

## PERENCANAAN *DRIVER* MOTOR BLDC DENGAN UMPAN BALIK KECEPATAN

Enggar Sila Majid<sup>1</sup>, Spto Nisworo<sup>2</sup>, Ibrahim Nawawi<sup>3</sup>

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tidar

Jln. Kapten Suparman 39 Potrobangsari, Magelang Utara

[enggarsm39@gmail.com](mailto:enggarsm39@gmail.com)<sup>1</sup>, [sptonisworo@untidar.ac.id](mailto:sptonisworo@untidar.ac.id)<sup>2</sup>, [ibrahim\\_nw@untidar.ac.id](mailto:ibrahim_nw@untidar.ac.id)<sup>3</sup>

### INTISARI

**Intisari** - Motor listrik *brushless DC* (BLDC) merupakan motor sinkron AC tiga fasa yang menggunakan sumber listrik DC, sehingga membutuhkan *driver* motor berupa rangkaian *inverter* tiga fasa untuk mengubah arus DC menjadi arus AC tiga fasa agar dapat beroperasi. Kecepatan putar rotor pada motor BLDC dapat dikendalikan menggunakan kendali *proportional integral derivative* (PID). *Tuning* kendali PID menggunakan metode *zieglernichols* berdasarkan parameter motor BLDC seri BN42-43IP-03 menghasilkan nilai  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  yaitu 19,1143; 6826,5; 0,0134. Respon kecepatan motor BLDC tanpa sistem kendali dan menggunakan kendali PI (*Proportional Integral*) menghasilkan lonjakan dan osilasi sebelum mencapai nilai kecepatan referensi, sementara respon kecepatan menggunakan kendali PID dapat mencapai nilai kecepatan referensi tanpa terjadi osilasi. Pengaturan kecepatan menggunakan kendali PID menghasilkan respon arus yang lebih kecil daripada respon arus tanpa sistem kendali dan kendali PI. Kendali PID dapat digunakan untuk mengatur kecepatan putar motor BLDC agar stabil saat terjadi perubahan beban.

**Kata kunci** - Motor BLDC, *driver* motor, kendali PID

### ABSTRAK

**Abstract** - A brushless DC electric motor (BLDC) is a three-phase AC synchronous motor that uses a DC power source, so it requires a motor driver in the form of a three-phase inverter circuit to convert DC current into three-phase AC current in order to operate. Rotor rotation speed on a BLDC motor can be controlled using proportional integral derivative (PID) control. PID control tuning using the Ziegler-Nichols method based on the parameters of the BLDC motor series BN42-43IP-03 produces  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  values of 19.1143; 6826.5; 0.0134. The speed response of the BLDC motor without a control system and using PI (*Proportional Integral*) control produces overshoot and oscillations before reaching the reference speed value, while the speed response using PID control can reach the reference speed value without oscillation. Speed regulation using the PID control produces a smaller current response than the current response without control system and PI control. PID control can be used to adjust the rotational speed of the BLDC motor to be stable when load changes occur.

**Keywords** - BLDC motor, motor driver, PID control

Pengaturan pensaklaran pada *inverter* dilakukan berdasarkan sinyal dari *hall effect sensor* [2].

### PENDAHULUAN

Motor listrik arus searah tanpa sikat atau *brushless direct current* (BLDC) adalah motor sinkron AC tiga fasa yang menggunakan arus listrik searah (DC) sebagai sumber. Motor BLDC menggunakan magnet permanen pada bagian rotor dan kumparan pada bagian stator. Motor BLDC akan beroperasi ketika stator dialiri arus listrik bolak-balik, sehingga timbul polaritas medan magnet pada stator. Kutub yang sama antara rotor dan polaritas stator akan saling menolak, sehingga rotor akan berputar akibat gaya magnet yang terjadi [1].

Arus AC tiga fasa berasal dari sumber arus DC yang diubah menjadi arus bolak-balik menggunakan *inverter* tiga fasa dengan metode *six step switching* atau enam pensaklaran.

Rangkaian *inverter* tiga fasa disusun dari enam buah saklar elektronik yang dirangkai secara *Hbridge* dengan mekanisme pensaklaran berdasarkan frekuensi yang sesuai. Pengaturan pensaklaran berjarak 120° untuk menghasilkan gelombang AC tiga fasa dengan ketentuan bahwa masing-masing saklar tidak boleh beroperasi secara simultan agar tidak menghasilkan gangguan [3].

Motor BLDC membutuhkan sistem pengendali kecepatan untuk menghasilkan kecepatan putar yang stabil. Kecepatan motor BLDC mengalami perubahan saat terjadi perubahan beban sehingga kestabilan kecepatan motor BLDC perlu ditingkatkan. Peningkatan kestabilan kecepatan motor BLDC dilakukan dengan memperbaiki respon *transien* kecepatan motor terhadap perubahan beban. Sistem kendali motor BLDC dirancang berdasarkan fungsi alih yang diperoleh dari pemodelan matematis motor BLDC. Pemodelan

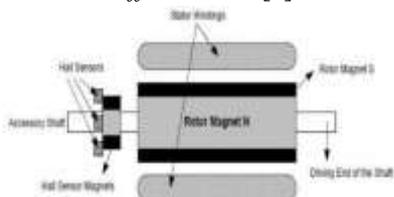
matematis motor BLDC yang diperoleh dari rangkaian ekivalen motor BLDC dapat disubstitusikan menjadi fungsi alih berupa persamaan diferensial [4].

