

Sistem Kendali Kecepatan Motor *Brushless DC* (BLDC) dengan Pengendali PI

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 panjang, 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 dengan pengendali PI pada *Simulink/MATLAB*. Metode komutasi yang digunakan yaitu metode *six step commutation*. Untuk menentukan nilai K_p dan K_i terbaik, dilakukan pencarian nilai terkecil dari fungsi tujuan J berdasarkan hasil simulasi motor BLDC dengan gangguan. Didapatkan nilai K_p dan K_i terbaik yaitu $K_p = 1,1$ dan $K_i = 0,2$ dengan nilai $J = 0,412679$. Berdasarkan hasil simulasi, dengan nilai K_i dan K_p tersebut performa sistem dengan pengendali PI lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa pengendali PI.

Kata kunci—motor BLDC, pengendali PI, *six step commutation*, fungsi tujuan.

I. PENDAHULUAN

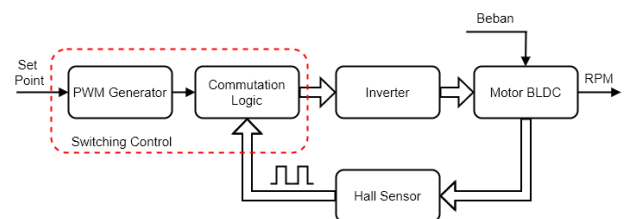
Seiring bertambah pesatnya perkembangan teknologi, kebutuhan akan penggunaan motor BLDC sebagai aktuator pada suatu sistem semakin meningkat. Motor BLDC telah banyak digunakan di berbagai bidang, seperti otomasi industri, komputer, otomotif, penerbangan, dan peralatan rumah tangga [1] [2], karena memiliki kepadatan daya, keandalan, dan efisiensi yang tinggi, perawatan yang rendah, tingkat kebisingan rendah dan umur operasi yang lebih panjang 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 pengendali PI 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, digunakan motor yang dilengkapi dengan *hall sensor* untuk mendeteksi posisi rotor. Berikut ini merupakan diagram blok sistem penggerak motor BLDC secara umum.

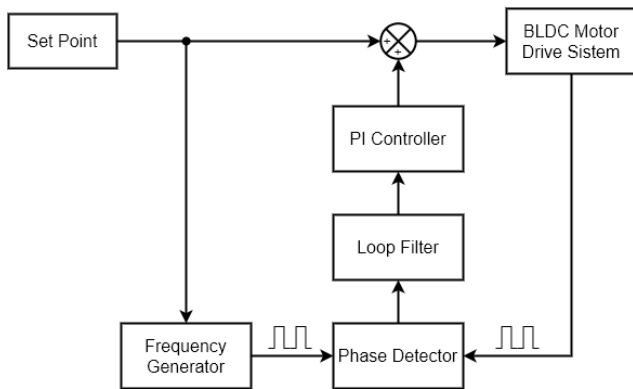


Gambar 1. Diagram blok sistem penggerak motor BLDC

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 *Commutation Logic*.

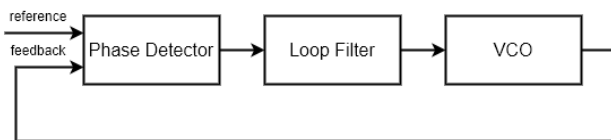
Dapat dilihat pada diagram di atas terdapat blok *PWM Generator*. Blok *PWM Generator* ini berfungsi untuk membangkitkan sinyal PWM dimana *duty cycle* sinyal PWM yang dibangkitkan diatur oleh nilai tegangan *Set Point*. Sinyal PWM ini kemudian diteruskan ke enam buah MOSFET yang terdapat pada *inverter* oleh blok *Commutation Logic*. Sinyal PWM akan digunakan untuk memodulasi tegangan input yang akan masuk ke motor dari blok *Inverter*.

Algoritma pengendalian kecepatan dengan pengendali PI kemudian disematkan pada sistem penggerak motor BLDC tersebut sebagai pengendali daur tertutup untuk mengendalikan kecepatan motor pada saat motor menerima gangguan beban. Struktur pengendali kecepatan motor BLDC daur tertutup menggunakan pengendali PI ditunjukkan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Struktur pengendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI

Struktur tersebut di atas mengadopsi struktur kendali *phase locked loop* (PLL) yang banyak digunakan pada bidang telekomunikasi untuk penyesuaian fasa dan frekuensi sinyal. Struktur dasar dari PLL yaitu terdiri dari: (1) *phase detector*, berfungsi untuk mendeteksi perbedaan fasa antara sinyal referensi dengan sinyal *feedback*; (2) *loop filter*, berfungsi untuk mengubah sinyal error yang berasal dari *phase detector* menjadi sinyal tegangan DC; dan (3) *voltage controlled oscillator* (VCO), sebagai pembangkit sinyal dimana frekuensi sinyal yang dihasilkan sebanding dengan tegangan inputnya [7].

