

Pemodelan dan Simulasi Sistem Kendali Motor BLDC Daur Tertutup menggunakan *PI Controller*

Andi Fauzan Alim¹
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Gowa, Sulawesi Selatan

A. Ejah Umreaini S.²
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Gowa, Sulawesi Selatan

Rhiza S. Sadjad³
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Gowa, Sulawesi Selatan

Abstrak—Motor BLDC banyak digunakan di berbagai bidang seperti bidang otomasi industri, otomotif, komputer, penerbangan, dan peralatan rumah tangga karena memiliki efisiensi yang tinggi, kepadatan daya yang tinggi, umur operasi yang lama, dan biaya perawatan yang rendah. Motor BLDC bekerja tanpa menggunakan sikat sebagai alat komutasinya, tetapi menggunakan komutasi elektronik. Hal ini mengakibatkan motor BLDC membutuhkan sistem pengendalian yang lebih kompleks. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan sistem kendali motor BLDC daur tertutup menggunakan *PI controller*. Skema pengendalian motor BLDC ini menggunakan metode *six step commutation*. Simulasi sistem dilakukan dalam kondisi beban yang berubah. Parameter K_p dan K_i didapatkan melalui pencarian dengan meminimalkan fungsi objektif J . Didapatkan nilai $K_p = 1.75$ dan $K_i = 4.125$ dengan nilai $RMSE = 49.91$; $RMSU = 244.6$; dan $J = 249.6401$. Berdasarkan hasil simulasi, dengan nilai K_i dan K_p tersebut membuktikan bahwa performa sistem dengan pengendali daur tertutup lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa pengendali.

Kata kunci—motor BLDC, daur tertutup, *PI controller*, *six step commutation*, fungsi objektif.

I. PENDAHULUAN

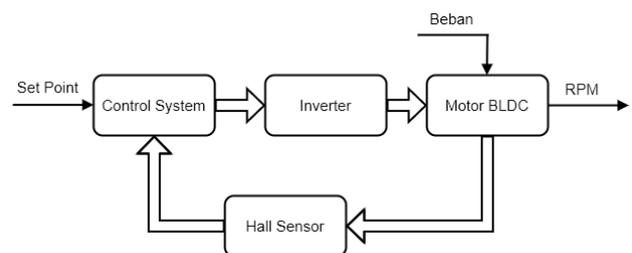
Seiring bertambah majunya teknologi di bidang otomotif khususnya pada kendaraan listrik, kebutuhan akan penggunaan motor BLDC semakin meningkat. Motor BLDC banyak digunakan di berbagai bidang, seperti otomasi industri, komputer, otomotif, penerbangan, dan peralatan rumah tangga [1] [2], karena memiliki kepadatan daya, keandalan, dan efisiensi yang tinggi, perawatan yang rendah, tingkat kebisingan rendah dan umur operasi yang lebih lama dibanding motor lainnya [3].

Tidak seperti motor DC pada umumnya, motor BLDC memiliki sistem pengendalian yang lebih kompleks karena motor BLDC bekerja tanpa menggunakan sikat sebagai alat komutasi yang bekerja secara mekanis, tetapi dikendalikan secara elektronik menggunakan *controller* dan inverter sebagai catu dayanya [4] [5]. Oleh karena itu, dibuatlah model simulasi untuk memudahkan dalam mempelajari dan menganalisis karakteristik dari motor BLDC. Sehingga dapat dihasilkan model yang akurat dan skema pengendalian yang tepat [4].

Dalam jurnal penelitian ini akan dibahas mengenai pemodelan sistem kendali motor BLDC pada aplikasi *Simulink/MATLAB* dan perancangan *PI controller* sebagai pengendali kecepatan motor daur tertutup.

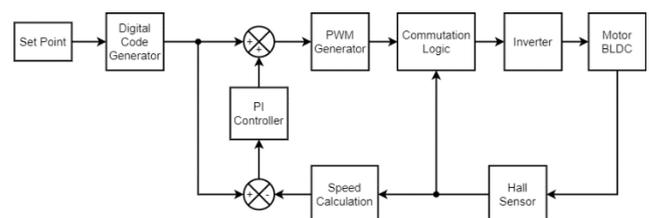
II. RANCANGAN SISTEM

Secara umum, motor dengan magnet permanen dibedakan jadi dua jenis yaitu motor BLAC dan motor BLDC. Perbedaan antara keduanya yaitu terletak pada karakteristik *back EMF* motor. Motor BLDC termasuk dalam jenis *permanent magnet synchronous motor* (PMSM) dengan karakteristik *back EMF* berbentuk trapezoid [2] [6]. Teknik dalam pengendalian motor BLDC dibedakan menjadi dua berdasarkan cara mendeteksi posisi rotor, yaitu menggunakan sensor atau tanpa menggunakan sensor (*sensorless*) [4]. Pada penelitian ini, kami menggunakan motor yang dilengkapi dengan *hall sensor* untuk mendeteksi posisi rotor. Berikut ini merupakan diagram blok sistem secara garis besar.



Gambar 1. Diagram blok sistem kendali motor BLDC

Motor BLDC ini menggunakan inverter tiga fasa sebagai catu daya untuk menghasilkan *quasi-square wave* [2] yang pola pensaklarannya ditentukan berdasarkan sinyal dari *hall sensor*. *Hall signal* dibangkitkan berdasarkan posisi rotor pada motor. *Hall signal* ini kemudian digunakan dalam proses komutasi elektronik yang diatur pada blok *control system*. Kemudian algoritma pengendalian *PI controller* disematkan dalam blok *control system* sebagai pengendali daur tertutup untuk mengendalikan kecepatan motor pada kondisi beban yang berubah. Struktur pengendali kecepatan motor BLDC daur tertutup menggunakan *PI controller* ditunjukkan pada Gambar 2 berikut ini.