### LANDASAN TEORI

Perencanaan *driver* motor BLDC dengan umpan balik kecepatan perlu dilakukan dengan dasar teori yang matang, adapun dasar teori yang digunakan antara lain :

#### A. Motor brushless direct current (BLDC)

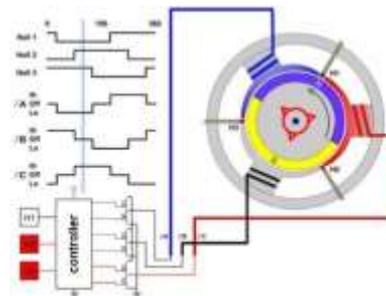
Motor *Brushless Direct Current* atau BLDC adalah jenis motor sinkron AC tiga fasa yang merupakan pengembangan dari motor DC konvensional. Terdapat tiga bagian utama pada motor BLDC, yaitu rotor, stator dan *hall effect sensor*. Bagian rotor merupakan magnet permanen, sementara stator berupa kumparan yang dapat menghasilkan medan magnet ketika dialiri arus listrik. *Hall effect sensor* berfungsi untuk mendeteksi posisi rotor yang berputar. Konstruksi motor BLDC yang terdiri dari rotor, stator dan *hall effect sensor* [1].



Gambar 1 Konstruksi motor BLDC

Motor BLDC akan beroperasi ketika arus listrik tegangan AC tiga fasa dialirkan pada kumparan stator. Perbedaan sudut antar fasa yang dihubungkan pada stator adalah sebesar  $120^\circ$ . Kumparan stator yang dialiri arus listrik menghasilkan medan magnet, sehingga bagian stator terbagi menjadi kutub utara dan kutub selatan. Kutub yang sama antara stator dan rotor yang merupakan magnet permanen akan saling menolak, sehingga rotor berputar [5].

Posisi rotor yang berputar dibaca oleh sensor posisi rotor yang dikenal dengan nama *hall effect sensor*. Setiap kali rotor berputar sejauh  $60^\circ$ , *hall effect sensor* akan mengirimkan sinyal ke rangkaian *inverter* yang beroperasi dengan metode *six step switching* untuk mengatur arus masukan pada kumparan stator, sehingga kutub pada stator berubah dan rotor tetap berputar. Perputaran rotor pada motor BLDC menghasilkan gaya gerak listrik balik atau *Back Electromotive Force (Back-EMF)* dengan bentuk gelombang *trapezoidal* [5].

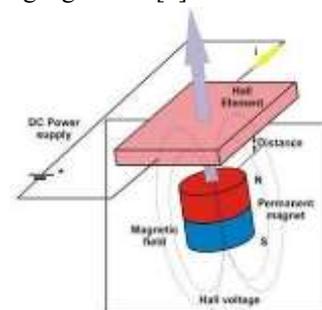


Gambar 2 Proses perputaran rotor

#### B. Hall Effect Sensor

*Hall effect sensor* merupakan sensor yang dapat mengubah informasi magnetik menjadi sinyal listrik dengan mendeteksi gaya magnet yang tegak lurus terhadap penampang sensor. Perubahan medan magnet secara terus-menerus menghasilkan sinyal berupa pulsa, sehingga dapat ditentukan frekuensi dari pulsa yang ditimbulkan. *Hall effect sensor* digunakan untuk mendeteksi kedekatan (*proximity*), posisi (*positioning*), kecepatan (*speed*), pergerakan arah (*directional*), dan arus listrik (*current sensing*). *Hall effect sensor* digunakan pada motor BLDC untuk mendeteksi posisi rotor yang berputar [6].

E. H. Hall melakukan penelitian pada tahun 1879 untuk mengamati efek pada sebuah plat konduktor yang dialiri arus listrik dan menerima medan magnet secara tegak lurus terhadap penampang plat konduktor. Efek yang terjadi pada penelitian tersebut adalah timbul beda tegangan pada plat konduktor, dengan nilai beda tegangan berbanding lurus terhadap nilai arus yang mengalir pada plat konduktor. Nilai beda tegangan pada plat konduktor dikenal dengan nilai *hall voltage (V<sub>h</sub>)* atau nilai tegangan *hall* [6].



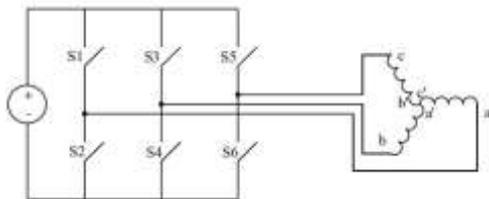
Gambar 3 Prinsip kerja hall effect sensor

*Hall effect sensor* memiliki keunggulan berupa linearitas dan kestabilan dalam pengukuran, memiliki tingkat sensitivitas yang tinggi, serta tidak bersifat merusak (*non destruktif*), sehingga *hall effect sensor* dapat digunakan pada motor BLDC karena dapat mengurangi resiko kerusakan motor BLDC [6].

**C. Driver motor**

Motor BLDC adalah motor listrik yang tidak menggunakan sikat dan komutator, sehingga proses komutasi terjadi secara elektronik berdasarkan arus yang mengalir pada kumparan stator. Motor BLDC membutuhkan *driver* motor untuk mengatur arus yang dialirkan pada kumparan stator agar terjadi perubahan polaritas pada stator. Perubahan polaritas pada stator akan menimbulkan medan putar sehingga rotor dapat tetap berputar. *Driver* motor BLDC merupakan rangkaian *inverter* tiga fasa yang berfungsi mengubah tegangan dari sumber DC menjadi AC tiga fasa [1].

