

**SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DC* (BLDC) DENGAN
PENGENDALI PI**



*Disusun Dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Persyaratan Untuk
Menyelesaikan Program Strata-1 Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin Makassar*

DISUSUN OLEH:

ANDI FAUZAN ALIM

D41116315

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2020**

LEMBAR PENGESAHAN

SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DC* (BLDC) DENGAN PENGENDALI PI

Disusun oleh:

Andi Fauzan Alim

D41116315

Disusun dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk menyelesaikan
Program Strata-1 pada Sub-Program Teknik Kendali
Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin

Makassar, 11 November 2020

Disahkan oleh:

Pembimbing I

Pembimbing II

Dr. Ir. H. Rhiza S. Sadjad, MSEE.
NIP. 19570906 198203 1 004

Dr. A. Ejah Umraeni Salam, S.T., M.T.
NIP. 197209081997022001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.
NIP. 19691026 199412 2 001

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*. Struktur pengendali PI yang digunakan mengadopsi struktur sistem PLL, dimana sinyal *feedback* dan sinyal referensi yang digunakan berupa sinyal pulsa. Metode komutasi yang digunakan yaitu metode *six step commutation*. Pencarian nilai K_p dan K_i terbaik dilakukan dengan menggunakan metode nilai optimal fungsi tujuan dimana nilai K_p dan K_i terbaik adalah nilai K_p dan K_i yang menghasilkan nilai optimal fungsi tujuan J . Dari hasil simulasi pengujian yang telah dilakukan, 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.

ABSTRACT

BLDC motors are widely used in various fields such as industrial automation, automotive, computers, aviation and household appliances due to their high efficiency, high power density, long operating life and low maintenance costs. A BLDC motor works without using a brush as a means of commutation, but using electronic commutation. This resulted in BLDC motors requiring a more complex control system. In this research, a speed control system of BLDC motors modeled in Simulink/MATLAB. The PI controller structure adopts the PLL system structure, where the feedback signal and reference signal used are pulse signals. The commutation method used is six step commutation. Method that we used in searching the best value of K_p and K_i is the optimal objective function value method where the value best of K_p and K_i is the value that produces the optimal value of objective function. From the results of the simulation tests that have been carried out, the best values for K_p and K_i are $K_p = 1.1$ and $K_i = 0.2$ with a value of $J = 0.412679$. Based on the simulation results, with the K_i and K_p , the system performance with PI controller is better than the system without PI controller.

Keywords: BLDC motor, PI controller, six step commutation, objective function.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya kepada kami sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik dan lancar. Penyusunan tugas akhir ini dilakukan dalam rangka pemenuhan salah satu syarat menutup Program Strata-1 Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tak lupa pula kami mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah meluangkan waktunya untuk membantu selama masa perkuliahan hingga pada proses penyelesaian tugas akhir ini.

Kami selaku pelaku penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kesalahan dan kekurangan serta masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kami membuka kesempatan kepada pembaca untuk memberikan kritik dan saran yang membangun untuk perkembangan penelitian ini dan perkembangan diri penulis sendiri. Semoga kesalahan dan kekurangan tersebut dapat menjadi pelajaran bagi kita semua.

Akhir kata, melalui tugas akhir ini kami berharap dapat turut serta dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta dapat dimanfaatkan untuk kemaslahatan umat. Semoga apa yang telah kita usahakan dapat bernilai ibadah dan mendapatkan berkah dari-Nya.

Makassar, 10 November 2020

Andi Fauzan Alim

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah	2
1. 3 Tujuan Penelitian	3
1. 4 Batasan Masalah	3
1. 5 Manfaat Penelitian	3
1. 6 Metode Penelitian	4
1. 7 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2. 1 Motor BLDC	6
2. 2 Inverter Tiga Fasa	9
2. 3 Pengendali PI	10
2. 4 <i>Phase Locked Loop</i>	12

BAB 3	METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN.....	14
3. 1	Gambaran Umum.....	14
3. 2	Perancangan Sistem	15
3. 2. 1	Perancangan Sistem Penggerak Motor BLDC	16
3. 2. 2	Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC.....	17
3. 2. 3	Spesifikasi Motor BLDC.....	19
3. 3	Pemodelan Sistem	20
3. 3. 1	Sistem Penggerak Motor BLDC.....	20
3. 3. 2	<i>Frekuensi Generator</i>	36
3. 3. 3	<i>Phase Detector</i>	37
3. 3. 4	<i>Loop Filter</i>	38
3. 3. 5	<i>PI Controller</i>	38
3. 4	Skenario Pengujian.....	39
3. 4. 1	Pengujian Daur Terbuka.....	39
3. 4. 2	Pengujian dengan Gangguan	40
3. 4. 3	Pengujian Kondisi Transien	41
3. 4. 4	Pengujian Variasi Kecepatan.....	41
3. 4. 5	Pengujian Karakteristik Pembebanan.....	42
BAB 4	HASIL SIMULASI PENGUJIAN	43
4. 1	Hasil Pengujian Daur Terbuka	43

4. 2	Hasil Pengujian dengan Gangguan	47
4. 3	Hasil Pengujian Kondisi Transien.....	52
4. 4	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan.....	53
4. 5	Hasil Pengujian Karakteristik Pembebanan	55
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	57
5. 1	Kesimpulan	57
5. 2	Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konstruksi motor BLDC	7
Gambar 2.2 Skema pengoperasian motor BLDC [3]	8
Gambar 2.3 Rangkaian inverter tiga fasa	9
Gambar 2.4 Diagram blok pengendali PI [8]	11
Gambar 2.5 Diagram blok PLL.....	12
Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian	15
Gambar 3.2 Diagram blok sistem penggerak motor BLDC.....	16
Gambar 3.3 Struktur pengendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI	18
Gambar 3.4 Model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI	20
Gambar 3.5 Model sistem penggerak motor BLDC	21
Gambar 3.6 Model blok motor BLDC	22
Gambar 3.7 Rangkaian ekuivalen motor BLDC	22
Gambar 3.8 Model blok <i>armature</i>	24
Gambar 3.9 Model blok <i>back emf</i>	26
Gambar 3.10 Model blok <i>electrical</i>	26
Gambar 3.11 Putaran rotor pada motor BLDC	27
Gambar 3.12 Model blok <i>mechanical</i>	29
Gambar 3.13 Model blok <i>rotor angle</i>	29
Gambar 3.14 Model blok inverter.....	30
Gambar 3.15 Model blok <i>L-L to L-N</i>	31
Gambar 3.16 Sinyal keluaran <i>hall sensor</i>	32