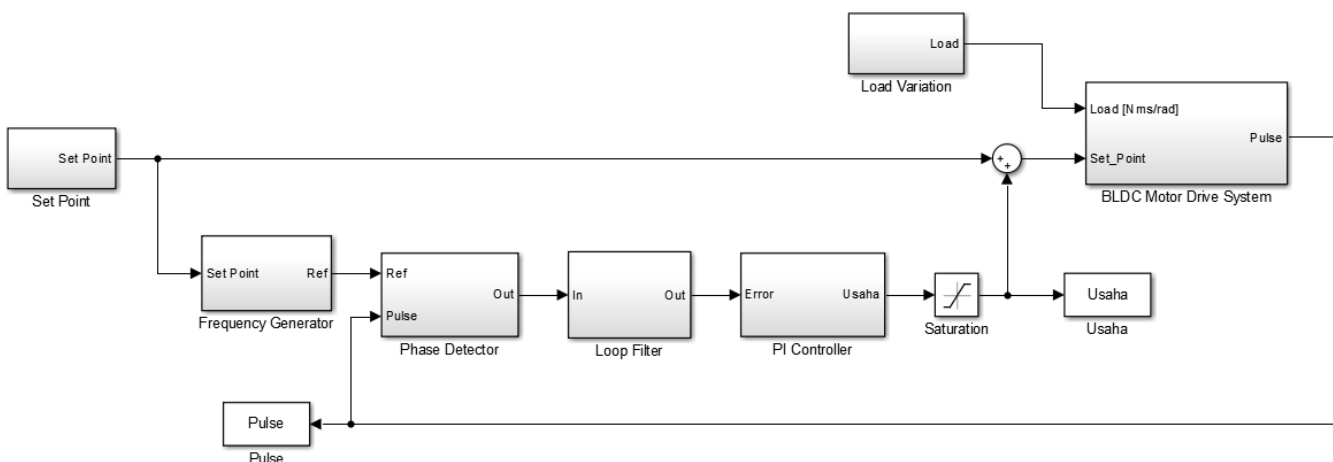


Gambar 3. Struktur dasar PLL

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa blok *BLDC Motor Drive System* berperan sebagai VCO pada struktur PLL seperti pada Gambar 3 dimana input dari *BLDC Motor Drive System* berupa tegangan dan outputnya berupa sinyal pulsa. *Feedback* dan sinyal referensi yang digunakan pada sistem ini berupa sinyal pulsa. Sinyal *feedback* ini berasal dari sinyal *hall sensor* pada blok *BLDC Motor Drive System*. Sedangkan sinyal referensi berasal dari blok *Frequency Generator*. Blok *Frequency Generator* berfungsi sebagai pembangkit sinyal pulsa dimana frekuensi sinyal pulsa yang dihasilkan diatur berdasarkan nilai tegangan *Set Point*. Sinyal *feedback* dan sinyal referensi kemudian dibandingkan menggunakan blok *Phase Detector*. Jika sinyal *feedback* tidak sesuai dengan sinyal referensi, maka *Phase Detector* akan mengeluarkan sinyal error berupa pulsa. Sinyal error ini kemudian diubah menjadi bentuk sinyal tegangan DC lalu menuju blok *PI controller*. Keluaran dari blok *PI controller* ini akan mengubah besar tegangan *set point* berdasarkan sinyal error yang diterima.

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. Gambar 4 berikut ini merupakan model sistem kendali motor BLDC dengan pengendali PI secara keseluruhan.



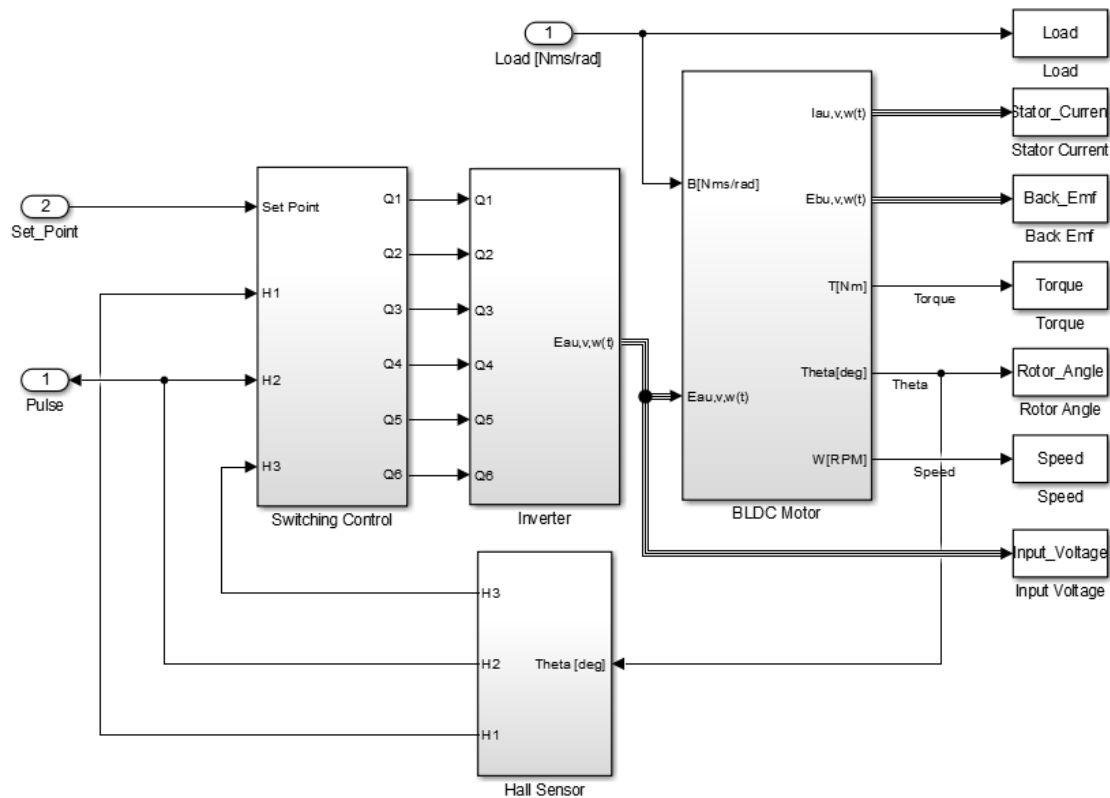
Gambar 4. Model sistem kendali kecepatan motor BLDC

