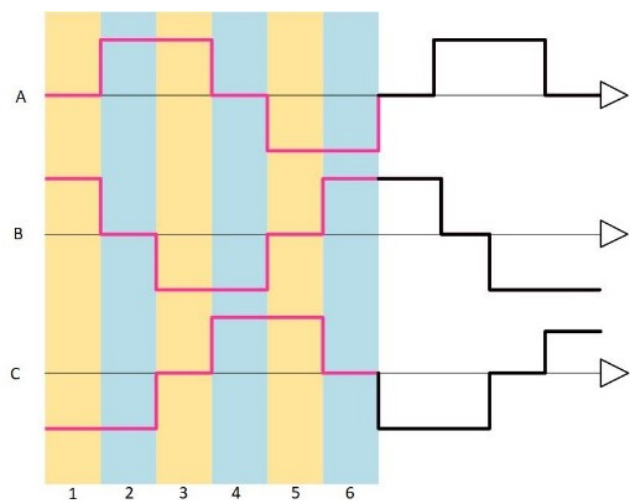
iii. *Komutasi Six Step*

Komutasi *six step* ini banyak digunakan dalam mengendalikan motor BLDC [16, 17]. Metode *six step* ini bisa menghasilkan gelombang trapezoid atau gelombang *square* yang mirip dengan gelombang sinusoidal. Pada metode komutasi *six step* ini memiliki beberapa kelemahan seperti memiliki arus rms yang tinggi, rugi tugi daya yang tinggi, dan bising [18]. Hal ini terjadi karena PWM yang digunakan dalam metode ini merupakan PWM *square* dengan frekuensi tertentu sehingga menciptakan gelombang AC yang berbentuk trapezoid atau gelombang *square* [19]. Dengan menggunakan PWM yang terdiri dari 2 di bagian positif, 2 di bagian negatif, dan 2 bagian berpotongan dengan titik 0 yang bagian memiliki besar  $60^\circ$  gelombang sinusoida [20]. Untuk algoritme PWM *six step* ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4:** Algoritma PWM six-step

Dengan menggunakan tiga algoritme *six step* dengan beda 1 step  $60^\circ$  antara satu dengan yang lain maka akan menghasilkan gelombang gelombang *square* 3 fase. Untuk algoritme PWM *six step* 3 fase ditunjukkan pada Gambar 5 [19].



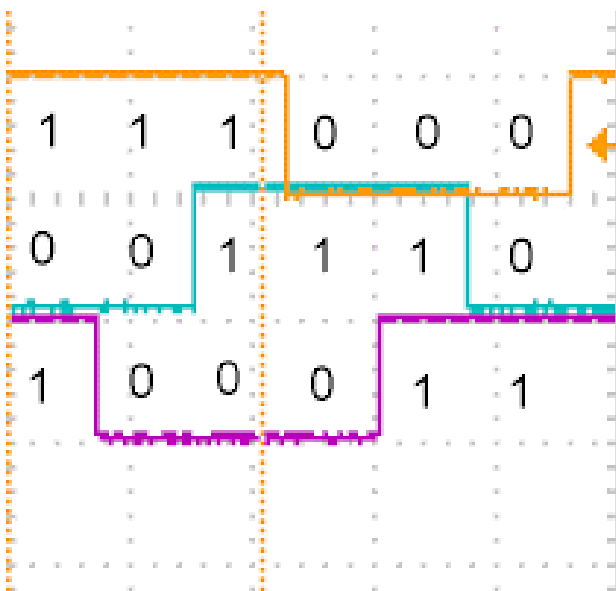
**Gambar 5:** Algoritma PWM Six-step 3 fase

## iv. Hall Sensor

Hall sensor merupakan sebuah sensor pada motor BLDC yang mendeteksi posisi dari rotor yang berfungsi untuk menjadi sebuah sensor kecepatan. Hall sensor ini dapat mengubah informasi magnetik menjadi sinyal listrik. Hall Sensor pada dasarnya terdiri dari potongan tipis semikonduktor yang bertipe P dengan bentuk persegi panjang. Ketika didekatkan dengan medan magnet atau ditempatkan pada lokasi yang memiliki medan magnet, maka akan timbul perbedaan potensial yang kemudian akan dikirimkan menjadi sinyal listrik. Dengan menggunakan metode  $120^\circ$ , akan tercipta 6 pola *switching* pada inverter 3 fase. Dari grafik Gambar 6 akan kita lihat pola grafik  $120^\circ$  yang dihasilkan oleh hall sensor.