Gambar 3.17 Model blok <i>hall sensor</i>	33
Gambar 3.18 Model blok <i>switching control</i>	34
Gambar 3.19 Model blok <i>PWM Generator</i>	34
Gambar 3.20 Model blok <i>commutation logic</i>	35
Gambar 3.21 Model blok <i>frequency generator</i>	37
Gambar 3.22 Model blok <i>phase detector</i>	38
Gambar 3.23 Model blok <i>loop filter</i>	38
Gambar 3.24 Model blok <i>PI controller</i>	39
Gambar 4.1 Pola komutasi	44
Gambar 4.2 Keluaran blok motor BLDC.....	46
Gambar 4.3 Grafik hasil pencarian nilai K_p terbaik.....	49
Gambar 4.4 Grafik hasil pencarian nilai K_i terbaik.....	50
Gambar 4.5 Hasil simulasi pengujian gangguan tanpa pengendali PI	51
Gambar 4.6 Hasil simulasi pengujian gangguan dengan pengendali PI	51
Gambar 4.7 Hasil simulasi pengujian kondisi transien tanpa pengendali PI	52
Gambar 4.8 Hasil simulasi pengujian kondisi transien dengan pengendali PI	53
Gambar 4.9 Hasil simulasi pengujian variasi kecepatan tanpa pengendali PI	54
Gambar 4.10 Hasil simulasi pengujian variasi kecepatan dengan pengendali PI	54
Gambar 4.11 Karakteristik pembebanan motor BLDC tanpa pengendali PI	55
Gambar 4.12 Karakteristik pembebanan motor BLDC dengan pengendali PI	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sinyal kontrol inverter [7].....	10
Tabel 3.1 Spesifikasi motor BLDC.....	19
Tabel 3.2 Fungsi sudut rotor motor BLDC [10]	25
Tabel 3.3 Keluaran <i>hall sensor</i> berdasarkan sudut rotor [10].....	32
Tabel 3.4 Pola komutasi motor BLDC.....	35
Tabel 4.1 Hasil pencarian nilai K_p terbaik.....	48
Tabel 4.2 Hasil pencarian nilai K_i terbaik.....	49

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan zaman, kebutuhan akan motor listrik yang andal dan memiliki efisiensi yang tinggi serta perawatan yang rendah semakin meningkat. Motor BLDC merupakan motor yang mampu memenuhi kebutuhan tersebut melampaui motor DC dengan sikat dan motor induksi yang banyak digunakan saat ini. Motor DC dengan sikat memiliki masalah pada sikatnya yang mudah aus dan menyebabkan percikan api pada saat motor beroperasi sehingga meningkatkan biaya perawatan pada motor. Motor induksi dapat menjawab masalah perawatan tersebut tetapi terkendala pada efisiensinya. Motor induksi cenderung memiliki efisiensi yang rendah karena adanya disipasi daya pada kumparan rotornya. Hal ini menyebabkan motor cepat panas [1].

Dibandingkan dengan motor DC dengan sikat dan motor induksi, motor BLDC memiliki beberapa keunggulan seperti karakteristik kecepatan terhadap torsi yang lebih baik, respon dinamik yang tinggi, lebih efisien dan lebih andal, umur operasi yang panjang (karena tidak menggunakan sikat), operasi senyap, rentang kecepatan yang lebih luas serta biaya perawatan yang rendah [2] [3]. Karena keunggulan tersebut, motor BLDC banyak digunakan di berbagai bidang seperti pada bidang otomasi industri, komputer, otomotif, penerbangan, peralatan militer, dan peralatan rumah tangga [2] [4].

Motor BLDC merupakan motor yang bekerja tanpa alat komutasi mekanik seperti sikat pada motor DC dengan sikat, tetapi menggunakan sistem komutasi

elektronik. Untuk mengoperasikan motor BLDC dibutuhkan sistem pengendalian yang lebih kompleks dari motor DC dengan sikat [5] [6] karena dibutuhkan sebuah pengendali dan inverter tiga fasa untuk mengatur pola komutasi motor. Kompleksitas dari pengendali ini akan meningkat berdasarkan pengaplikasian dari motor BLDC. Contohnya pada pengaplikasian motor BLDC dengan kondisi beban yang bervariasi seperti pada mesin cuci, pendingin dan pemanas ruangan, dan alat bantu pada sistem otomotif dan penerbangan. Akurasi kecepatan yang tinggi dan respon dinamik yang baik menjadi hal yang sangat penting untuk diperhatikan. Sehingga, untuk memenuhi performa tersebut dibutuhkan sebuah umpan balik kecepatan agar sistem dapat dikendalikan secara daur tertutup menggunakan algoritma pengendalian yang lebih maju [2].

Berdasarkan permasalahan tersebut maka dilakukanlah penelitian tugas akhir dengan judul **“SISTEM KENDALI KECEPATAN MOTOR BLDC DENGAN PENGENDALI PI”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka permasalahan yang menjadi objek penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI?
2. Bagaimana nilai parameter K_p dan K_i terbaik untuk sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan poengendali PI?

3. Bagaimana pengaruh pengendali PI pada sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang hendak dicapai pada penelitian ini antara lain:

1. Menghasilkan model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI.
2. Mengetahui nilai parameter K_p dan K_i terbaik pada sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI.
3. Mengetahui pengaruh pengendali PI pada sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI.