A. BLDC Motor Drive System

Blok *BLDC Motor Drive System* merupakan blok penggerak motor BLDC yang terdiri atas empat blok subsistem yaitu blok Motor BLDC, blok Inverter, blok *Hall Sensor*, dan blok *Switching Control*. Blok *BLDC Motor Drive System* ini memiliki dua buah input yaitu *Load* atau beban dan *Set Point*, dan satu output yaitu *Pulse* yang berupa sinyal pulsa yang berasal dari *Hall Sensor*. Berikut ini merupakan model blok *BLDC Motor Drive System*.

1) 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].

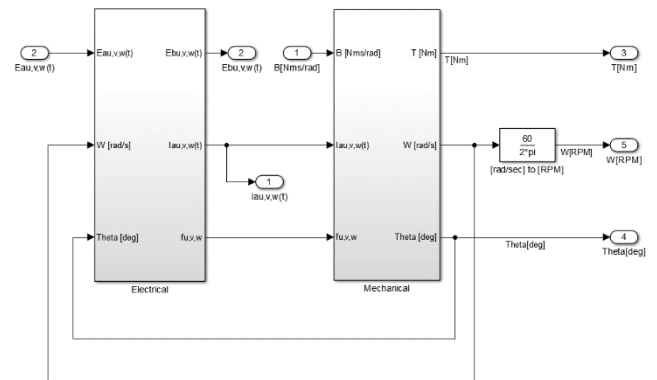


Gambar 5. Model blok BLDC Motor Drive System

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 [8]. Berikut ini adalah implementasi model motor BLDC pada Simulink/MATLAB.

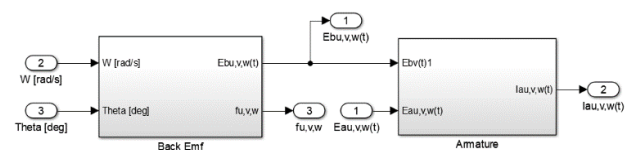
TABEL 1.
SPESIFIKASI MOTOR BLDC [9]

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



Gambar 6. Model blok motor BLDC

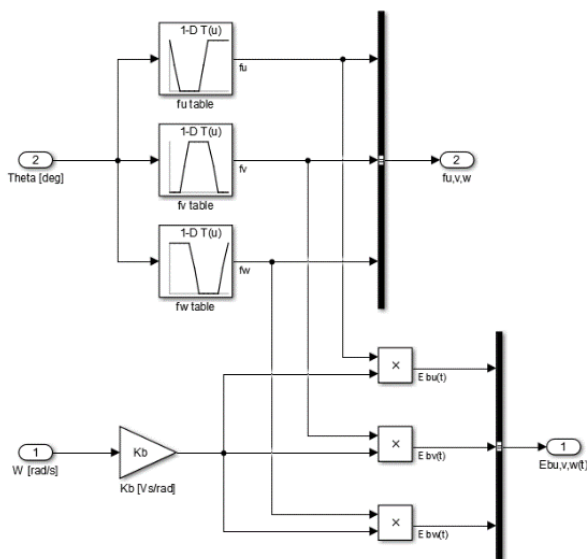
Model elektrik motor BLDC dibangun menggunakan dua blok yaitu blok *armature* dan blok *back EMF*. Blok *armature* berisi model persamaan diferensial komponen elektrik dari motor BLDC [4]. Sedangkan blok *back EMF* berisi model *back EMF* motor BLDC yang merupakan fungsi sudut rotor yang berbentuk trapezoid [10]. Berikut ini adalah tabel fungsi *back EMF* sebagai fungsi sudut rotor.