Tegangan DC diubah menjadi tegangan AC tiga fasa menggunakan rangkaian *inverter*. Rangkaian *inverter* pada motor BLDC merupakan rangkaian *H-bridge switching* yang terdiri dari enam buah MOSFET yang dirangkai secara paralel. Rangkaian *inverter* menerima sinyal berupa *Pulse Width Modulation* (PWM) dari *hall sensor* untuk memicu proses *switching*. Rangkaian *inverter* dihubungkan pada tiga buah terminal fasa yang dirangkai secara bintang (*star*) [1].



Gambar 4 Skema rangkaian *inverter* 3 fasa

Proses *switching* pada rangkaian *inverter* dipicu oleh sinyal *input* bernilai *high* dan *low* (1 dan 0) yang diterima dari *hall sensor*. Proses *switching* dilakukan dengan metode *six step* atau enam pensaklaran untuk membagi arus ke tiga buah terminal fasa [7].

Tabel 1 Konfigurasi pensaklaran *inverter*

Sinyal input (H1, H2, H3)	S6	S5	S4	S3	S2	S1
001	0	0	0	1	1	0
101	1	0	0	1	0	0
100	1	0	0	0	0	1
110	0	0	1	0	0	1
010	0	1	1	0	0	0
011	0	1	0	0	1	0

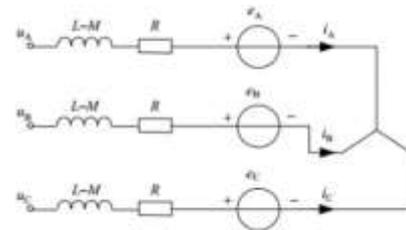
Tabel 2 Hubungan tegangan fasa-fasa terhadap sinyal *hall sensor*

Sinyal input (H1, H2, H3)	V <sub>an</sub>	V <sub>bn</sub>	V <sub>cn</sub>
001	-V <sub>dc</sub>	V <sub>dc</sub>	0

101	0	V <sub>dc</sub>	-V <sub>dc</sub>
100	V <sub>dc</sub>	0	-V <sub>dc</sub>
110	V <sub>dc</sub>	-V <sub>dc</sub>	0
010	0	-V <sub>dc</sub>	V <sub>dc</sub>
011	-V <sub>dc</sub>	0	V <sub>dc</sub>

**D. Pemodelan matematis motor BLDC**

Pemodelan matematis motor BLDC dibutuhkan untuk menentukan fungsi alih yang akan digunakan pada perencanaan sistem pengendali. Pemodelan matematis motor BLDC dapat diperoleh melalui analisis rangkaian ekuivalen motor BLDC [8].



Gambar 5 Rangkaian ekuivalen motor BLDC

Pemodelan matematis motor BLDC melalui analisis rangkaian ekuivalen diperoleh dengan asumsi setiap tegangan fasa simetris dan tidak terjadi perubahan posisi rotor. Arus induksi pada rotor dan *harmonic* medan magnet pada stator diabaikan. Kumparan pada stator dihubungkan secara bintang dan tidak terdapat titik netral, sehingga diperoleh persamaan tegangan fasa-fasa [9].

$$u_{AB} = (R_{iA} - R_{iB}) + L - M \frac{di_{dtA}}{dt} + M - L \frac{di_{dtB}}{dt} + (e_A - e_B)$$

$$u_{BC} = (R_{iB} - R_{iC}) + L - M \frac{di_{dtB}}{dt} + M - L \frac{di_{dtC}}{dt} + (e_B - e_C) \quad (1)$$

$$u_{CA} = (R_{iC} - R_{iA}) + M - L \frac{di_{dtA}}{dt} + L - M \frac{di_{dtC}}{dt} + (e_C - e_A)$$

Pada persamaan 1,  $u_{(A,B,C)}$  menunjukkan tegangan fasa A, B, C dengan satuan Volt.  $R_{(A,B,C)}$  menunjukkan resistansi fasa A, B, C dalam ohm.  $i_{(A,B,C)}$  merupakan arus fasa A, B, C dengan satuan ampere.  $L$  menunjukkan induktansi setiap fasa A, B, C.  $M$  menunjukkan induktansi bersama antar fasa, dengan satuan  $L$  dan  $M$  dinyatakan dalam milihenry.  $e_{(A,B,C)}$  merupakan nilai *back-EMF* setiap fasa dalam satuan Volt.

Persamaan 1 disubstitusikan dengan asumsi bahwa fasa A dan B terkonduksi pada kondisi *transien*, maka besar nilai  $e_A$  sama dengan  $e_B$  dan arah arus berlawanan, sehingga diperoleh persamaan 2.  $u_{AB} = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + 2e$  (2) Persamaan 2 dapat ditransformasikan ke dalam bentuk *laplace* menjadi persamaan 3.

$$u_{a}(s) = rai(s) + La s i(s) + k_e \omega(s) \quad (3)$$

Nilai *back-EMF* setiap fasa pada motor BLDC dapat dituliskan menjadi persamaan 4.

$$\begin{aligned} e_A &= f_A(\theta)\lambda\omega \\ e_B &= f_B(\theta)\lambda\omega \\ e_C &= f_C(\theta)\lambda\omega \end{aligned} \quad (4)$$

Pada persamaan 4,  $\lambda$  merupakan total fluks elektromagnet dalam satuan webber.  $\omega$  merupakan kecepatan sudut dalam rad/s.  $f_{(A,B,C)}\theta$  merupakan fungsi untuk menyatakan nilai *back-EMF* dengan magnitudo maksimal  $\pm 1$ .