1.4 Batasan Masalah

Dalam melaksanakan penelitian ini, permasalahan yang akan dibahas dibatasi dengan ketentuan berikut:

1. Sistem dibuat dalam model simulasi yang dimodelkan pada aplikasi *Simulink/Matlab*.
2. Metode komutasi motor BLDC menggunakan metode *six step commutation*.
3. Pendeteksi posisi rotor menggunakan *hall sensor*.
4. Pencarian nilai parameter K_p dan K_i terbaik difokuskan pada simulasi gangguan beban dengan kecepatan konstan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa manfaat yakni antara lain:

1. Bagi masyarakat, penelitian ini dapat dijadikan sebagai model acuan dalam implementasi pengendali kecepatan motor BLDC.
2. Bagi Universitas, penelitian ini bermanfaat sebagai referensi ilmiah pada bidang perancangan sistem kendali secara umum dan pengembangan teknologi pengendalian kecepatan motor BLDC secara khusus.
3. Bagi peneliti, penelitian ini bermanfaat untuk menambah wawasan dan menambah skill dalam perancangan sistem kendali.

1. 6 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan kajian yang dilakukan untuk mendapatkan literatur terkait sehingga dihasilkan landasan teori yang tepat sebelum melakukan perancangan.

2. Pemodelan dan simulasi

Pemodelan dan simulasi merupakan proses perancangan sistem dalam bentuk bagan kotak sehingga dapat dihasilkan respon dinamik sistem.

3. Analisis Data

Melakukan evaluasi terhadap respon dinamik sistem yang diperoleh dari hasil simulasi.

1. 7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat, metode penelitian, dan sistematika penulisan pada penelitian ini.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi landasan teori berdasarkan literatur terkait yang menunjang penelitian ini.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN

Bab ini berisi penjelasan mengenai tahapan penelitian ini secara garis besar dan proses perancangan sistem yang akan dibangun.

BAB 4 HASIL

Bab ini menampilkan data dan analisis hasil simulasi sistem yang telah dibuat.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan penelitian ini dan saran untuk pengembangan penelitian kedepan.

BAB 2

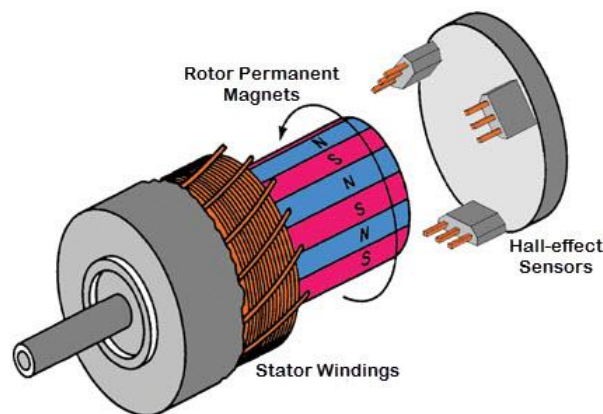
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor BLDC

Motor *brushless DC* (BLDC) atau dapat disebut juga dengan motor BLAC merupakan motor yang termasuk dalam jenis *permanent magnet synchronous motor* (PMSM). Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena motor BLDC memiliki *back electromotive force (back EMF)* yang berbentuk trapezoid sedangkan motor BLAC memiliki *back EMF* yang berbentuk sinusoidal. Walaupun demikian, keduanya memiliki struktur yang sama dan dapat dikendalikan dengan metode *six step*. Dibandingkan dengan motor DC biasa, motor BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang tinggi akibat tidak digunakannya sikat sebagai alat komutasi. Dibandingkan dengan motor induksi, motor BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi karena rotor terbuat dari magnet permanen. Walaupun memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor DC dan motor induksi, pengendalian motor BLDC jauh lebih kompleks untuk mengendalikan kecepatan dan torsi yang konstan karena tidak adanya sikat yang menunjang proses komutasi dan harga motor BLDC yang lebih mahal [1].

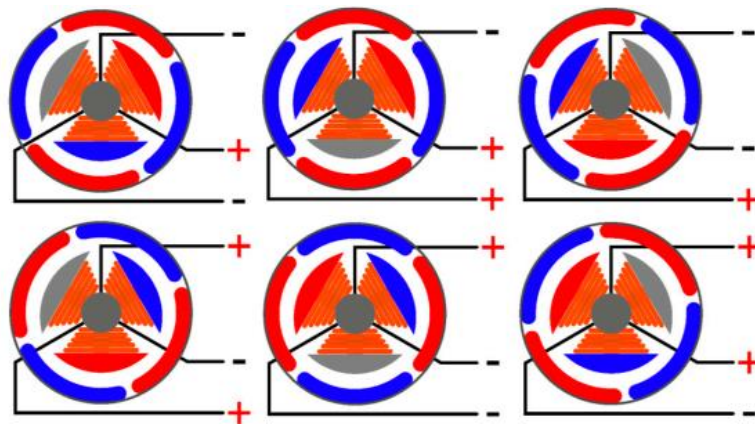
Terdapat dua komponen utama yang menyusun motor BLDC, yaitu rotor dan stator, seperti yang terlihat pada Gambar 2.1. Stator merupakan komponen motor yang tidak bergerak atau statis dan rotor adalah komponen motor yang bergerak. Rotor terdiri atas magnet permanen sedangkan stator terdiri dari kumparan jangkar tiga fasa. Pada umumnya, tiap fasa pada kumparan tersebut

saling terpisah 120° [3]. Oleh karena tidak adanya sikat pada motor BLDC untuk menentukan waktu komutasi yang tepat sehingga dihasilkan kecepatan yang konstan, diperlukan tiga buah *hall sensor*. Pada *hall sensor*, waktu komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan tiga buah *hall sensor* untuk mendapatkan enam kombinasi *timing* yang berbeda [1].



Gambar 2.1 Konstruksi motor BLDC

Motor BLDC dapat bekerja ketika kumparan stator diberikan arus tiga fasa. Akibat adanya arus yang melewati kumparan, maka timbul medan magnet pada inti besi. Agar rotor dapat berputar, polaritas dari kumparan harus diubah setiap saat sehingga menghasilkan medan putar. Medan putar inilah yang akan mengakibatkan rotor yang terdiri dari magnet permanen dapat berputar. Berikut ini adalah skema perputaran rotor pada motor BLDC.