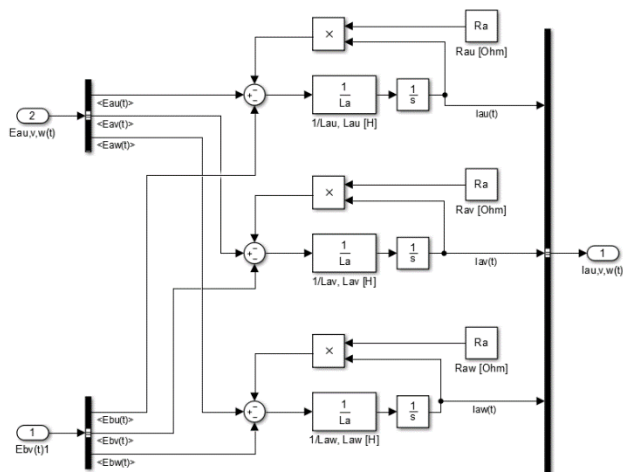
Gambar 7. Model blok komponen elektrik

TABEL 2.
MODEL *BACK EMF* SEBAGAI FUNGSI SUDUT ROTOR [10]

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	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 11$

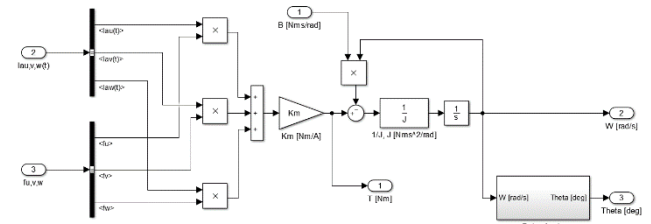


Gambar 8. Model blok *back EMF*

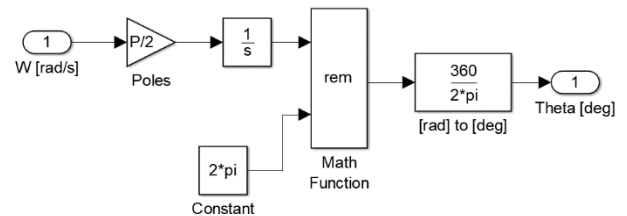


Gambar 9. Model blok *armature*

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



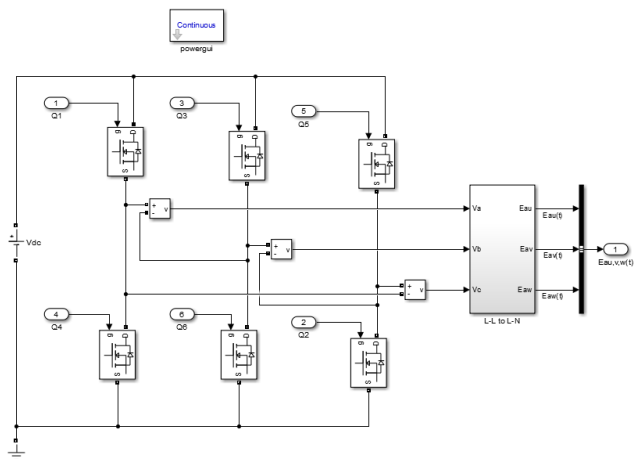
Gambar 10. Model blok komponen mekanik



Gambar 11. Model blok *rotor angle*

2) Inverter

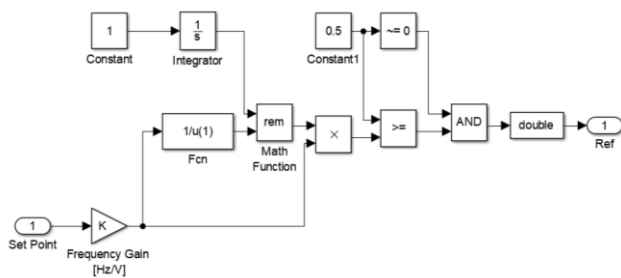
Catu daya pada motor BLDC menggunakan inverter tiga fasa. Inverter tiga fasa terdiri atas enam buah *MOSFET* yang dirangkai berpasangan sehingga menghasilkan keluaran tegangan tiga fasa. Pola pensaklaran keenam *MOSFET* ini diatur oleh blok *Commutation Logic* berdasarkan *hall signal*. Berikut ini adalah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



Gambar 12. Model blok inverter

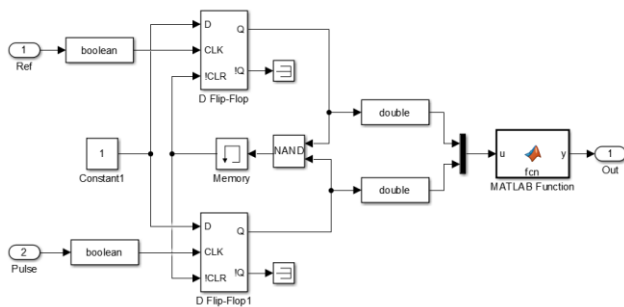
Seperti yang terlihat pada Gambar 12, tegangan keluaran dari inverter berupa tegangan *line to line*, sedangkan untuk menggerakkan beban motor yang terhubung *wye* dibutuhkan tegangan *line to neutral*. Oleh karena itu dibutuhkan blok *LL to LN* untuk mengubah tegangan *line to line* menjadi *line to neutral* [11].

besarnya ditentukan berdasarkan nilai input *Set Point*. Berikut ini merupakan model blok *frequency generator*.



C. Phase Detector

Gambar 17 berikut ini merupakan model blok *Phase Detector*.