Tabel 2: Pola Hall Sensor

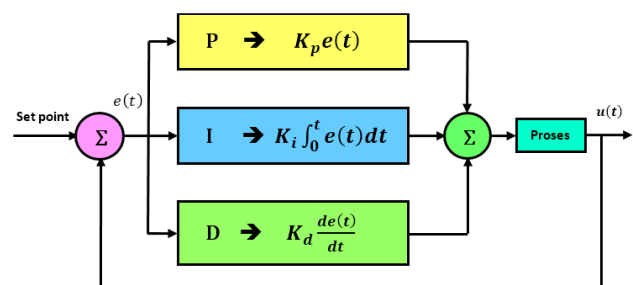
Pola	Hall A	Hall B	Hall C
1	1	0	0
2	1	1	0
3	0	1	0
4	0	1	1
5	0	0	1
6	1	0	1

Gambar 6: Skema pola hall sensor  $120^\circ$ 

Dari grafik digital yang dihasilkan oleh hall sensor, Berdasarkan data diatas maka dapat disimpulkan menggunakan digital 0 dan 1, sehingga pola hall sensor yang terjadi seperti pada Tabel 2.

## v. Kontrol PID

Dalam kontrol PID ini setiap kontrol memiliki keunggulan masing masing, dimana untuk kontrol proporsional sendiri memiliki keunggulan dalam mengontrol *rise-time* dengan cepat, kemudian untuk kontrol integral sendiri memiliki peranan keunggulan *steady state error*, dan untuk kontrol turunan memiliki keunggulan dalam meredam *overshoot*. Dengan menggunakan kontrol PID maka *overshoot* bisa diredam dengan baik. Selain itu, dengan digunakannya kontrol PID ini juga bisa mempercepat *rise time* dan juga mengurangi nilai *steady state error* untuk mencapai nilai *set point* yang diberikan.



Gambar 7: Kendali PID

Dalam sistem kontrol PID kali ini yang perlu dilakukan yaitu melakukan pengaturan parameter nilai  $K_p$ , parameter nilai  $K_i$ , dan parameter nilai  $K_d$  untuk mendapatkan nilai output sesuai dengan yang diinginkan. Untuk gambar kendali PID ditunjukkan pada Gambar 8. Berikut ini respons sistem Kontrol Proporsional – Integral – Derivatif yang ditunjukkan dalam Tabel 3 berikut.

## III. HASIL PENELITIAN DAN DISKUSI

## i. Pengujian Open Loop

Pengujian rangkaian kontrol motor BLDC secara *open loop* ini sama dengan dilakukan pengujian inverter 3 fase dengan beban motor BLDC. Pengujian kali ini dilakukan dengan cara memberikan tegangan masukan yang bertahap semakin tinggi dengan nilai *duty cycle* tetap. Saat pengujian dilakukan, beberapa data yang diambil berupa tegangan input inverter 3 Fase, RPM yang tertampil di LCD, dan juga RPM yang terukur dengan menggunakan alat ukur berupa tachometer, serta nilai persentase error pembacaan nilai RPM. Berikut ini lampiran tabel data hasil pengujian pada Tabel 4 berikut.