Gambar 2.2 Skema pengoperasian motor BLDC [3]

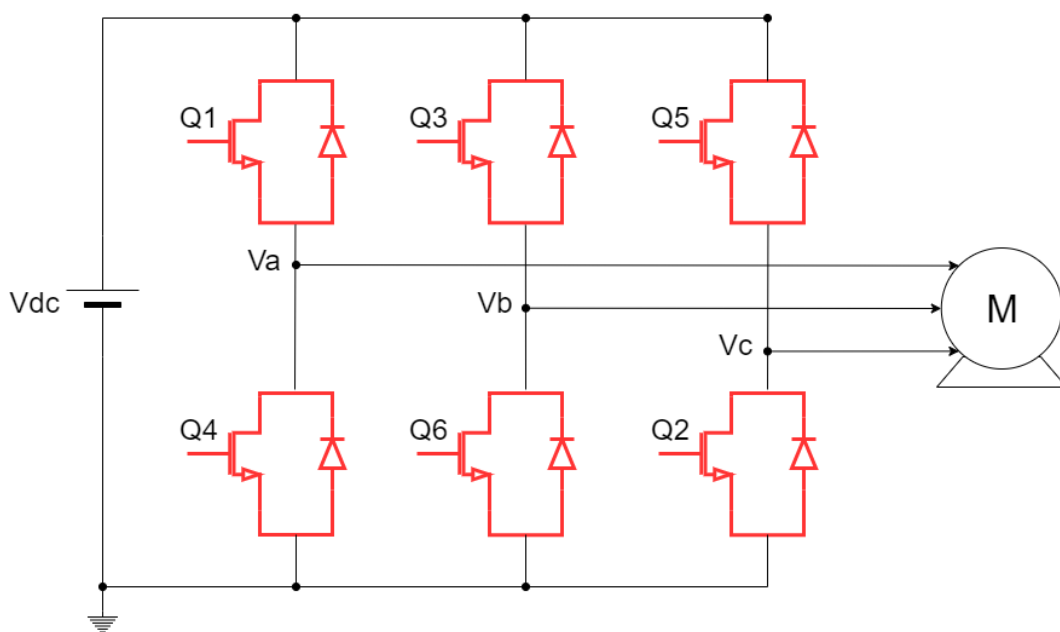
Pada Gambar 2.2 dibawah ini menunjukkan skema perputaran rotor pada motor dengan arah searah jarum jam. Dapat dilihat pada gambar tersebut polaritas kumparan pada tiap fasa berubah-ubah. Skema pengoperasian ini disebut skema *six step commutation* kerana perubahan polaritas kumparan berubah dalam enam tahap sehingga menghasilkan satu putaran penuh. Ketika kumparan stator diberi tegangan positif, inti besi akan menghasilkan kutub utara sehingga mengakibatkan kutub selatan magnet permanen pada rotor bergerak. Begitu pula sebaliknya, ketika kumparan stator diberi tegangan negatif, inti besi akan menghasilkan kutub selatan sehingga mengakibatkan kutub utara magnet permanen pada rotor bergerak. Pola ini akan terus berulang hingga menyebabkan motor berputar. Untuk memutar rotor pada kecepatan konstan, polaritas kumparan tiap fasa diubah dengan frekuensi yang konstan pula [3].

Jika diperhatikan secara seksama, terlihat bahwa satu putaran elektrik menghasilkan setengah putaran mekanik. Hal ini ditentukan berdasarkan jumlah pasang kutub pada rotor sehingga menghasilkan hubungan sebagai berikut.

$$putaran\ mekanik = \frac{2}{jumlah\ pasang\ kutub} \times putaran\ elektrik \quad (2.1)$$

2.2 Inverter Tiga Fasa

Motor BLDC merupakan jenis motor sinkron tiga fasa yang membutuhkan tegangan tiga fasa agar dapat bekerja. Oleh karena itu digunakan inverter tiga fasa untuk membangkitkan sinyal tiga fasa. Sinyal tiga fasa yang dibangkitkan oleh inverter ini berupa *quasi square wave* dimana sinyal AC yang dihasilkan berasal dari sinyal DC yang dimanipulasi sehingga menghasilkan sinyal yang menyerupai sinyal AC. Berikut ini adalah skema umum inverter tiga fasa yang digunakan.



Gambar 2.3 Rangkaian inverter tiga fasa

Inverter tiga fasa ini tersusun dari enam buah *power MOSFET* yang dirangkai secara berpasangan. Agar dapat menghasilkan tegangan tiga fasa, masing-masing *MOSFET* harus diberikan sinyal kontrol yang sesuai. Berikut ini merupakan skema kontrol inverter yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 2.1 Sinyal kontrol inverter [7]

Keadaan	Sinyal Kontrol					
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	1	0	0	0	0	1
2	1	1	0	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0
4	0	0	1	1	0	0
5	0	0	0	1	1	0
6	0	0	0	0	1	1

Pengontrolan inverter yang digunakan ini menggunakan skema 180° dimana setiap *MOSFET* diaktifkan selama 180° . Pada skema ini tiga *MOSFET* diaktifkan secara bersamaan, dimana dua diantaranya berada pada rangkaian yang sama (rangkaiannya atas dan rangkaian bawah) dan satu *MOSFET* lainnya berada pada rangkaian lain. Setiap 60° , salah satu *MOSFET* akan OFF dan *MOSFET* lainnya akan ON [7].