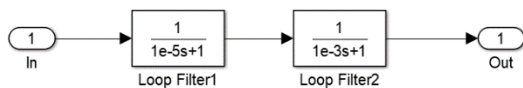


Gambar 17. Model blok *Phase Detector*

Blok *Phase Detector* berfungsi untuk mendeteksi perbedaan fasa antara sinyal referensi dengan sinyal *feedback*. Blok ini dibangun menggunakan dua buah *D-flip flop* yang berfungsi untuk mendeteksi apakah frekuensi sinyal *feedback* lebih besar atau lebih kecil dari sinyal referensi. Kemudian terdapat blok *MATLAB function* yang berfungsi untuk mengatur agar sinyal keluaran *Phase Detector* bernilai negatif apabila frekuensi sinyal *feedback* lebih besar dari frekuensi sinyal referensi dan sebaliknya. Sehingga keluaran blok *Phase Detector* menghasilkan sinyal pulsa dengan rentang nilai -1 sampai 1.

D. Loop Filter

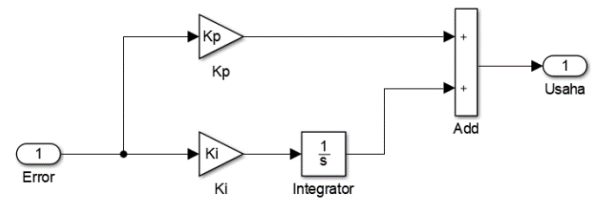
Loop filter pada sistem PLL berfungsi untuk mengubah nilai error sehingga berupa tegangan DC. Pada blok ini digunakan dua buah *low pass filter* orde satu.



Gambar 18. Model blok *Loop Filter*

E. PI Controller

Blok *PI Controller* ini dibangun menggunakan dua buah blok gain dan sebuah blok *integrator* sebagai komponen pengendali. Blok ini akan menghasilkan usaha berupa tegangan berdasarkan sinyal error yang diterimanya.



Gambar 19. Model blok *PI Controller*

IV. HASIL

A. Pengujian dengan Gangguan

Dalam pencarian parameter pengendali PI, dilakukan simulasi pengujian gangguan dimana motor diberikan gangguan berupa variasi beban dengan nilai *Set Point* konstan. Pada simulasi tersebut, dilakukan pengukuran dua parameter yaitu error dan usaha. Error adalah selisih antara nilai kecepatan referensi dengan kecepatan yang sebenarnya dan usaha adalah usaha yang diberikan oleh pengendali PI untuk mengurangi nilai error.

Kemudian untuk menentukan nilai K_p dan K_i terbaik, dibuat fungsi tujuan J berdasarkan nilai RMS dari Error dan Usaha. Nilai K_p dan K_i yang terbaik adalah nilai K_p dan K_i yang menghasilkan nilai J yang paling kecil. Berikut ini adalah fungsi tujuan J .

$$J = \sqrt{(p \times RMSE)^2 + (q \times RMSU)^2} \quad (1)$$

Keterangan:

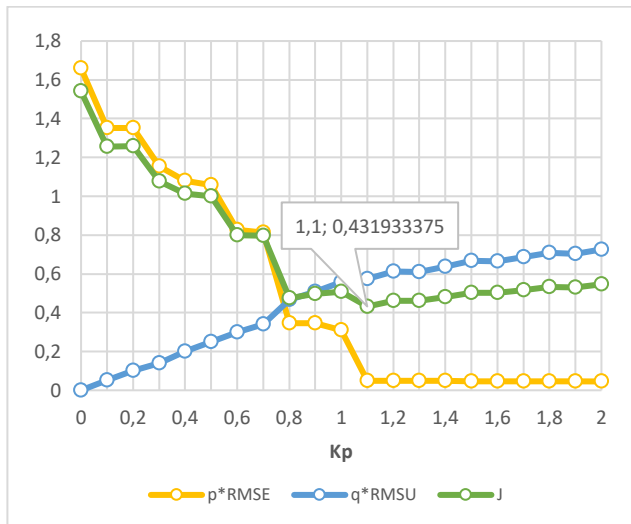
- J = fungsi tujuan
- RMSE = nilai RMS dari Error (rpm)
- RMSU = nilai RMS dari Usaha (V)
- p = koefisien RMSE = $1/\text{Error}_{\max}$
- q = koefisien RMSU = $1/\text{Usaha}_{\max}$

Berikut ini adalah tabel dan grafik hasil pencarian nilai K_p dan K_i terbaik.