Dari data pada Tabel 4 dapat dilihat respons kecepatan putar motor BLDC saat tegangan input inverter

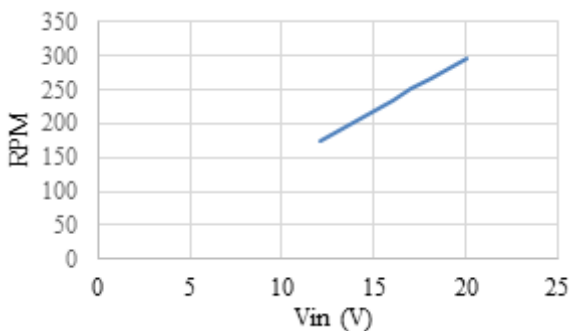
**Tabel 3:** Konfigurasi Inverter 3 fase

Respon	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady State Error
$K_p$	Menurun	Meningkat	Perubahan Kecil	Menurun
$K_i$	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
$K_d$	Perubahan Kecil	Menurun	Meneurun	Perubahan Kecil

**Tabel 4:** Data Hasil Pengujian Open Loop

Vin	RPM MOTOR	RPM LCD	% Error
12.07	174.8	174	0.46
13.04	189.8	190	0.11
14.01	204.3	203	0.64
15	219.3	219	0.14
16.04	235.1	234	0.47
17.01	250.4	250	0.16
18.04	266.2	266	0.08
19.05	281.5	281	0.18
20.02	296.8	297	0.07

berubah ubah. Dan untuk persentase error terlihat pada tabel dengan nilai terbesar yaitu 0.47%, dengan sebagian besar data dengan persentase error hanya 0.1%. Seperti pada grafik yang di tunjukkan pada Gambar 8 kecepatan motor BLDC menunjukkan respons yang baik saat nilai tegangan berubah ubah, yang mana semakin tinggi nilai tegangan maka kecepatan motor yang dihasilkan juga akan semakin besar.



**Gambar 8:** Grafik Respon RPM terhadap Tegangan

ii. *Pengujian Close Loop*

Pengujian rangkaian kontrol motor BLDC secara *close loop* dilakukan dengan cara menambahkan kontrol PID. Pengujian secara *close loop* dengan beban motor BLDC yang telah dikontrol dengan PID ini menghasilkan sebuah kecepatan motor yang tidak akan melebihi *set point* yang diberikan, yaitu 500 RPM. Sehingga, meskipun

diberikan tegangan input baterai sebesar 48V kecepatan maksimum yang dihasilkan oleh motor BLDC yaitu sebesar 500 RPM. Dengan dokumentasi pada Gambar 9 berikut. Untuk data dari pengujian ditunjukkan di



**Gambar 9:** Dokumentasi motor BLDC

dalam Tabel 5 berikut.

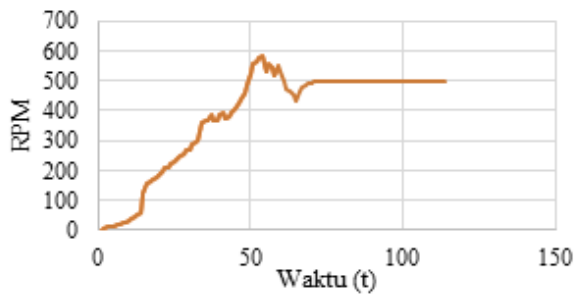
**Tabel 5:** Data Hasil Pengujian Close Loop

t (s)	RPM
1	0
10	33
20	182
30	271
40	384
50	525
60	534
70	495
80	498
90	498
100	498
110	498
120	498

Pengujian secara *close loop* ini dilakukan selama 2 menit dengan pengambilan data setiap 10 detik. Yang mana sistem masih menunjukkan waktu yang cukup lama untuk mencapai *set point*, selain itu terjadi lonjakan *overshoot* yaitu RPM melebihi *set point* yang diberikan seperti yang terlihat dalam Gambar 10.

iii. *Pengujian Close Loop Pengereman*

Pengujian secara *Close Loop* kali ini sedikit berbeda dari sebelumnya, yang mana pada pengujian kali ini



**Gambar 10:** Grafik Pengujian Close Loop

dilakukan dengan adanya sebuah gangguan pengereman. Tujuan dari gangguan pengereman kali ini untuk melihat bekerja atau tidaknya sebuah kontrol PID.