Persamaan gerak motor BLDC dengan torsi beban ditunjukkan pada persamaan 5

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + B_v\omega \quad (5)$$

Pada persamaan 5,  $T_e$  menunjukkan torsi elektromagnetik.  $T_L$  menunjukkan torsi beban, dengan satuan  $T_e$  dan  $T_L$  adalah Nm.  $J$  menunjukkan momen inersia motor dengan satuan  $\text{g.m}^2$ .  $B_v$  merupakan koefisien gesek dengan satuan Nms.

Hubungan antara kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap perubahan posisi rotor ( $\theta$ ) dipengaruhi oleh jumlah kutub motor ( $P$ ) dan ditunjukkan pada persamaan 6.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{P}{2} \omega \quad (6)$$

Persamaan 1 sampai dengan persamaan 6 dapat dinyatakan dalam bentuk matriks ruang keadaan atau *state space matrix*.

$$\begin{aligned} X' &= Ax + Bu \\ Y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (7)$$

Variabel  $x$  merupakan matriks vektor output

$$x = [i_A \quad i_B \quad i_c \quad \omega \quad \theta]^T \quad (8)$$

Variabel  $u$  merupakan matriks vektor input

$$u = [u_A \quad u_B \quad u_c \quad T_L]^T \quad (9)$$

Variabel  $A$  merupakan matriks *state*

$$A = \begin{bmatrix} -r_a/L_a & 0 & 0 & (\lambda f(\theta)/L_a) & 0 \\ 0 & -r_a/L_a & 0 & (\lambda f(\theta)/L_a) & 0 \\ 0 & 0 & -r_a/L_a & (\lambda f(\theta)/L_a) & 0 \\ (\lambda f(\theta)/J) & (\lambda f(\theta)/J) & (\lambda f(\theta)/J) & -B_v/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P/2 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Variabel  $B$  merupakan matriks input

$$\begin{bmatrix} 1/L_a & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

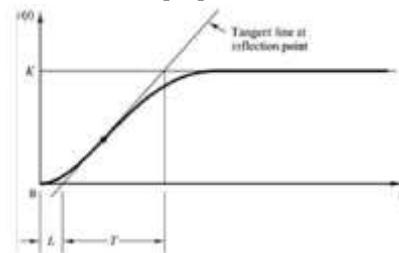
$$B = \begin{bmatrix} 0 & 1/0L_a & 1/0L_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/J \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

### E. Kendali PID

Kendali PID atau kendali *proportional integral derivative* adalah sistem kendali yang digunakan untuk mengurangi kesalahan pada sistem dengan mekanisme umpan balik berdasarkan *setpoint* yang telah ditentukan. Kendali PID menghitung perbedaan antara nilai *setpoint* dengan respon sistem secara kontinu. Kendali PID mengkombinasikan tiga kendali, yaitu kendali *proportional* yang berfungsi sebagai *gain* untuk mencapai *setpoint*, kendali *integral* untuk mempercepat respon sistem, dan kendali *derivative* untuk menghilangkan osilasi pada respon sistem [10].

Perencanaan sistem kendali PID membutuhkan parameter berupa nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Parameter kendali PID dapat ditentukan melalui *tuning* parameter menggunakan metode *ziegler-nichols*. Metode *ziegler-nichols* digunakan untuk memperoleh respon sistem dengan nilai *overshoot* maksimal sebesar 25%. Metode *ziegler-nichols* memiliki dua cara, yaitu metode kurva reaksi dan metode osilasi [10].

Metode kurva reaksi digunakan pada sistem *plant* perulangan terbuka (*open loop*) berdasarkan respon terhadap sinyal *step*. Sistem *plant* yang tidak memiliki unsur integrator atau *pole* kompleks akan menghasilkan kurva reaksi berbentuk S [10].



Gambar 6 Kurva reaksi berbentuk S

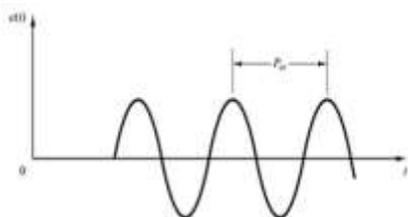
Kurva S memiliki waktu tunda ( $L$ ) dan konstanta waktu ( $T$ ). Parameter  $L$  dan  $T$  diperoleh dari perpotongan antara kurva dan garis singgung (*tangent line*) pada titik perubahan. Metode *tuning* parameter *ziegler-nichols* berdasarkan waktu tunda dan konstanta waktu pada kurva S ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3 *Tuning* parameter *ziegler-nichols* metode kurva reaksi

Pengendali	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T$	$\infty$	0

	$L$		
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Metode osilasi digunakan pada sistem *plant* perulangan tertutup (*closed loop*) dengan mengatur nilai  $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$ . Parameter *proportional* dinaikkan secara bertahap dari titik 0 hingga titik yang menyebabkan respon beresilasi dengan *magnitude* tetap (*sustained oscillation*).