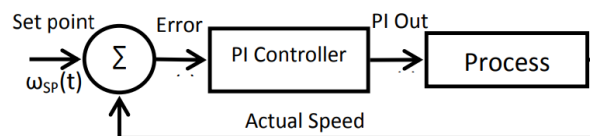
2.3 Pengendali PI

Pengendali PI merupakan pengendali yang sudah digunakan secara luas diberbagai bidang khususnya pada bidang industri. Pengendali PI bertugas untuk mengurangi eror antara suatu variabel proses dengan nilai *set point* yang diberikan dengan mengkalkulasi sinyal eror tersebut lalu memberikan suatu sinyal usaha yang

dapat mengurangi error. Pada pengendali PI, terdapat dua komponen pengendali yang digunakan yaitu komponen *proportional* dan komponen *integral*. Komponen *proporsional* mempengaruhi keluaran pengendali berdasarkan nilai error saat ini. Sedangkan komponen integral mempengaruhi keluaran pengendali berdasarkan nilai error sebelumnya. Pengendali PI kemudian menjumlahkan hasil kalkulasi dari setiap komponen tersebut sehingga menghasilkan usaha [4]. Berikut ini adalah persamaan pengendali PI.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.2)$$

dimana $u(t)$ adalah keluaran pengendali PI, K_p adalah *proportional gain*, K_i adalah *integral gain*, dan $e(t)$ adalah error. Blok diagram berikut ini menggambarkan proses kerja pengendali PI [8].



Gambar 2.4 Diagram blok pengendali PI [8]

Secara umum, terdapat empat parameter utama yang digunakan untuk mengukur performa suatu sistem kendali yaitu sebagai berikut:

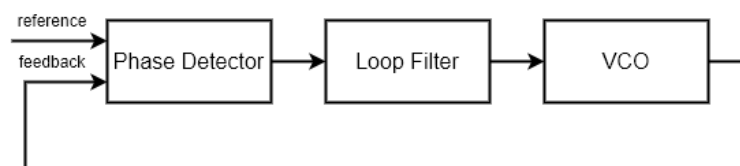
1. *Raise time* (T_r): didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan suatu sistem untuk mencapai rentang nilai 10% sampai 90% dari nilai *set point*.
2. *Setling time* (T_s): yaitu waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kondisi *steady state*.

3. *Steady state error*: didefinisikan sebagai perbedaan keluaran sistem pada kondisi *steady state* dengan *set point*.
4. *Overshoot*: yaitu nilai maksimum dari respon suatu sistem yang diukur dari nilai yang seharusnya atau nilai *set point* yang dapat dihitung dengan rumus berikut

$$Overshoot = \frac{\text{respon kecepatan maksimum} - \text{set point}}{\text{set point}} \quad (2.3)$$

2.4 Phase Locked Loop

Phase locked loop (PLL) merupakan salah satu teknik dalam pengendalian suatu sistem yang telah berkontribusi secara signifikan pada perkembangan teknologi di bidang komunikasi dan sistem kendali motor servo. Secara konseptual, PLL merupakan model *feedback loop* dimana *voltage controlled oscillator* (VCO) dapat sinkron secara otomatis dengan sinyal input yang diberikan. Struktur dasar PLL terdiri dari tiga komponen yang terhubung membentuk *feedback loop* seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini [9].



Gambar 2.5 Diagram blok PLL

VCO merupakan osilator dimana frekuensi keluaran sebanding dengan tegangan input. Tegangan input VCO menentukan besar frekuensi sinyal yang akan dihasilkan. Keluaran VCO dan sinyal referensi dimasukkan pada blok *phase*

detector. Ketika *loop* dalam kondisi *locked* terhadap sinyal input, frekuensi sinyal keluaran VCO akan sama dengan frekuensi sinyal referensi. Blok *phase detector* menghasilkan sinyal berdasarkan perbedaan fasa antara sinyal referensi dengan sinyal keluaran VCO. Keluaran *phase detector* kemudian diubah oleh blok *loop filter*. *Loop* kemudian ditutup dengan menghubungkan keluaran *loop filter* dengan input VCO. Tegangan keluaran *loop filter* digunakan sebagai sinyal kontrol frekuensi VCO [9].

BAB 3

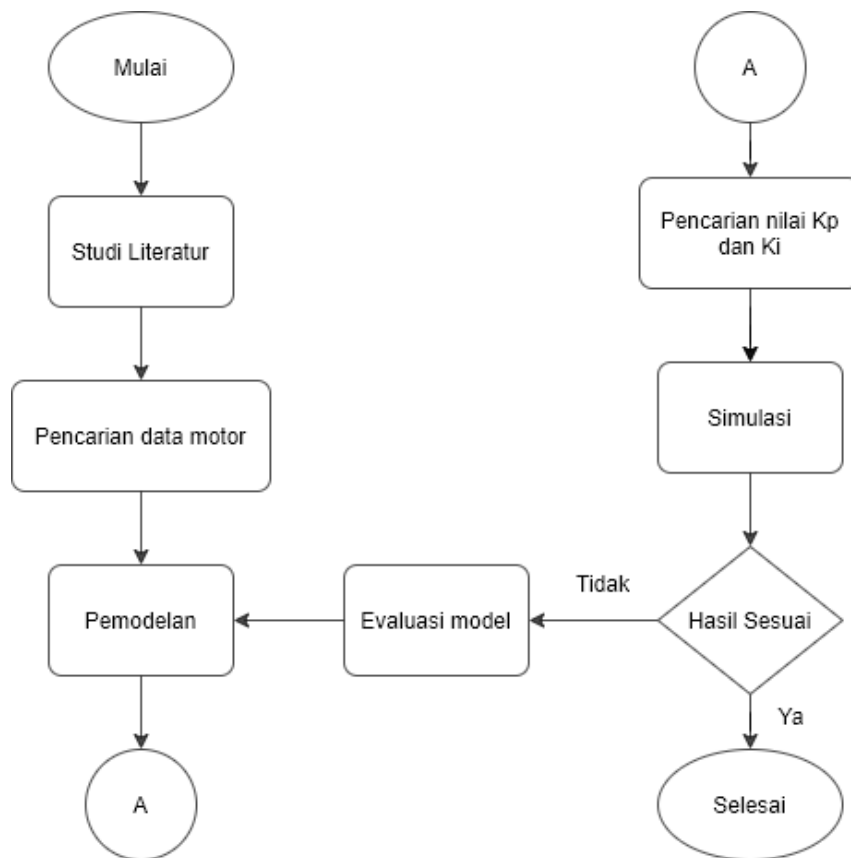
METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN

3.1 Gambaran Umum

Secara garis besar, proses penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap yaitu sebagai berikut:

1. Studi literatur, mengumpulkan literatur-literatur yang mendukung penelitian dan mempelajari teori-teori yang dapat menunjang dalam proses pelaksanaan penelitian.
2. Pencarian data motor, mencari dan mengumpulkan data-data awal motor yang akan digunakan dalam pemodelan sistem.
3. Pemodelan, membuat model blok diagram pada aplikasi Matlab/Simulink berdasarkan model matematis sistem fisik dan data-data yang ada.
4. Pencarian nilai K_p dan K_i terbaik, mencari nilai K_p dan K_i yang terbaik berdasarkan fungsi tujuan J .
5. Simulasi, melakukan simulasi untuk melihat hasil keluaran sistem yang telah dimodelkan. Apabila hasil keluaran sistem belum sesuai dengan hasil yang diinginkan, maka dilakukan evaluasi model lalu dilakukan pemodelan ulang sistem.