**Tabel 6:** Data Hasil Pengujian Close Loop Pengereman

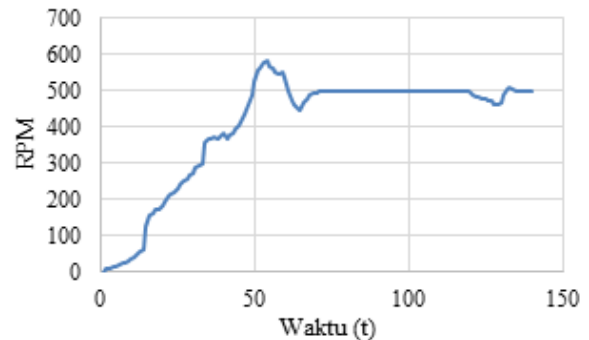
t (s)	RPM
1	0
10	33
20	182
30	271
40	384
50	525
60	534
70	495
80	498
90	498
100	498
110	498
120	498
130	466
131	487
132	503
133	508
134	504
135	498
136	498
137	498
138	498
139	498
140	498

Pengereman kali ini dilakukan dengan cara menahan putaran dari motor BLDC dengan sebuah kain, dan yang terjadi yaitu kecepatan dari motor BLDC akan menurun. Sebuah kontrol PID akan bekerja jika kecepatan dari motor BLDC tersebut bisa kembali pada kecepatan semula atau kecepatan *set point*. Pada pengujian kali ini pengereman dilakukan selama 10 detik, berikut adalah data hasil uji coba seperti yang terlihat

dalam Tabel 6.

Dari tabel hasil pengujian dengan adanya gangguan berupa pengereman ini, didapatkan grafik seperti pada Gambar 11. Pengereman yang dilakukan pada percobaan kali ini dilakukan selama 10 detik. Yang menurunkan kecepatan motor dari 498 RPM menjadi 459 RPM.

Pengujian Pengereman pada kali ini dilakukan dengan cara menahan putaran dari motor BLDC dengan menggunakan sebuah kain yang di gumpalkan. Dengan cara yang sederhana ini, hanya bisa menunjukkan efek pengereman yang bisa menurunkan sedikit dari kecepatan motor BLDC. Namun untuk pengujian kali ini akan fokus pada kontrol PID yang di berikan untuk pengaturan kecepatan. Dan sistem menunjukkan respons yang cukup baik karena kecepatan yang turun akibat pengereman bisa kembali ke kecepatan semula saat sudah tidak dilakukan pengereman.



**Gambar 11:** Grafik Pengujian Close Loop Pengereman

#### IV. KESIMPULAN

Setelah melakukan tahap perancangan dan pembuatan sistem kemudian dilanjutkan dengan tahap pengujian dan analisis maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: Pengujian Inverter tiga fase pada proyek akhir ini mampu dibebani mencapai 1,5 KW. Dengan nilai arus maksimal yaitu sebesar 31,25 A. Dan telah memutar motor BLDC hingga 500 RPM atau setara dengan 30 km/jam. Kecepatan motor BLDC antara alat ukur dan tampilan LCD memiliki persentase error tersebar yaitu 0.47%. Dalam pengambilan data pengujian motor BLDC, kontrol telah bekerja dengan baik. Hal ini ditunjukkan pada saat pengujian dengan menggunakan gangguan pengereman, kecepatan yang turun akibat pengereman bisa kembali ke kecepatan semula saat sudah tidak dilakukan pengereman. Dengan nilai konstanta  $K_p = 4.9505$ ,  $K_i = 0.266156$ ,  $K_d = 18.4158$ . Pengereman yang dilakukan pada motor BLDC menunjukkan

penurunan kecepatan yang tidak terlalu besar yaitu dari kecepatan *set point* 500 RPM turun menjadi 469 RPM dengan waktu pengereman yang cukup singkat.