Gambar 7 Kurva respon *sustained oscillation*

Kurva pada Gambar 7 diperoleh dari nilai penguatan *proportional* hingga mencapai titik yang disebut  $K_{cr}$  dengan periode *sustained oscillation* yang disebut  $P_{cr}$ . Metode *tuning* parameter *zieglernichols* berdasarkan kurva osilasi ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4 *Tuning* parameter *ziegler-nichols* metode osilasi

Pengendali	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45K_{cr}$	$\frac{1}{1,2 P_{cr}}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

## METODE PENELITIAN

Perencanaan *driver* motor BLDC dilakukan menggunakan parameter motor BLDC seri BN4243IP-03 keluaran MOOG dengan daya motor terukur sebesar 841 Watt dan tegangan sebesar 100 Volt yang ditunjukkan pada tabel 5 [11].

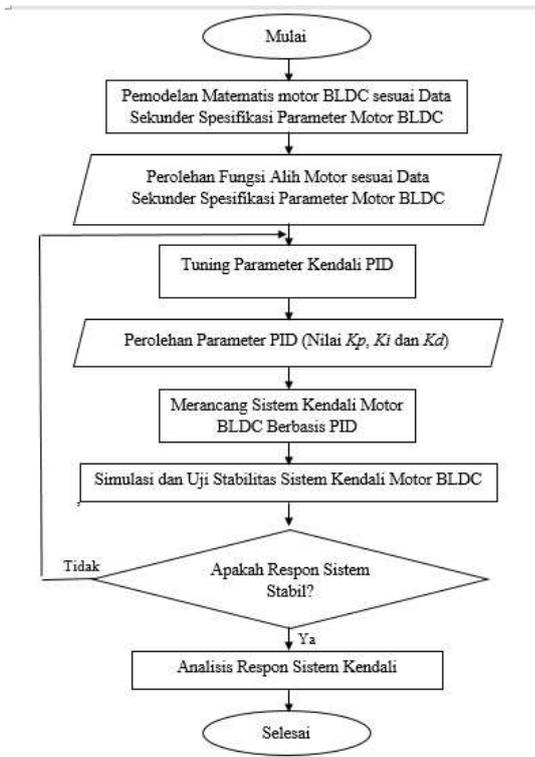
Perencanaan *driver* motor BLDC dimulai dari pemodelan matematis motor BLDC berdasarkan data sekunder spesifikasi parameter motor BLDC dilakukan untuk memperoleh fungsi alih motor BLDC. Fungsi alih motor BLDC digunakan untuk *tuning* parameter PID agar diperoleh nilai  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Sistem kendali motor BLDC dirancang berdasarkan parameter PID yang diperoleh. Perancangan dan

simulasi sistem kendali dilakukan menggunakan *Matlab/SIMULINK*, sementara rangkaian elektronika dapat diperoleh melalui konversi rancangan pada *Matlab/SIMULINK*.

Tabel 5 Parameter motor BLDC seri BN42-43IP-03

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Koefisien <i>Back-EMF</i>	$k_e$	25,40	V/krpm
Koefisien Torsi	$K_T$	0,2422	Nm/A
Momen Inersia	$J$	0,36699	g.m <sup>2</sup>
Resistansi Kumparan	$r_a$	0,16	Ohm
Induktansi Kumparan	$L_a$	0,63	mH
Koefisien Gesek	$B_v$	0,183593	Nms
Fluks elektromagnet	$\lambda$	0,030319	Wb

Rancangan sistem kendali disimulasikan untuk memperoleh respon sistem yang stabil. Respon yang diamati berupa respon arus dan kecepatan putar motor BLDC. Variabel respon kecepatan putar motor BLDC yang diamati berupa waktu tunda ( $t_d$ ), waktu naik ( $t_r$ ), waktu puncak ( $t_p$ ) dan waktu mantap ( $t_s$ ). Apabila simulasi tidak menghasilkan respon sistem kendali yang stabil, maka *tuning* parameter PID kembali dilakukan. Apabila diperoleh respon sistem kendali yang stabil, maka dilakukan analisis dan pembahasan.



Gambar 8 Diagram alir perencanaan *driver* motor BLDC

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Perencanaan *driver* motor BLDC yang dilakukan menggunakan parameter motor BLDC seri BN42-43IP-03 keluaran MOOG dengan daya motor terukur sebesar 841 Watt dan tegangan sebesar 100 Volt memperoleh hasil sebagai berikut.

#### A. Nilai *eigen* matriks ruang keadaan

Nilai *eigen* dapat diperoleh melalui perhitungan nilai *eigen* matriks ruang keadaan. Persamaan 12 digunakan untuk memperoleh nilai *eigen* matriks ruang keadaan, dengan  $s$  menyatakan nilai *eigen* dan  $I$  merupakan matriks identitas.

$$\det(A - sI) = 0 \quad (12)$$

Substitusi nilai parameter motor BLDC yang ditunjukkan pada tabel 5 ke persamaan 10 menghasilkan matriks ruang keadaan yang ditunjukkan pada persamaan 13.

$$A = \begin{bmatrix} -0,2540 & 0 & 0 & 0,04813 & 0 \\ 0 & -0,2540 & 0 & 0,04813 & 0 \\ 0 & 0 & -0,2540 & 0,04813 & 0 \\ 0,08262 & 0,08262 & 0,08262 & -0,5003 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Berdasarkan persamaan 13 dapat diperoleh nilai *eigen* menggunakan persamaan 12. Nilai *eigen* yang diperoleh yaitu  $s_1 = 0$ ;  $s_2 = -0,5418$ ;  $s_3 =$

$-0,2540$ ;  $s_4 = -0,2125$ ; dan  $s_5 = -0,2540$ .