Berikut ini adalah keseluruhan tahapan metode penelitian ini dalam bentuk diagram alir.

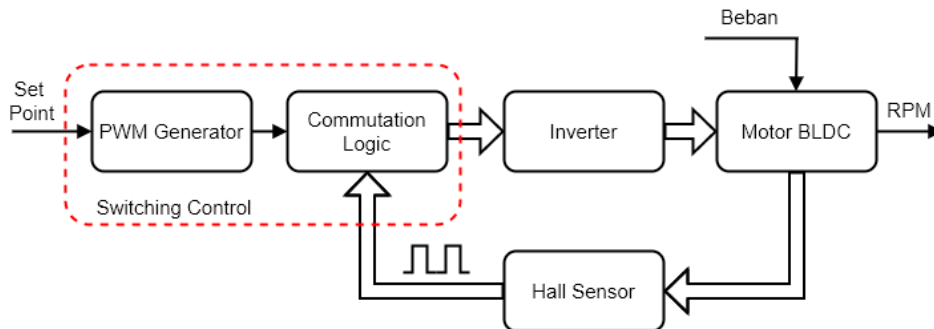


Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian

3. 2 Perancangan Sistem

Teknik pengendalian motor BLDC dapat dibedakan berdasarkan cara mendeteksi posisi rotornya, yaitu menggunakan sensor dan tanpa menggunakan sensor (*sensorless*). Pada penelitian ini digunakan motor yang dilengkapi dengan *hall sensor* untuk mendeteksi posisi rotornya. Untuk melakukan perancangan sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI, dapat dilakukan dua tahap yaitu pertama merancang sistem penggerak motor BLDC terlebih dahulu kemudian merancang sistem kendali kecepatan motor. Hal ini dilakukan agar proses perancangan dapat berjalan secara sistematis dan dapat mengevaluasi model dengan lebih mudah.

3. 2. 1 Perancangan Sistem Penggerak Motor BLDC



Gambar 3.2 Diagram blok sistem penggerak motor BLDC

Secara garis besar, sistem penggerak motor BLDC terdiri dari empat blok utama yaitu blok *switching control*, blok inverter, blok *hall sensor*, dan blok motor BLDC. Blok motor BLDC berisi model dinamis motor BLDC yang terdiri komponen elektrik dan komponen mekanik. Motor BLDC membutuhkan input berupa tegangan tiga fasa dan menghasilkan output berupa putaran.

Blok *switching control* berfungsi untuk mengatur proses pensaklaran pada blok inverter. Dapat dilihat pada gambar di atas, *switching control* terdiri dari dua blok yaitu blok *PWM generator* dan blok *commutation logic*. Blok *PWM generator* berfungsi untuk membangkitkan sinyal PWM. Input dari blok ini yaitu tagangan *set point*. Pada blok *PWM generator*, tegangan *set point* akan dikonversi menjadi *duty cycle* PWM lalu kemudian *duty cycle* akan menghasilkan sinyal PWM. Sinyal PWM ini berfungsi untuk memodulasi tegangan input motor dari blok inverter. Blok *commutation logic* berfungsi untuk mengatur pola komutasi motor berdasarkan sinyal *hall sensor* (*hall signal*). Pada blok sinyal PWM diatur sedemikian rupa sehingga menghasilkan enam buah sinyal yang aktif secara

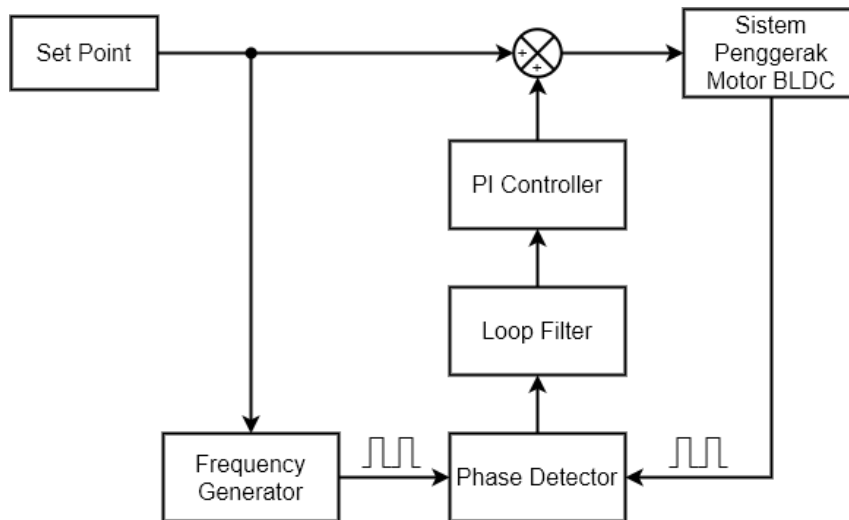
bergantian berdasarkan *hall signal*. Keenam sinyal PWM ini kemudian menuju ke enam buah *MOSFET* pada blok inverter.