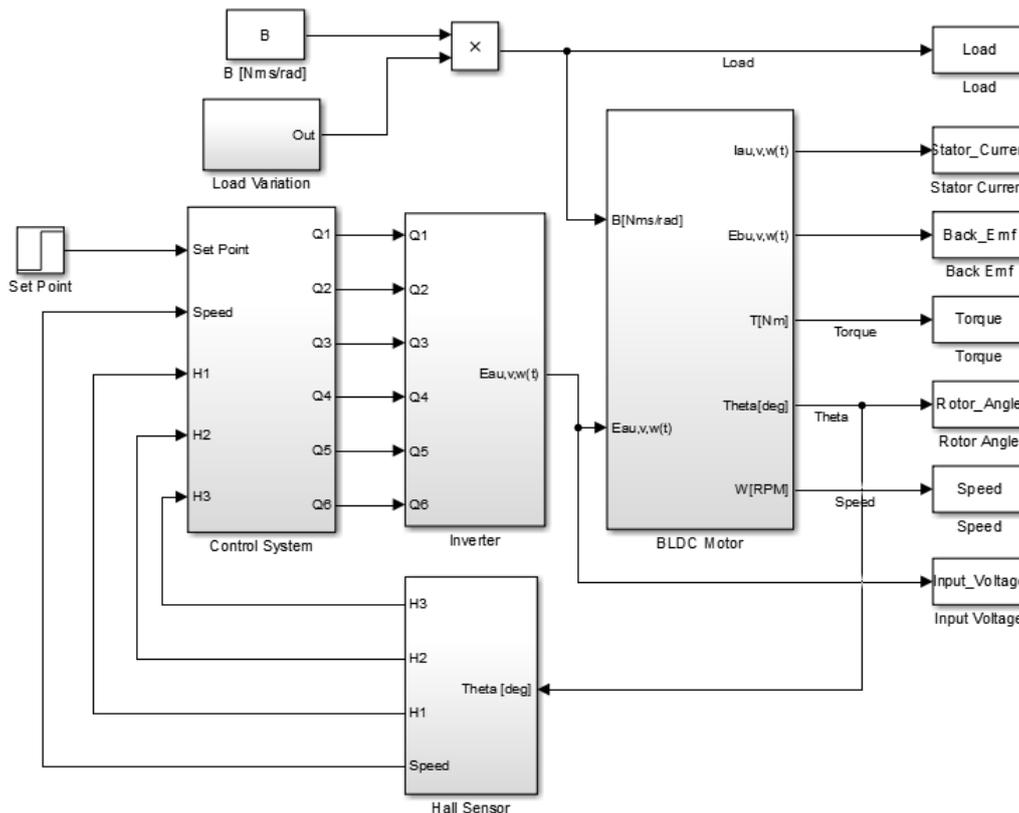
Gambar 2. Struktur pengendali kecepatan motor BLDC daur tertutup

Pada struktur tersebut, nilai *feedback* kecepatan nilai *set point* yang digunakan berupa besaran digital. Nilai *feedback* dan *set point* tersebut dibandingkan menggunakan *comparator* sehingga menghasilkan nilai eror yang akan menjadi input dari blok *PI controller*. Kemudian output dari *PI controller* akan mengubah nilai *set point* yang akan menjadi input blok *PWM generator*. Pada blok *PWM generator*, nilai *set point* akan dikonversi menjadi *duty cycle*. *Duty cycle* ini akan menentukan besar sinyal *PWM* yang dihasilkan. Kemudian sinyal *PWM* ini akan dijadikan sebagai sinyal kontrol pada blok *commutation logic* untuk

mengatur pola komutasi pada inverter. Sehingga output dari blok *commutation logic* ini berupa sinyal *PWM*.

III. PEMODELAN SISTEM

Pemodelan sistem kendali motor BLDC dibangun berdasarkan karakteristik dinamik tiap komponen sehingga dihasilkan model yang tepat dan dapat merepresentasikan kondisi sistem yang sesungguhnya. Berikut ini merupakan model sistem secara keseluruhan yang terdiri dari empat blok utama yaitu blok Motor BLDC, blok Inverter, blok *Hall Sensor* dan blok *Control System*.



Gambar 3. Model sistem kendali motor BLDC

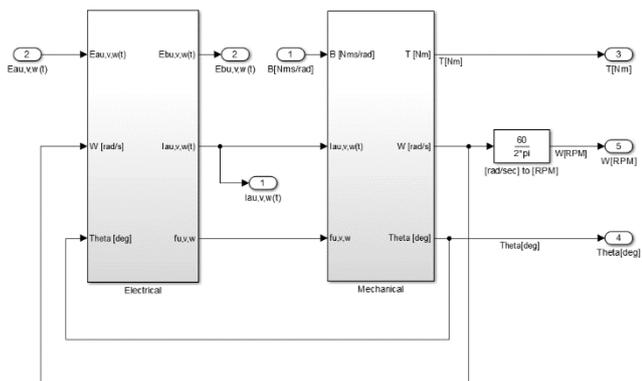
A. Motor BLDC

Motor yang dimodelkan pada penelitian ini yaitu motor BLDC dengan kumparan yang dihubungkan *wye* dan dengan tegangan induksi balik yang berbentuk trapezoid (*trapezoidal back EMF*). Model ini dibangun dengan mengasumsikan bahwa rugi *hysteresis* dan *Eddy current* pada motor diabaikan, *self induction* dan *mutual induction* motor dianggap sama dan konstan, dan *back EMF* berbentuk trapezoid ideal [4].

Model motor BLDC ini dibuat dalam model persamaan diferensial yang terbagi atas dua komponen yaitu komponen elektrik dan mekanik. Masing-masing persamaan tersebut menggambarkan karakteristik motor secara riil [7]. Berikut ini adalah implementasi model motor BLDC pada Simulink/MATLAB.