Kestabilan dari suatu sistem *close-loop* ditentukan dari letak *pole* di bidang  $s$  atau nilai *eigen* dari matriks ruang keadaan. Nilai *eigen* menunjukkan letak *pole* pada sumbu imajiner, jika terdapat *pole* pada sebelah kanan sumbu imajiner maka *pole* tersebut akan memberikan pengaruh yang dominan selama perubahan waktu, sehingga respon sistem akan berosilasi. Nilai *eigen* yang ditunjukkan pada  $S_{(2,3,4,5)}$  bernilai negatif, sehingga letak *pole* berada pada sebelah kiri sumbu imajiner. Letak *pole* di sebelah kiri sumbu imajiner menunjukkan bahwa sistem stabil.

#### B. Fungsi Alih Sistem

Fungsi alih sistem motor BLDC dapat diperoleh dari matriks ruang keadaan

$$A = \begin{bmatrix} -0,2540 & 0 & 0 & 0,04813 & 0 \\ 0 & -0,2540 & 0 & 0,04813 & 0 \\ 0 & 0 & -0,2540 & 0,04813 & 0 \\ 0,08262 & 0,08262 & 0,08262 & -0,5003 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1,5873 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 00 & 1,58730 & 1,58730 & 00 \\ 0 & 0 & 0 & -2,7249 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad D = [0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

Fungsi alih sistem *close-loop* berdasarkan matriks ruang keadaan dapat diperoleh melalui perangkat lunak *Matlab* dengan perintah :

```
sys=ss(A,B,C,D)
[n,d]=ss2tf(A,B,C,D,3) G=tf(n,d)
```

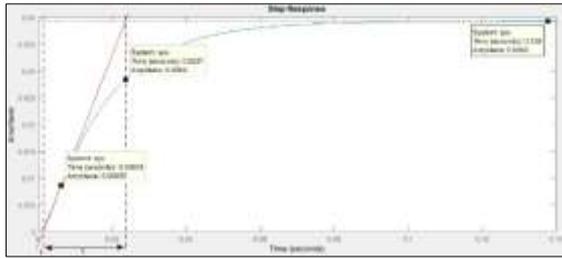
Fungsi alih yang diperoleh menggunakan perangkat lunak *Matlab* ditunjukkan pada persamaan 14.

$$\omega(s) = \frac{0,1311s^3 + 0,06662s^2 + 0,0084613s}{s^5 + 1,262s^4 + 0,5628s^3 + 0,1072s^2 + 0,007429s} \quad (14)$$

#### C. Tuning Parameter Kendali

Sistem kendali kecepatan putar motor BLDC menggunakan kendali PID membutuhkan parameter kendali berupa nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$ . Perolehan parameter kendali PID dapat dilakukan melalui *tuning* parameter kendali menggunakan metode *ziegler-nichols*. Persamaan 14 disimulasikan dalam sistem *open-loop*

dengan masukan *unit step* pada perangkat lunak *Matlab/SIMULINK* menghasilkan kurva berbentuk s, sehingga dilakukan *tuning* parameter kendali PID menggunakan metode kurva reaksi s yang ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9 Hasil simulasi sinyal *step* pada fungsi alih *open-loop*

Berdasarkan titik koordinat yang ditunjukkan pada gambar 4.5, diperoleh nilai  $(y_2, x_2) = (0,0392, 0,0237)$  dan  $(y_1, x_1) = (0,00855, 0,00628)$ . Nilai koordinat pada garis singgung kurva S dapat disubstitusikan pada persamaan garis singgung yang ditunjukkan pada persamaan 15 dengan nilai  $m$  sebagai *gradien* atau kemiringan garis, sehingga diperoleh nilai  $m$ .

$$y_2 - y_1 = m(x_2 - x_1) \quad (15)$$

$$m = 1,7595$$

Apabila diasumsikan bahwa garis singgung memotong sumbu  $x$  pada titik koordinat  $(x, 0)$  maka dapat diperoleh nilai  $x$ , yaitu :  
 $0,0392 - 0 = 1,7595 (0,0237 - x)$   
 $x = 0,0014$

Dari perhitungan garis singgung kurva, diperoleh nilai  $L = x = 0,0014$  dan  $T = 0,0237 - L$ , atau  $T = 0,0223$ . Nilai  $L$  dan  $T$  digunakan untuk *tuning* parameter kendali metode *ziegler-nichols* berdasarkan tabel 3.

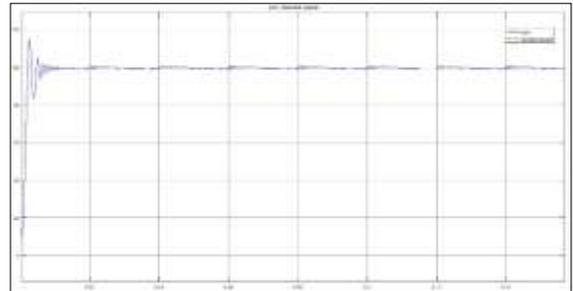
Perhitungan parameter PI meliputi nilai  $K_p$  dan  $K_i$  dengan perolehan nilai  $K_p = 14,3357$ ; dan nilai  $K_i = 3050,1$ .

Perhitungan parameter PID meliputi nilai  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  dengan perolehan nilai  $K_p = 19,1143$ ; nilai  $K_i = 6826,5$ ; dan nilai  $K_d = 0,0134$ .