TABEL 5.
DATA HASIL PENCARIAN PARAMETER K_p

No	K_p	K_i	$p \cdot RMSE$	$q \cdot RMSU$	J
1	0	0	1,658833	0	1,540345
2	0,1	0	1,352257	0,05085	1,256246
3	0,2	0	1,352257	0,101701	1,257981
4	0,3	0	1,154997	0,139608	1,077596
5	0,4	0	1,08082	0,199476	1,014708
6	0,5	0	1,057544	0,250094	0,999758
7	0,6	0	0,825884	0,297872	0,79877
8	0,7	0	0,812507	0,33898	0,796154
9	0,8	0	0,345294	0,467587	0,475171
10	0,9	0	0,345423	0,508291	0,498205
11	1	0	0,310135	0,557051	0,507426
12	1,1	0	0,049661	0,57262	0,431933
13	1,2	0	0,049503	0,611333	0,460798

14	1,3	0	0,047712	0,61047	0,459991
15	1,4	0	0,047966	0,637822	0,480436
16	1,5	0	0,047476	0,666155	0,501558
17	1,6	0	0,046524	0,665608	0,501072
18	1,7	0	0,04631	0,685345	0,515804
19	1,8	0	0,046148	0,707695	0,532498
20	1,9	0	0,046594	0,703639	0,5295
21	2	0	0,045498	0,725896	0,546059

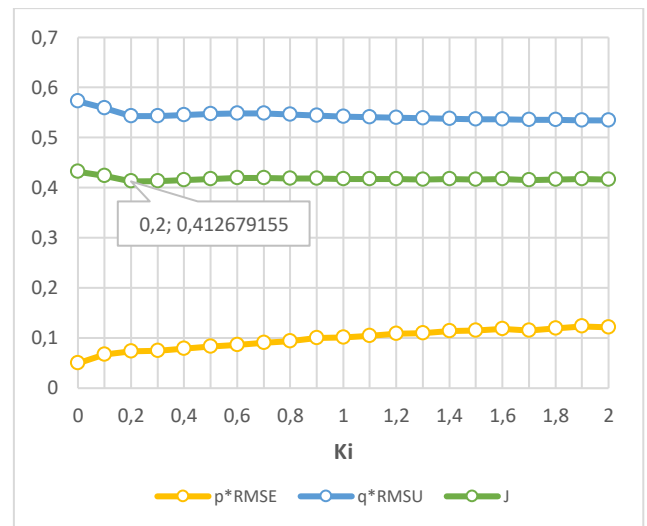


Gambar 20. Grafik K_p terhadap p^*RMSE , p^*RMSU , dan J pada pencarian nilai K_p

TABEL 6.
DATA HASIL PENCARIAN PARAMETER K_i

No	K_p	K_i	p^*RMSE	q^*RMSU	J
1	1,1	0	0,049661	0,57262	0,431933
2	1,1	0,1	0,066975	0,559118	0,423925
3	1,1	0,2	0,073848	0,542589	0,412679
4	1,1	0,3	0,074803	0,542769	0,41296
5	1,1	0,4	0,079068	0,545348	0,415548
6	1,1	0,5	0,083407	0,547077	0,417554
7	1,1	0,6	0,086735	0,548303	0,41904
8	1,1	0,7	0,09054	0,548479	0,419863
9	1,1	0,8	0,093531	0,545794	0,418457
10	1,1	0,9	0,099681	0,543696	0,418146
11	1,1	1	0,101339	0,541952	0,417215
12	1,1	1,1	0,104713	0,540576	0,416928
13	1,1	1,2	0,108662	0,539508	0,417021
14	1,1	1,3	0,109335	0,538383	0,416355
15	1,1	1,4	0,114125	0,537635	0,416919
16	1,1	1,5	0,115567	0,536931	0,416751
17	1,1	1,6	0,118455	0,536388	0,417057

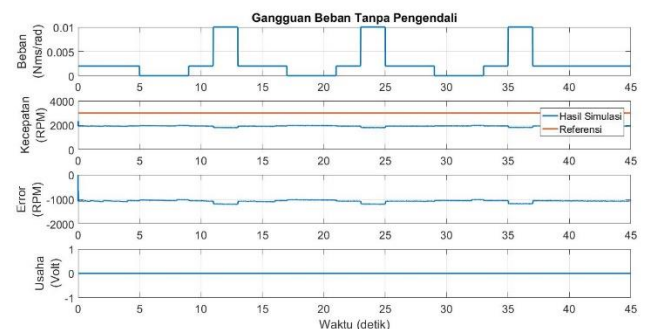
18	1,1	1,7	0,115209	0,535643	0,415732
19	1,1	1,8	0,119364	0,53535	0,41653
20	1,1	1,9	0,123136	0,534902	0,417153
21	1,1	2	0,121017	0,5344	0,416255



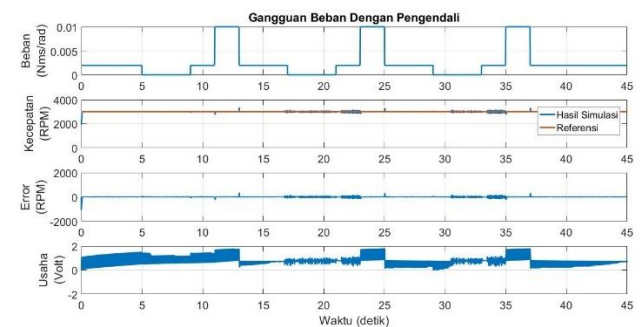
Gambar 21. Grafik K_i terhadap $RMSE$, $RMSU$, dan J pada pencarian parameter K_i

Dilihat dari TABEL 5 dan TABEL 6., nilai parameter K_p dan K_i terbaik berdasarkan fungsi tujuan J yaitu $K_p = 1,1$ dan $K_i = 0,2$.