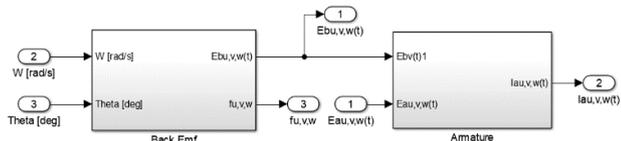
TABEL 1.
SPESIFIKASI MOTOR BLDC [8]

<i>Speed, RPM</i>	3000 rpm
<i>DC Voltage, V_{dc}</i>	310
<i>Poles, P</i>	4
<i>Inertia, J</i>	0.00035 Nms ² /rad
<i>Voltage constant, K_b</i>	0.7452 Vs/rad
<i>Torque constant, K_m</i>	0.74 Nm/A
<i>Phase resistance, R_a</i>	2.3 Ohm
<i>Phase Inductance, L_a</i>	0.00768 H
<i>Friction constant, B</i>	0.0001 Nms/rad



Gambar 4. Model blok motor BLDC

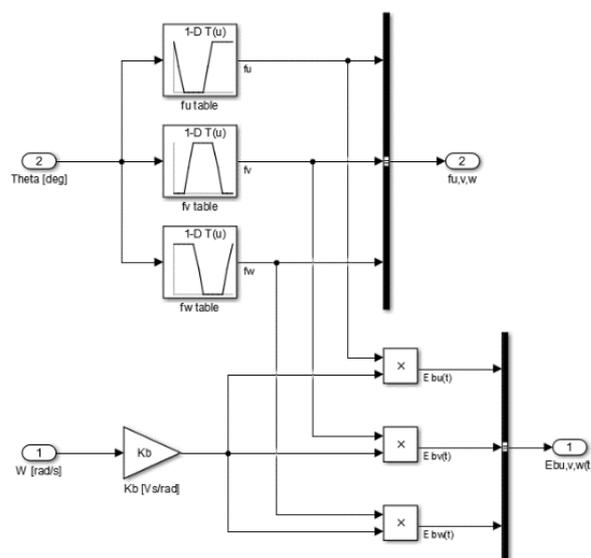
Model elektrik motor BLDC dibangun menggunakan dua blok yaitu blok *armature* dan blok *back EMF*. Blok *armature* berisi model persamaan diferensial komponen elektrik dari motor BLDC [4]. Sedangkan blok *back EMF* berisi model *back EMF* motor BLDC yang merupakan fungsi sudut rotor yang berbentuk trapezoid [9]. Berikut ini adalah tabel fungsi *back EMF* sebagai fungsi sudut rotor.



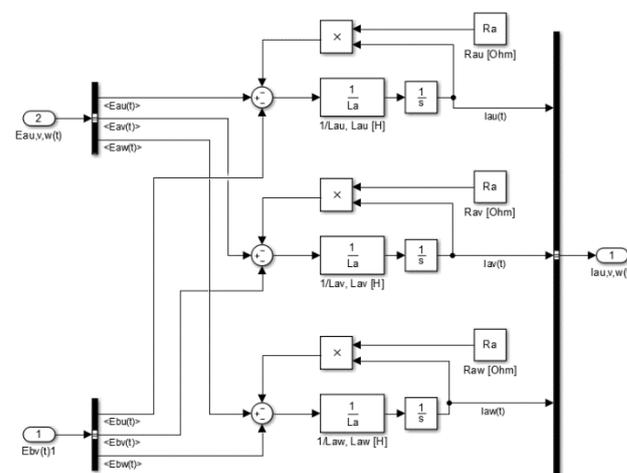
Gambar 5. Model blok komponen elektrik

TABEL 2.
MODEL BACK EMF SEBAGAI FUNGSI SUDUT ROTOR

θ_r	$f_u(\theta_r)$	$f_v(\theta_r)$	$f_w(\theta_r)$
$0^\circ - 60^\circ$	$1 - \frac{6\theta_r}{\pi}$	-1	1
$60^\circ - 120^\circ$	-1	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 3$	1
$120^\circ - 180^\circ$	-1	1	$5 - \frac{6\theta_r}{\pi}$
$180^\circ - 240^\circ$	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 7$	1	-1
$240^\circ - 300^\circ$	1	$9 - \frac{6\theta_r}{\pi}$	-1
$300^\circ - 360^\circ$	1	1	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 11$

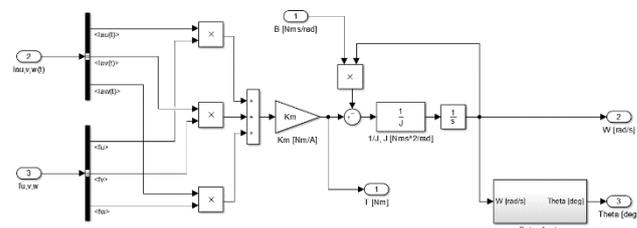


Gambar 6. Model blok back EMF



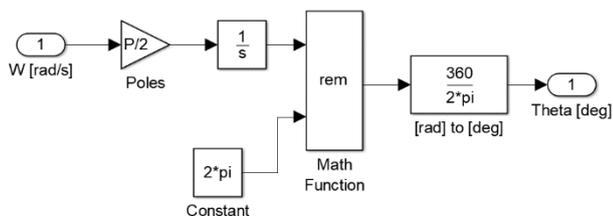
Gambar 7. Model blok armature

Model mekanik motor BLDC berisi persamaan diferensial komponen mekanik motor [4]. Berikut ini adalah gambar model mekanik motor BLDC.