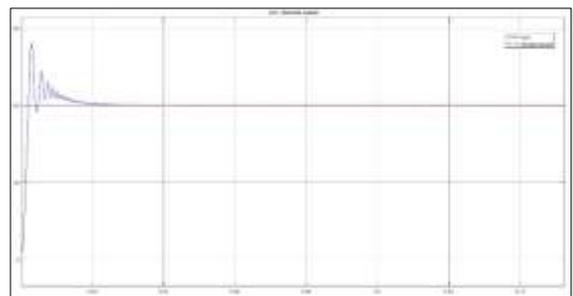
#### D. Data Hasil

Pada penelitian ini dilakukan beberapa percobaan untuk memperoleh respon kecepatan motor BLDC terhadap variasi kecepatan dan beban selama kurun waktu 1 sekon. Percobaan pertama yang dilakukan yaitu simulasi tanpa pengendali, percobaan kedua yaitu simulasi menggunakan kendali PI, percobaan ketiga yaitu simulasi menggunakan kendali PID, percobaan keempat yaitu simulasi perubahan kecepatan

pada kondisi beban tetap, percobaan kelima yaitu simulasi perubahan beban pada kondisi kecepatan referensi tetap.



Gambar 10 Respon kecepatan tanpa pengendali dengan kecepatan 100 rpm pada kondisi tanpa beban

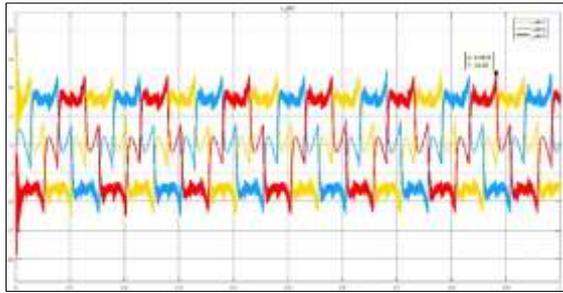


Gambar 11 Respon kecepatan menggunakan kendali PI dengan kecepatan 100 rpm pada kondisi tanpa beban

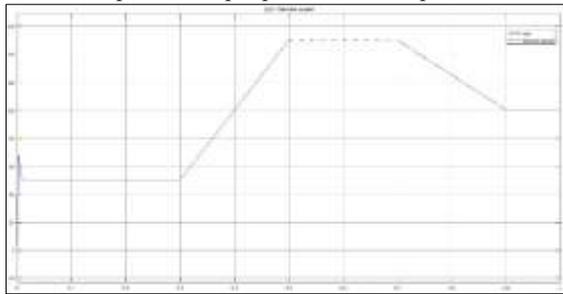
Pada simulasi tanpa pengendali dan simulasi menggunakan kendali PI, respon kecepatan mengalami osilasi sebelum mencapai kecepatan referensi. Pada simulasi menggunakan kendali PID, respon kecepatan tidak mengalami osilasi, ditunjukkan pada gambar 12.



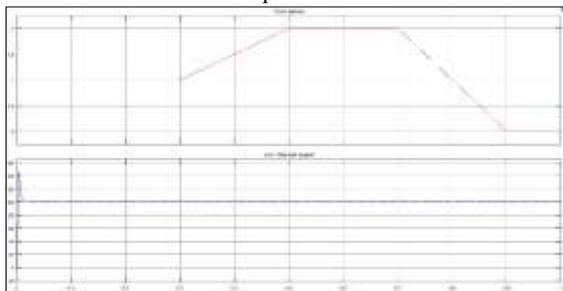
Gambar 12 Respon kecepatan menggunakan kendali PID dengan kecepatan 150 rpm dan beban 1 Nm



Gambar 13 Respon arus stator tanpa pengendali dengan kecepatan 100 rpm pada kondisi tanpa beban



Gambar 14 Respon perubahan kecepatan pada kondisi beban tetap



Gambar 15 Respon kecepatan terhadap perubahan beban

Simulasi perubahan kecepatan dan perubahan beban dilakukan pada rangkaian menggunakan kendali PID. Simulasi perubahan kecepatan pada kondisi beban tetap dan simulasi perubahan beban pada kondisi kecepatan referensi tetap menghasilkan respon kecepatan yang stabil pada kecepatan yang diinginkan.

Data respon *transien* kecepatan pada simulasi tanpa pengendali ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 6 Data respon *transien* kecepatan pada simulasi tanpa pengendali

Rpm	Beban (Nm)	td (ms)	tr (ms)	tp (ms)	ts (ms)	Mp (%)
100	0	1,34	2,11	2,59	9,37	15,10
	1	1,79	2,62	3,03	9,93	11,80
150	0	1,73	2,89	3,29	9,01	7,93
	1	2,21	3,51	3,84	9,55	5,40

Data respon *transien* kecepatan pada simulasi menggunakan kendali PI ditunjukkan pada tabel 7. Tabel 7 Data respon *transien* kecepatan pada simulasi menggunakan kendali PI

Rpm	Beban (Nm)	td (ms)	tr (ms)	tp (ms)	ts (ms)	Mp (%)
-----	------------	---------	---------	---------	---------	--------

100	0	1,34	2,11	2,93	17,37	40,00
	1	1,79	2,63	3,58	18,57	44,60
150	0	1,73	2,89	4,07	18,26	37,73
	1	2,21	3,52	5,17	20,30	42,27