Penggunaan IGBT yang tidak identik memengaruhi *switching* komutasi motor BLDC, hal ini yang menyebabkan cepatnya terjadi kerusakan pada IGBT jika penggunaannya tidak identik. Sinyal pembacaan *hall effect* sensor sangat berpengaruh terhadap pensaklaran dari inverter. Pastikan *hall effect* sensor terhubung dengan benar.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. PAMANTI, "Sistem pengendali kecepatan motor dc dengan metode pid pada mobil listrik," Ph.D. dissertation, Politeknik Negeri Sriwijaya, 2015.
- [2] M. Dewangga, "Desain sistem kontrol kecepatan motor bldc berbasis programmable array logic dengan metode six step commutation," 2015.
- [3] F. Dinansyar, "Pengaturan kecepatan motor brushless dc menggunakan kontroler fuzzy berbasis linear quadratic regulator," Ph.D. dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2016.
- [4] K. Premkumar dan B. Manikandan, "Fuzzy pid supervised online anfis based speed controller for brushless dc motor," *Neurocomputing*, vol. 157, pp. 76–90, 2015.
- [5] R. Goswami dan D. Joshi, "Performance review of fuzzy logic based controllers employed in brushless dc motor," *Procedia computer science*, vol. 132, pp. 623–631, 2018.
- [6] N. Baharudin dan S. Ayob, "Brushless dc motor drive control using single input fuzzy pi controller (sifpic)," in *2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*. IEEE, 2015, pp. 13–18.
- [7] M. G. López, P. Ponce, L. A. Soriano, A. Molina, dan J. J. R. Rivas, "A novel fuzzy-pso controller for increasing the lifetime in power electronics stage for brushless dc drives," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 47 841–47 855, 2019.
- [8] K. ALI, "Aplikasi sensor lv-maxsonar ez1 maxbotix sebagai sistem pengereman otomatis pada mobil listrik," Ph.D. dissertation, POLITEKNIK NEGERI SRIWIJAYA, 2016.
- [9] I. Sholikha, S. D. Nugraha, O. A. Qudsi, E. Purwanto, G. Prabowo, dan I. Ferdiansyah, "Pengaturan kecepatan motor bldc sensorless menggunakan foc," *Power Elektronik: Jurnal Orang Elektro*, vol. 12, no. 1, pp. 162–167, 2022.
- [10] R. I. Zhiligitov dan V. Y. Frolov, "Development of the sensorless control system bldc motor," in *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2017, pp. 1109–1111.
- [11] —, "Development of the sensorless control system bldc motor," in *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2017, pp. 1109–1111.
- [12] X. Zhou, Y. Zhou, C. Peng, F. Zeng, dan X. Song, "Sensorless bldc motor commutation point detection and phase deviation correction method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 6, pp. 5880–5892, 2018.
- [13] K. Kudelina, B. Asad, T. Vaimann, A. Rassölkin, A. Kallaste, dan D. V. Lukichev, "Main faults and diagnostic possibilities of bldc motors," in *2020 27th International Workshop on Electric Drives: MPEI Department of Electric Drives 90th Anniversary (IWED)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [14] F. Y. Pratama *et al.*, "Rancang bangun pengendalian kecepatan brushless dc motor tipe a2212/10t 1400 kv menggunakan kontroler pid berbasis labview," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 7, no. 03, 2018.
- [15] Y. C. Wibowo dan S. Riyadi, "Analisa pembebanan pada motor brushless dc (bldc)," in *PROSIDING SEMINAR NASIONAL INSTRUMENTASI, KONTROL DAN OTOMASI*, 2018, pp. 277–282.
- [16] D. Irawan dan P. P. SS, "Kontrol motor brushless dc (bldc) berbasis algoritma ai-pid," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)*, vol. 2, no. 1, pp. 41–48, 2020.
- [17] R. F. Anugrah, "Kontrol kecepatan motor brushless dc menggunakan six step comutation dengan kontrol pid (propotional integral derivative)," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 7, no. 2, pp. 57–63, 2020.
- [18] E. Kurniawan, "Analysis and simulation of pi and pid control systems using xcoss scilab," *Journal of Technomaterial Physics*, vol. 2, no. 2, pp. 108–116, 2020.
- [19] R. F. Anugrah, "Kontrol kecepatan motor brushless dc menggunakan six step comutation dengan kontrol pid (propotional integral derivative)," *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC*, vol. 7, no. 2, pp. 57–63, 2020.
- [20] R. I. Zhiligitov dan V. Y. Frolov, "Development of the sensorless control system bldc motor," in *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. IEEE, 2017, pp. 1109–1111.