Gambar 8. Model blok komponen mekanik

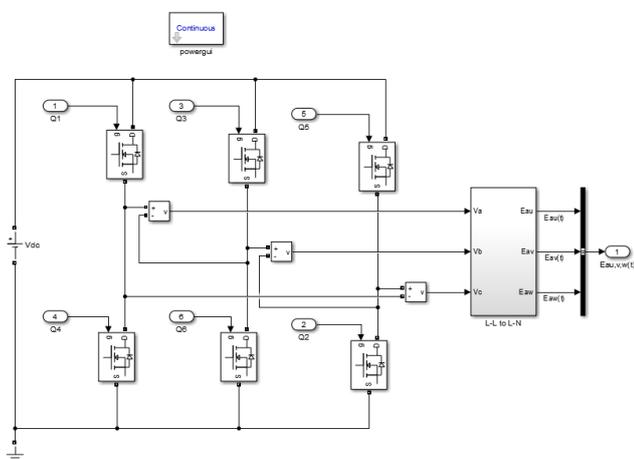
Pada model blok mekanik, terdapat blok *rotor angle* untuk mendapatkan nilai sudut rotor. Nilai sudut rotor ini digunakan sebagai input blok *back EMF* yang merupakan fungsi sudut rotor.



Gambar 9. Model blok rotor angle

B. Inverter

Catu daya pada motor BLDC menggunakan inverter tiga fasa. Inverter tiga fasa terdiri atas enam buah *MOSFET* yang dirangkai berpasangan sehingga menghasilkan keluaran tegangan tiga fasa. Pola pensaklaran keenam *MOSFET* ini diatur oleh blok *control system* berdasarkan *hall signal*. Berikut ini adalah model blok inverter tiga fasa.



Gambar 10. Model blok inverter

Seperti yang terlihat pada Gambar 10, tegangan keluaran dari inverter berupa tegangan *line to line*, sedangkan untuk menggerakkan beban motor yang terhubung *wye* dibutuhkan tegangan *line to neutral*. Oleh karena itu dibutuhkan blok *LL to LN* untuk mengubah tegangan *line to line* menjadi *line to neutral* [10].

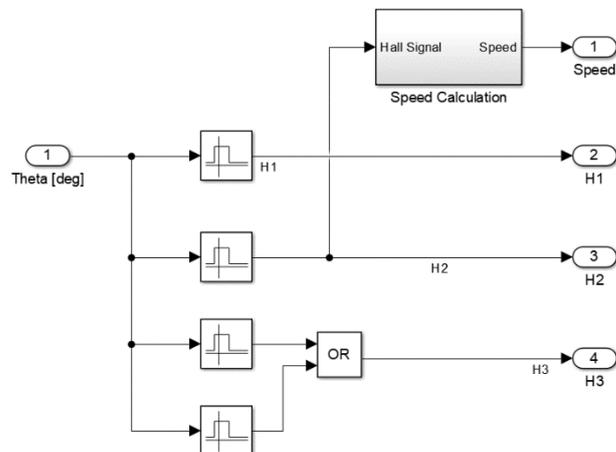
C. Hall Sensor

Terdapat tiga buah *hall sensor* yang digunakan untuk mendeteksi posisi rotor yang masing-masing terpisah sebesar 120° elektrik. Blok *hall sensor* dimodelkan sebagai fungsi dari sudut rotor. TABEL 3 berikut menyajikan model *hall sensor* sebagai fungsi sudut rotor dan Gambar 11 menunjukkan model blok *hall sensor*.

TABEL 3.
MODEL HALL SENSOR SEBAGAI FUNGSI SUDUT ROTOR

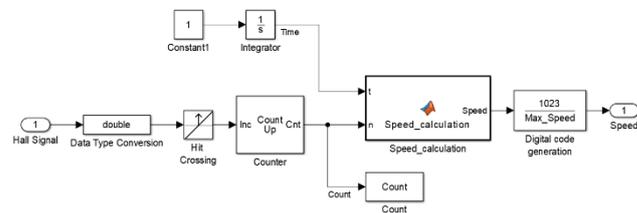
θ_e	H ₁	H ₂	H ₃
0° – 60°	1	0	1
60° – 120°	1	0	0
120° – 180°	1	1	0

180° – 240°	0	1	0
240° – 300°	0	1	1
300° – 360°	0	0	1



Gambar 11. Model blok hall sensor

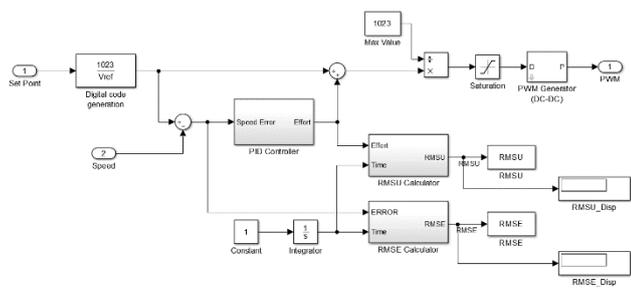
Untuk mendapatkan nilai kecepatan putaran motor, digunakan blok *speed calculation* untuk menghitung nilai kecepatan putaran motor berdasarkan sinyal dari *hall sensor*. Nilai ini kemudian dikonversi ke kode digital. Model blok *speed calculation* ditunjukkan pada gambar berikut.