Data respon *transien* kecepatan pada simulasi menggunakan kendali PID ditunjukkan pada tabel 8. Tabel 8 Data respon *transien* kecepatan pada simulasi menggunakan kendali PID

Rpm	Beban (Nm)	td (ms)	tr (ms)	tp (ms)	ts (ms)	Mp (%)
100	0	1,34	2,11	3,41	9,84	33,80
	1	1,79	2,63	4,05	10,99	46,30
150	0	1,73	2,89	4,54	11,33	43,40
	1	2,21	3,52	5,87	12,95	52,13

Data respon arus stator yang diperoleh dari simulasi, yaitu simulasi tanpa pengendali, simulasi menggunakan kendali PI, dan simulasi menggunakan kendali PID ditunjukkan pada tabel 9. Tabel 9 Data respon arus stator

Rpm referensi (rpm)	Beban (Nm)	Arus Stator (A)		
		Tanpa Pengendali	PI	PID
100	0	12,48	12,20	11,40
	1	17,24	16,23	15,52
150	0	16,77	16,91	16,29
	1	21,52	20,73	20,45

## SIMPULAN

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, *driver* motor BLDC dapat dirancang untuk menggerakkan rotor pada motor BLDC. Kendali PID dapat digunakan pada *driver* motor untuk mengatur kecepatan motor BLDC agar mencapai kestabilan pada kecepatan yang diinginkan atau kecepatan referensi. Respon kecepatan yang dihasilkan pada ketiga percobaan, yaitu simulasi tanpa pengendali, simulasi menggunakan kendali PI (*Proportional Integral*), dan simulasi menggunakan kendali PID (*Proportional Integral Derivative*) dapat mencapai kecepatan referensi.

Pada simulasi tanpa pengendali dan simulasi menggunakan kendali PI, respon kecepatan mengalami osilasi sebelum mencapai kecepatan referensi. Respon kecepatan pada simulasi tanpa pengendali dengan kecepatan 150 rpm dan beban 1 Nm menunjukkan waktu mantap sebesar 9,55 ms. Pada simulasi menggunakan kendali PI dengan kecepatan 150 rpm dan beban 1 Nm, respon kecepatan menunjukkan waktu mantap sebesar 20,30 ms. Respon kecepatan pada simulasi menggunakan kendali PID dengan kecepatan 150 rpm dan beban 1 Nm menunjukkan waktu mantap sebesar 12,95 ms. Pada simulasi menggunakan kendali PID, respon kecepatan tidak mengalami osilasi,

sehingga simulasi menggunakan kendali PID lebih baik digunakan karena dapat menghilangkan osilasi pada respon kecepatan.

Respon arus yang diperoleh pada simulasi menunjukkan bahwa kendali PID dapat memperkecil nilai arus yang mengalir. Pada simulasi tanpa pengendali, nilai arus mencapai 21,52 ampere, pada simulasi menggunakan kendali PI, nilai arus tertinggi sebesar 20,73 ampere, pada simulasi menggunakan kendali PID, nilai arus mencapai 20,45 ampere.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rashid, Muhammad. 1993. *Power Electronics, Circuit, Device and Applications Second Edition*, pp. 694-704. USA : Prentice-Hall International, Inc
- [2] Putra, Maher Z.O dan Iradiratu D.P.K. 2018. Pengaturan Kecepatan Motor Six Step BLDC dengan Menggunakan Kontrol Fuzzy Logic. *Seminar Nasional Kelautan XIII*. Surabaya : Universitas Hang Tuah
- [3] Ali, Muhamad. 2018. *Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik*, hal 128-130. Yogyakarta : UNY Press
- [4] Anshory, I; I Robandi dan Wirawan. 2020. Identification Parameter System for Mathematical Modeling BLDC Motor Using Transfer Function Models. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. DOI : 10.1088/1757-899X/821/1/012023
- [5] Qi, Fang; Daniel S, Claude W, Dr. Clemens M dan Dr. Ulrich S. 2019. *Motor Handbook*, pp. 47-51. Infineon, ISEA Power Electronics and Electrical Drives. Germany : RWTH Aachen University
- [6] Yudhistira dan Priyo Wibowo. Pengukuran Medan Magnetik Helmholtz Coil melalui Konversi Tegangan Efek Hall. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2019*. Jakarta : Universitas Muhammadiyah Jakarta
- [7] Akbar, Danu dan Slamet R. 2018. Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM (Pulse Width Modulation). *Seminar Nasional Instrumentasi, Kontrol dan Otomasi (SNIKO)*. Bandung
- [8] Ristiana, Rina; Arief S.R, Ary S.P dan Carmadi M. 2018. Desain Kendali Optimal Konsumsi Energi Pada Sistem Mobil Listrik Untuk Model Sistem Linier. *Jurnal TELKA, Vol. 4 No. 1 Th. 2018*. ISSN : 2540-9123
- [9] Wen, Xiang dan Zhen-Qiang Li. 2017. Brushless DC Motor Speed Control Strategy of Simulation Research. *MATEC Web of Conferences 139, 00172 (2017)*. DOI : 10.1051/mateconf/201713900172
- [10] Ogata, Katsuhiko. 2010. *Modern Control Engineering, Fifth Edition* pp. 568-572. USA : Pearson Education, Inc
- [11] Moog Company. *Motion Technology Catalog*, pp. 40-41. Brushless DC Motors Catalog. Datasheet, BN42 IP65 Specification