Berikut ini adalah adalah hasil simulasi gangguan tanpa pengendali PI dan hasil simulasi dengan pengendali PI dengan menggunakan nilai K_p dan K_i terbaik.



Gambar 22. Hasil simulasi gangguan tanpa pengendali PI

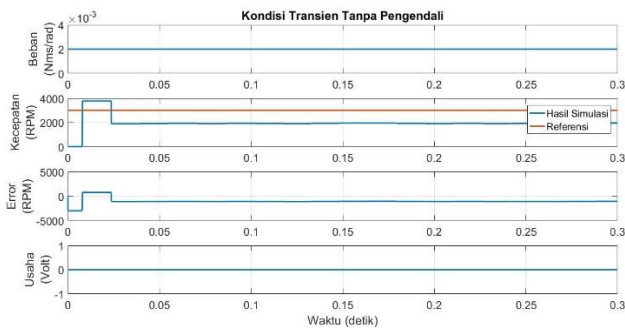


Gambar 23. Hasil simulasi gangguan dengan pengendali PI

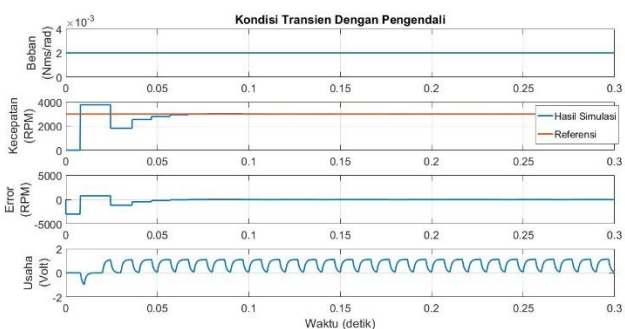
Gambar di atas menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap respon kecepatan motor BLDC setelah menggunakan pengendali PI dimana RMSE berubah dari 1078,242 menjadi 48,001.

B. Pengujian Kondisi Transien

Dari pengujian akan didapatkan perbandingan respon transien motor pada saat tanpa pengendali PI dengan pada saat tanpa pengendali PI.



Gambar 24. Hasil simulasi kondisi transien motor BLDC tanpa pengendali PI

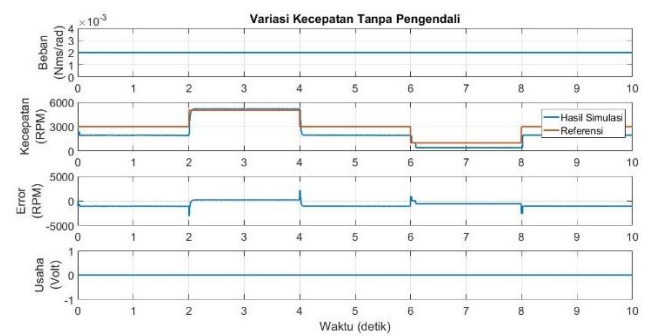


Gambar 25. Hasil simulasi kondisi transien motor BLDC dengan pengendali PI

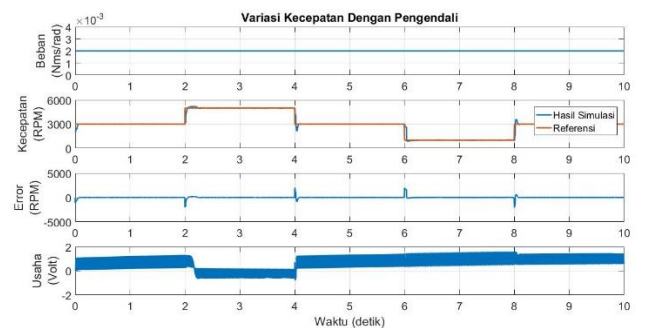
Pada Gambar 25 terlihat bahwa nilai *steady state error* dari sistem setelah menggunakan pengendali PI lebih baik dibandingkan dengan tanpa pengendali PI dimana nilainya menurun dari 2000 rpm menjadi 0 rpm, tetapi memiliki waktu respon yang lebih lama dibanding tanpa pengendali PI dimana waktu respon sistem dengan pengendali PI yaitu sebesar 0,07 detik sedangkan waktu respon tanpa pengendali PI yaitu sebesar 0,025 detik.

C. Pengujian Variasi Kecepatan

Pada pengujian ini diterapkan *Set Point* berubah untuk memberikan kecepatan referensi yang berubah sepanjang simulasi. Tujuan pengujian ini adalah untuk melihat respon kecepatan motor terhadap perubahan referensi kecepatan.