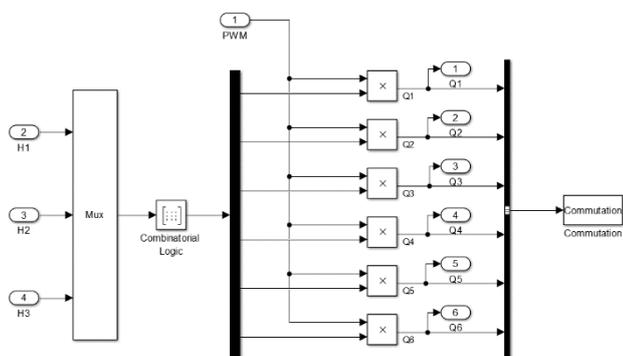
Gambar 12. Model blok speed calculation

D. Control System

Pada blok *control system* digunakan dua buah blok pengendali yaitu blok *speed controller* yang berfungsi sebagai pengendali kecepatan motor daur tertutup dan blok *commutation logic* yang berfungsi sebagai alat komutasi elektronik motor BLDC. Metode komutasi yang digunakan untuk menggerakkan motor BLDC ini yaitu metode *six step commutation* dimana komutasi dilakukan dengan mengaktifkan enam buah *MOSFET* pada inverter secara bergantian dalam enam tahap untuk menghasilkan satu siklus elektrik. Gambar berikut ini menampilkan model blok *speed controller* motor BLDC dan model blok *commutation logic*.



Gambar 13. Model blok *speed controller*



Gambar 14. Model blok *commutation logic*

Pada blok *commutation logic* akan dihasilkan enam buah output berupa sinyal *PWM* yang akan menjadi sinyal kontrol dari enam buah *MOSFET* pada inverter. Pola keluaran dari enam sinyal output ini ditentukan berdasarkan *hall signal*. *Hall signal* ini membawa informasi mengenai posisi sudut rotor. Berikut ini adalah tabel pola komutasi motor BLDC berdasarkan *hall signal*.

TABEL 4.
POLA KOMUTASI MOTOR BLDC [9]

Hall Signal			Controller Output					
H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	0	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	0	1	1	1	0
1	1	0	0	1	1	1	0	0
0	1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0	0	1	1

IV. HASIL

A. *PI* Parameter

Dalam mendesain *PI controller*, penentuan parameter kontrol K_p dan K_i sangatlah penting untuk mendapatkan performa sistem yang diinginkan dimana eror dapat diminimalkan dengan usaha yang seminimal mungkin.

Seminar Hasil Penelitian

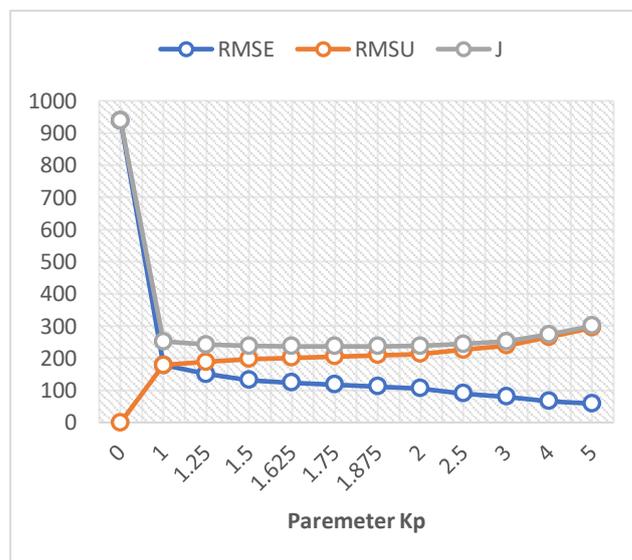
Pada Gambar 13 dapat dilihat terdapat dua buah blok untuk mengukur performa *PI controller* yaitu blok *RMSE calculator* dan blok *RMSU calculator*. Fungsi dari blok ini yaitu untuk mengukur nilai *RMS* dari sinyal eror dan nilai *RMS* dari usaha yang dilakukan oleh *PI controller*. Dari nilai *RMSE* dan *RMSU* dibuatlah fungsi objektif sebagai berikut:

$$J = \sqrt{RMSE^2 + RMSU^2} \tag{1}$$

Kemudian setelah mengetahui fungsi objektifnya, dilakukan pencarian masing-masing nilai K_p dan K_i terbaik untuk mendapatkan nilai minimal dari fungsi tersebut. Berikut ini merupakan tabel hasil pencarian nilai K_p dan K_i .

TABEL 5.
DATA HASIL PENCARIAN PARAMETER K_p

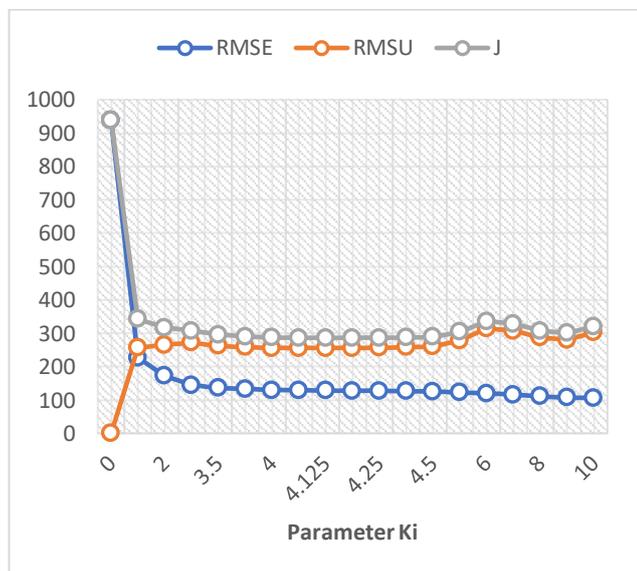
No.	K_p	K_i	RMSE	RMSU	J
1	0	0	938.8	0	938.8
2	1	0	177.9	177.9	251.5886
3	1.25	0	150.9	188.7	241.6164
4	1.5	0	131.7	197.6	237.4672
5	1.625	0	124.1	201.6	236.7348
6	1.75	0	117.4	205.5	236.6707
7	1.875	0	111.6	209.3	237.1941
8	2	0	106.3	212.6	237.694
9	2.5	0	90.48	226.2	243.6249
10	3	0	79.66	239	251.926
11	4	0	66.39	265.6	273.7718
12	5	0	58.81	294.1	299.9224