Blok inverter ini terdiri dari enam buah *MOSFET* yang dirangkai saling berpasangan sehingga menghasilkan sinyal tegangan tiga fasa. Keenam *MOSFET* ini diaktifkan secara bergantian menggunakan sinyal PWM yang berasal dari blok *switching control*. Besar *duty cycle* PWM akan menentukan besar tegangan yang akan dihasilkan oleh inverter. Metode pengoperasian inverter yang digunakan yaitu metode operasi 180° dimana masing-masing fasa akan di-*energize* selama 180° elektrik secara berkala.

Blok *hall sensor* terdiri dari tiga buah *hall sensor* untuk mendeteksi masing-masing fasa pada motor. Input dari blok ini berupa sudut rotor dan menghasilkan tiga output berupa pulsa. Kombinasi dari ketiga sinyal pulsa tersebut menghasilkan informasi mengenai posisi rotor dalam bentuk kode biner. Kode itulah yang kemudian akan digunakan sebagai sinyal *feedback* untuk menentukan pola komutasi motor.

3. 2. 2 Perancangan Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC

Sistem kendali kecepatan motor BLDC dibangun dengan menyematkan algoritma pengendali PI pada sistem penggerak motor BLDC sebagai pengendali kecepatan daur tertutup. Struktur yang digunakan pada sistem ini mengadopsi struktur PLL. Sinyal referensi dan *feedback* yang digunakan berupa sinyal pulsa. Gambar 3.3 di bawah ini merupakan struktur pengendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI.



Gambar 3.3 Struktur pengendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI

Model sistem PLL diimplementasikan pada struktur pengendali kecepatan motor BLDC seperti pada Gambar 3.3. Struktur ini terdiri dari blok sistem penggerak motor BLDC, blok *frequency generator*, blok *phase detector*, blok *loop filter*, dan blok *PI controller*. Dapat dilihat bahwa blok sistem penggerak motor BLDC berperan seperti VCO seperti pada sistem PLL dimana input blok berupa tegangan dan outputnya berupa pulsa. Sinyal pulsa ini merupakan keluaran dari *hall sensor*.

Blok *frequency generator* berfungsi untuk membangkitkan sinyal pulsa sebagai sinyal referensi pada sistem. Besar frekuensi yang dihasilkan *frequency generator* bergantung pada inputnya yaitu tegangan *set point*. Sinyal referensi yang dihasilkan oleh blok *frequency generator* kemudian dibandingkan dengan sinyal *feedback* pada blok *phase detector*. Keluaran dari blok *phase detector* ini berupa sinyal pulsa dengan rentang nilai dari -1 hingga 1. Frekuensi sinyal referensi merupakan representasi dari referensi kecepatan motor BLDC dan frekuensi sinyal

feedback merupakan representasi dari kecepatan motor BLDC yang sebenarnya. Sehingga keluaran dari blok *phase detector* merupakan sinyal eror pada sistem ini. Sinyal eror tersebut kemudian akan melalui blok *loop filter*. Blok *loop filter* berisikan *low pass filter* yang berfungsi untuk mengubah sinyal eror yang berbentuk pulsa menjadi tegangan DC. Nilai eror tegangan ini kemudian menjadi input *PI controller*. *PI controller* menghasilkan tegangan yang kemudian akan menaikkan atau menurunkan nilai tegangan *set point* yang akan masuk ke blok sistem penggerak motor BLDC.

3. 2. 3 Spesifikasi Motor BLDC

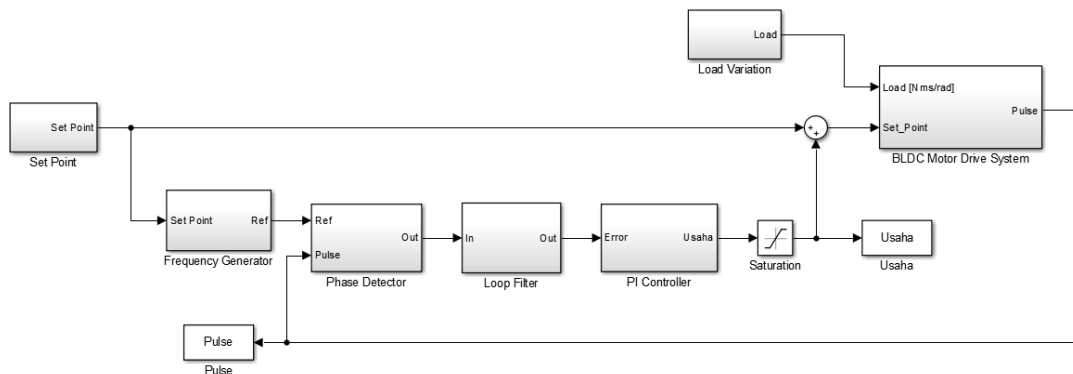
Motor BLDC yang digunakan pada penelitian ini yaitu motor BLDC yang menggunakan *hall sensor* pada strukturnya untuk mendeteksi posisi rotor dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 3.1 Spesifikasi motor BLDC

<i>Maximum Speed, RPM_{max}</i>	5000 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
<i>Voltage reference, V_{ref}</i>	5 Volt