Gambar 26. Hasil simulasi variasi kecepatan tanpa pengendali PI

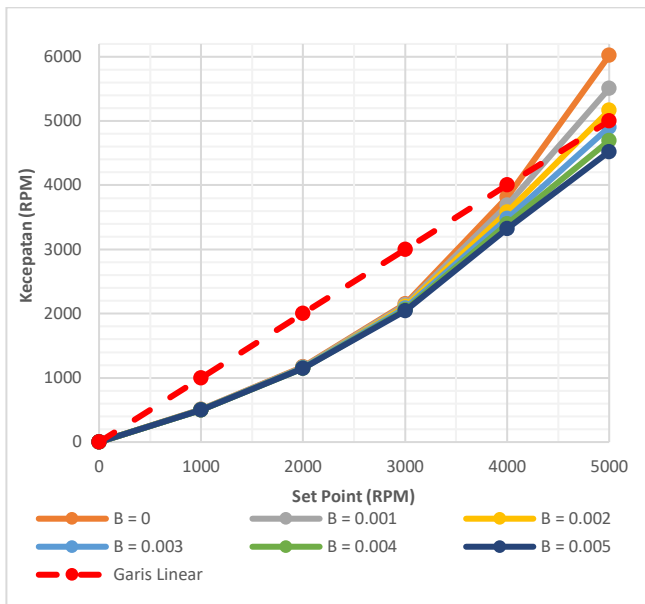


Gambar 27. Hasil simulasi pengujian kecepatan dengan pengendali PI

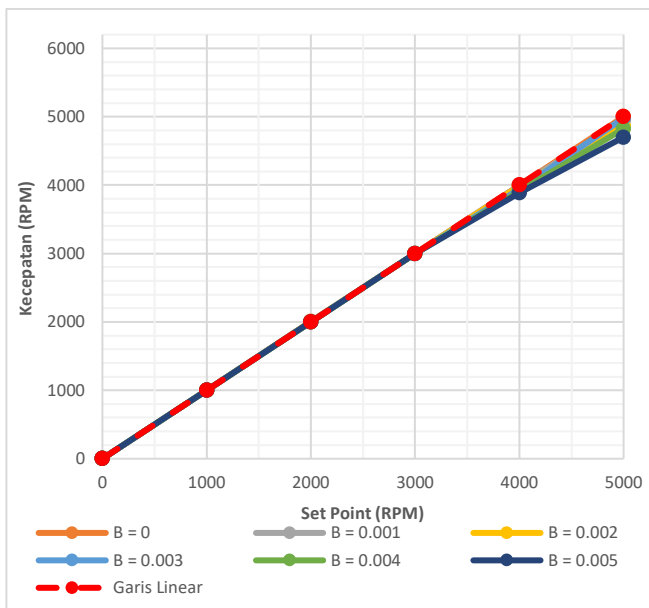
Dapat dilihat pada Gambar 26 dan Gambar 27 perbandingan hasil simulasi variasi kecepatan tanpa pengendali dan dengan pengendali, respon kecepatan motor BLDC tanpa pengendali tidak dapat mengikuti perubahan referensi kecepatan yang diberikan. Lalu kemudian respon kecepatan motor BLDC menjadi lebih baik setelah penambahan pengendali PI pada sistem.

D. Pengujian Karakteristik Pembebanan Motor

Pengujian ini dilakukan dengan menyimulasikan motor pada rentang kecepatan tertentu pada nilai beban yang berbeda-beda pada kondisi tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI. Berikut ini adalah perbandingan karakteristik pembebanan motor BLDC tanpa menggunakan pengendali PI dengan menggunakan pengendali PI.



Gambar 28. Grafik karakteristik pembebanan motor BLDC tanpa pengendali PI



Gambar 29. Grafik karakteristik pembebanan motor BLDC dengan pengendali PI

Pada Gambar 28 terlihat bahwa motor tidak linear dimana grafik menjauhi garis linear. Sedangkan pada Gambar 29 grafik merapat menuju ke garis linear pada rentang kecepatan 0 - 3000 rpm. Kemudian terjadi sedikit perbedaan pada rentang kecepatan 3000 - 5000 rpm untuk beban 0,004 Nms/rad dan 0,005 Nms/rad. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali yang disematkan pada sistem telah berhasil melinearkan motor.

V. KESIMPULAN

Setelah melakukan penelitian sistem kendali kecepatan motor BLDC, maka dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Telah dihasilkan model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan metode komutasi *six step* dan

dengan menyematkan pengendali PI dengan struktur PLL sebagai pengendali kecepatan daur tertutup.

2. Nilai K_p dan K_i terbaik yang didapatkan berdasarkan nilai J yang terkecil yaitu $K_p = 1,1$ dan $K_i = 0,2$ dengan $J = 0,412679$.
3. Respon terhadap gangguan menjadi lebih baik dimana RMSE turun dari 1078,242 menjadi 48,001.
4. Nilai *steady state error* pada kondisi transien menurun dari 2000 rpm menjadi 0 rpm sedangkan kecepatan respon lebih lambat dari 0,0025 detik menjadi 0,007 detik.
5. Respon terhadap variasi kecepatan menjadi lebih baik dengan nilai RMSE berubah dari 890,2436 menjadi 192,0067.
6. Menggunakan pengendalian PI dapat melinearkan motor.

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] M. B. Hamed dan L. Sbita, "Digital Phase Locked Loop Induction Motor Speed Controller: Design and Experiments," *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, no. 20, pp. 159-174, 2012.
- [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] 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.
- [10] 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.
- [11] J. D. Irwin, *Power Electronics Handbook*, Florida: Academic Press, 2001.