Gambar 15. Grafik K_p terhadap RMSE, RMSU, dan J pada pencarian parameter K_p

TABEL 6.
DATA HASIL PENCARIAN PARAMETER KI

No.	K _p	K _i	RMSE	RMSU	J
1	0	0	938.8	0	938.8
2	0	1	226.7	256.3	342.1733
3	0	2	172.1	265.5	316.3995
4	0	3	144.6	271.4	307.5177
5	0	3.5	136.3	262.3	295.5994
6	0	3.75	132.7	258.1	290.2153
7	0	4	129.6	255.8	286.7574
8	0	4.0625	128.9	255.7	286.3524
9	0	4.125	128	255.8	286.0378
10	0	4.1875	127.7	256	286.0827
11	0	4.25	127	256.3	286.0397
12	0	4.375	126.3	258.3	287.5249
13	0	4.5	125.1	260.6	289.0716
14	0	5	122.1	278.5	304.0899
15	0	6	119.3	314.4	336.2735
16	0	7	115.7	306.9	327.9849
17	0	8	110.6	287	307.5733
18	0	9	107.6	280.2	300.1496
19	0	10	106.6	302.4	320.6389



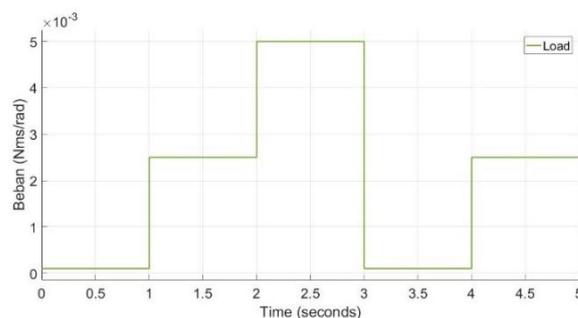
Gambar 16. Grafik Ki terhadap RMSE, RMSU, dan J pada pencarian parameter Ki

Dilihat dari TABEL 5 dan TABEL 6., nilai parameter yang menghasilkan nilai minimal pada fungsi objektif J yaitu $K_p = 1.75$ dan $K_i = 4.125$.

B. Simulasi

Simulasi yang dilakukan pada penelitian ini yaitu simulasi motor BLDC dengan kondisi beban yang berubah

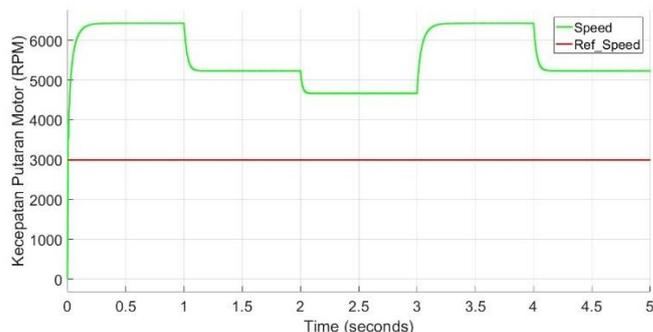
dan dengan *set point* sebesar 5 volt (maksimal). Simulasi ini dijalankan dalam dua skenario yaitu tanpa *PI controller* (daur terbuka) dan dengan *PI controller* (daur tertutup).



Gambar 17. Variasi beban

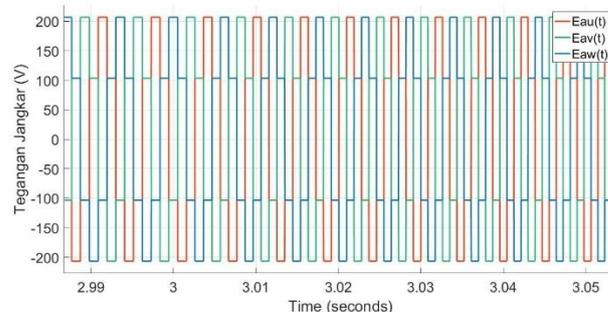
Waktu simulasi yang digunakan yaitu selama lima detik. Pada Gambar 17 di atas, dapat dilihat perubahan nilai beban motor terjadi pada $t = 1$ detik, $t = 2$ detik, $t = 3$ detik, dan $t = 4$ detik. Berikut ini adalah hasil simulasi motor BLDC.

1. Simulasi Tanpa *PI controller*



Gambar 18. Kecepatan putaran pada simulasi tanpa *PI controller*

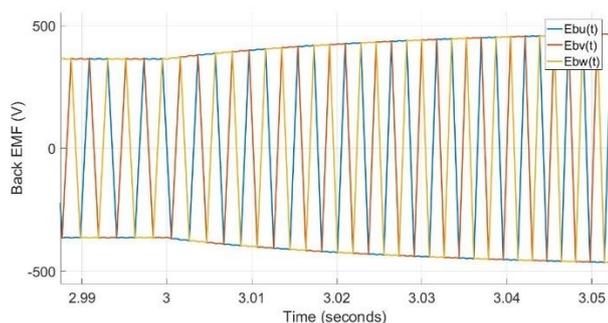
Dapat dilihat pada Gambar 18, nilai referensi kecepatan yang digunakan yaitu 3000 rpm (*set point* 5 volt). Output kecepatan putaran pada kondisi tanpa *PI controller* ini terlihat jauh melampaui referensi dan berubah ketika terjadi perubahan beban.



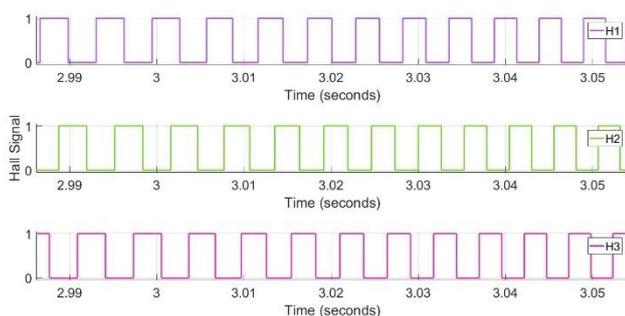
Gambar 19. Tegangan jangkar pada simulasi tanpa *PI controller*

Pada Gambar 19 di atas, dapat dilihat tegangan jangkar konstan pada nilai maksimal. Hal ini menandakan bahwa

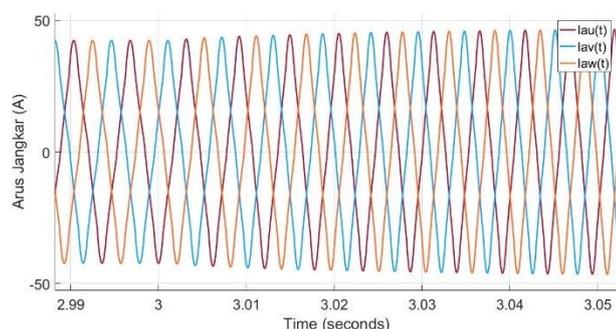
tidak terjadi penyesuaian tegangan jangkar terhadap perubahan beban.



Gambar 20. Back EMF pada simulasi tanpa PI controller

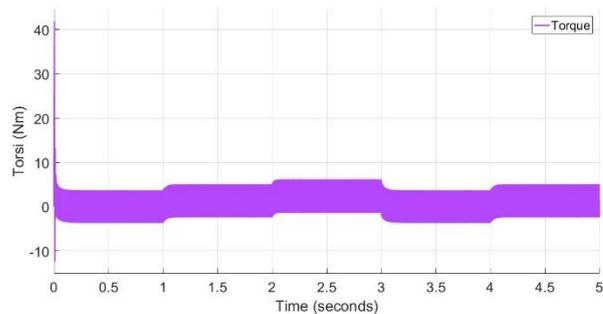


Gambar 21. Hall signal pada simulasi tanpa PI controller



Gambar 22. Arus jangkar pada simulasi tanpa PI controller

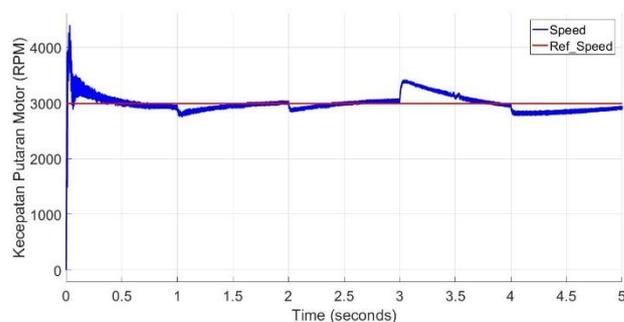
Dapat dilihat pada Gambar 20, Gambar 21, dan Gambar 22, terjadi perubahan pada saat $t = 3$ detik. Terjadi peningkatan pada *back EMF* dan arus jangkar, sedangkan pada *hall signal* terjadi perubahan frekuensi. Hal ini terjadi karena adanya perubahan beban pada motor. Motor BLDC tidak dapat mempertahankan kondisinya sehingga mengakibatkan perubahan pada parameter output motor.



Gambar 23. Torsi motor pada simulasi tanpa PI controller

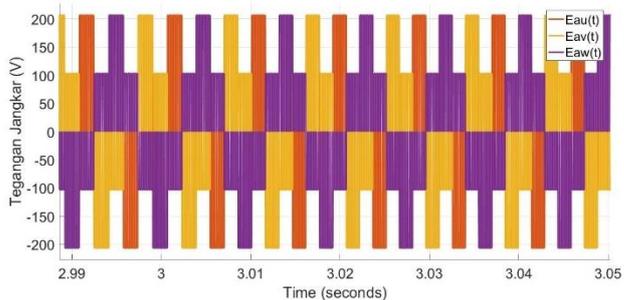
Pada Gambar 23 dapat dilihat nilai torsi yang dihasilkan oleh motor. Di saat *starting* nilai torsi mula-mula besar lalu kemudian menurun ketika motor mencapai keadaan *steady state*. Kemudian terdapat juga perubahan torsi ketika beban berubah.

2. Simulasi dengan PI controller

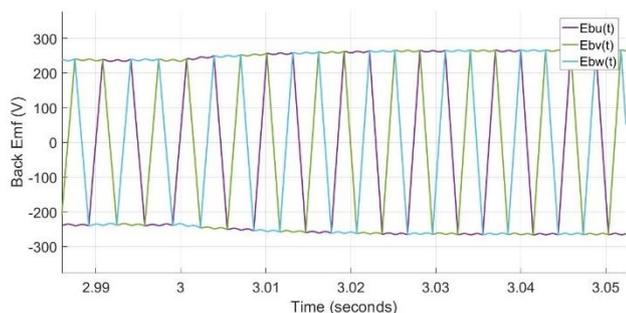


Gambar 24. Output kecepatan putaran motor pada simulasi dengan PI controller

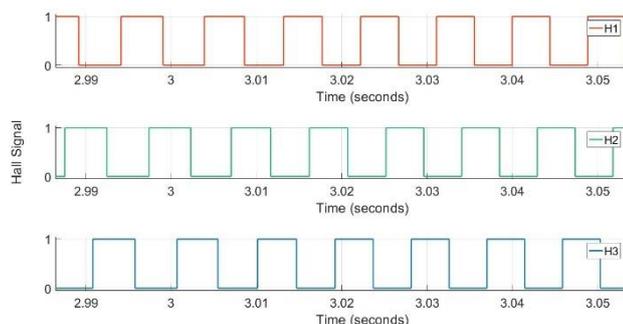
Gambar 25 menunjukkan output kecepatan putaran motor dengan menggunakan PI controller. Dapat dilihat bahwa nilai output kecepatan mendekati nilai referensi dan dapat mempertahankan kondisinya ketika terjadi perubahan beban. Hal ini terjadi karena terdapat penyesuaian pada besar tegangan akibat adanya PI controller.



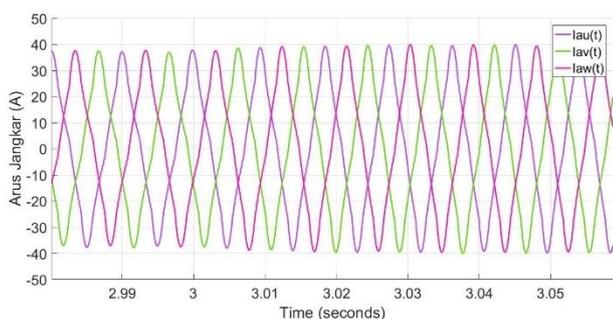
Gambar 25. Tegangan jangkar pada simulasi dengan PI controller



Gambar 26. Back EMF pada simulasi dengan *PI controller*

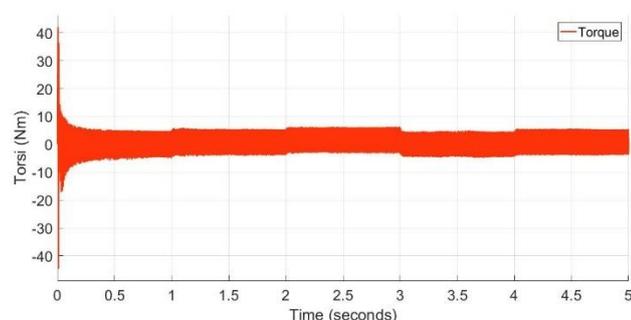


Gambar 27. Hall signal pada simulasi dengan *PI controller*



Gambar 28. Arus jangkar pada simulasi dengan *PI controller*

Gambar 26, Gambar 27, dan Gambar 28 menunjukkan output *back EMF*, *hall signal*, dan arus jangkar. Berbeda dengan output pada simulasi tanpa *PI controller*, pada gambar tersebut hanya terdapat perubahan yang kecil pada parameter *back EMF*, *hall signal*, dan arus jangkar.



Gambar 29. Torsi motor pada simulasi dengan *PI controller*

Gambar 29 di atas menunjukkan torsi motor pada simulasi dengan *PI controller*. Dapat dilihat bahwa masih

terdapat perubahan pada torsi ketika terjadi perubahan beban. Hal ini menunjukkan *PI controller* pada struktur pengendali kecepatan belum efektif untuk mengendalikan torsi sehingga dibutuhkan struktur yang berbeda.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini dihasilkan model sistem kendali motor BLDC menggunakan metode *six step commutation* dimana pada sistem disematkan pengendali kecepatan daur tertutup menggunakan *PI controller*. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan didapatkan performa motor menjadi lebih baik setelah ditambahkan *PI controller* dibanding dengan tanpa *PI controller* dengan nilai parameter K_p dan K_i yang terbaik yaitu pada nilai $K_p = 1.75$ dan $K_i = 4.125$ dan dengan nilai $RMSE = 49.91$; $RMSU = 244.6$; dan $J = 249.6401$.

Penelitian ini dapat dikembangkan lebih jauh dengan menambahkan struktur pengendali bertingkat untuk pengendalian torsi motor. Selain itu, untuk mendapatkan hasil yang lebih merepresentasikan kondisi sistem yang sebenarnya dapat dilakukan pengukuran parameter sistem yang akan dimodelkan.

REFERENSI

- [1] S. C. S. dan J. T. Kuncheria, "Modelling and Simulation of Four Quadrant Operation of Three Phase Brushless DC Motor With Hysteresis Current Controller," *IJAREEIE*, vol. 2, no. 6, pp. 2320-3765, 2013.
- [2] J. C. Gamazo, E. Vazquez dan J. Gomez, "Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends," *Sensors*, pp. 6901-6947, 2010.
- [3] R. J. Masood, D. B. Wang, Z. A. Ali dan K. Babar, "DDC Control Techniques for Three-Phase BLDC Motor Position Control," *Algorithms*, 2017.
- [4] A. Tashakori, M. Ektesabi dan N. Hosseinzadeh, "Modeling of BLDC Motor with Ideal Back-EMF for Automotive Applications," dalam *World Congress on Engineering*, London, 2011.
- [5] A. P. C. Rao, Y. P. Obulesh dan C. Saibabu, "Mathematical Modeling of BLDC Motor with Closed Loop Speed Control Using PID Controller Under Various Loading Conditions," *APRN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, pp. 1321-1328, 2012.
- [6] A. Dharmawan, "Pengendalian Motor Brushless DC dengan Metode PWM Sinusoidal menggunakan ATMEGA16," Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [7] B. Singh dan R. Kumar, "Solar PV Array Fed Brushless DC Motor Driven Water Pump," dalam *IEEE 6th International Conference on Power System (ICPS)*, Delhi, 2016.
- [8] V. Hubik, M. Sveda dan V. Singule, "On The Development of BLDC Motor Control Run-Up Algorithms for Aerospace Application," dalam *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Poznan, 2008.
- [9] M.-F. Tsai, T. P. Quy, B.-F. Wu dan C.-S. Tseng, "Model Construction and Verification of a BLDC Motor Using MATLAB/SIMULINK and FPGA Control," dalam *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, 2011.
- [10] J. D. Irwin, *Power Electronics Handbook*, Florida: Academic Press, 2001.