3.3 Pemodelan Sistem

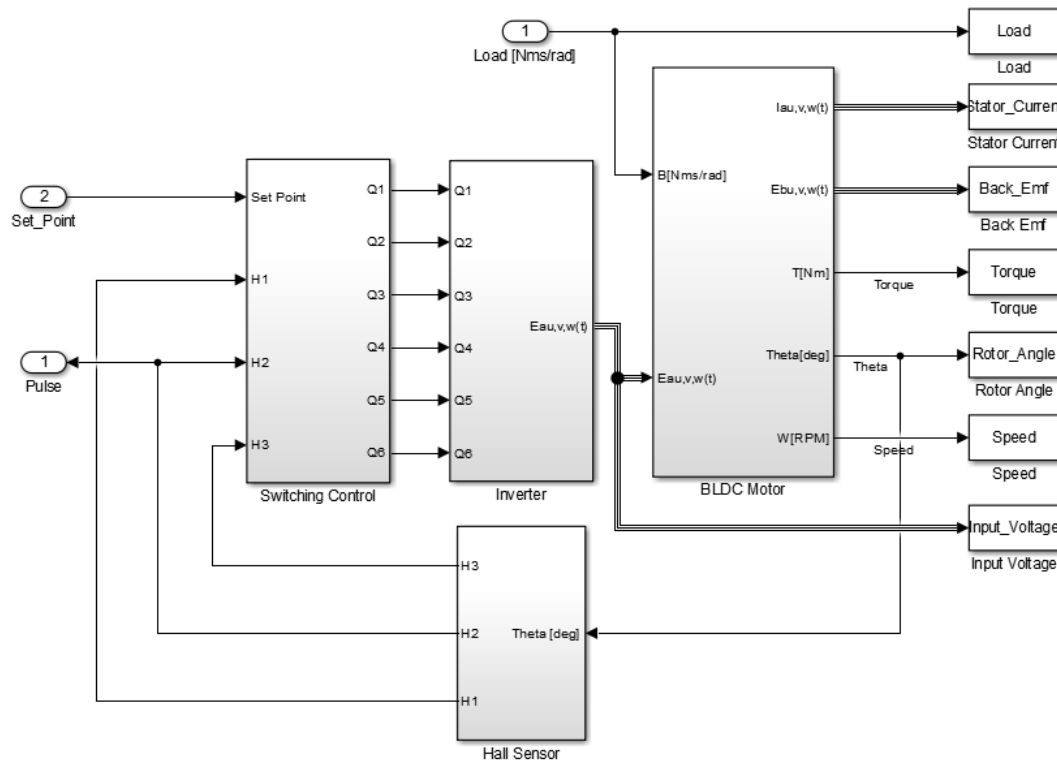
Pemodelan sistem kendali motor BLDC dibangun berdasarkan karakteristik dinamik tiap komponen sehingga dihasilkan model yang tepat dan dapat merepresentasikan kondisi sistem yang sesungguhnya. Model yang dibuat ini mengacu pada struktur pengendali pada Gambar 3.3. *Set point* yang digunakan pada model ini merupakan model representasi *potensiometer* dengan keluaran yaitu dari 0 – 5 Volt. Gambar berikut ini merupakan model sistem secara keseluruhan.



Gambar 3.4 Model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI

3.3.1 Sistem Penggerak Motor BLDC

Blok sistem penggerak motor BLDC terdiri dari empat blok subsistem yaitu blok motor BLDC, blok inverter, blok *hall sensor*, dan blok *switching control*. Blok ini memiliki dua buah input yaitu *load* atau beban dan *set point*, dan memiliki satu output yaitu *pulse*. *Pulse* ini diambil dari salah satu sinyal keluaran dari blok *hall sensor*. Gambar 3.5 berikut ini adalah gambar model sistem penggerak motor BLDC.

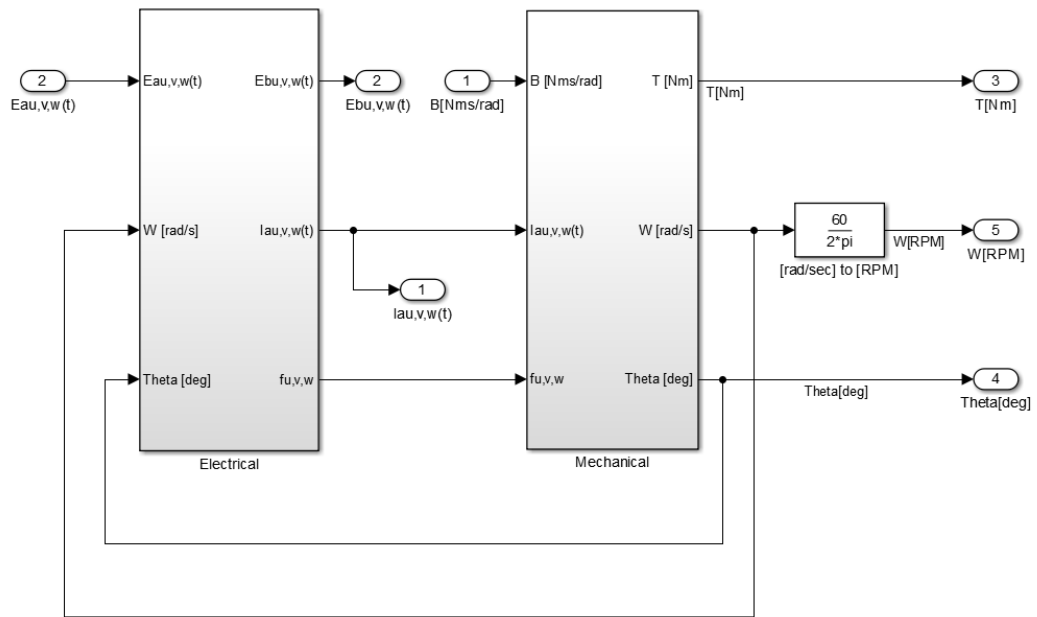


Gambar 3.5 Model sistem penggerak motor BLDC

3. 3. 1. 1 Motor BLDC

Motor yang dimodelkan pada penelitian ini yaitu motor BLDC tiga fasa dengan kumparan yang dihubung *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.

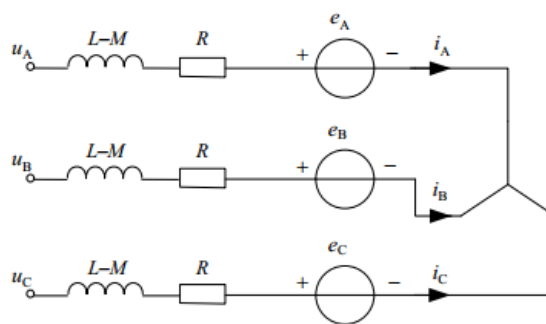
Model motor BLDC ini dibuat dalam model persamaan diferensial yang terbagi atas dua komponen yaitu komponen elektrik dan mekanik. Masing-masing persamaan tersebut menggambarkan karakteristik motor secara riil. Berikut ini merupakan model blok motor BLDC.



Gambar 3.6 Model blok motor BLDC

3.3.1.1.1 Electrical

Blok *electrical* merupakan model komponen elektrik motor BLDC yang terdiri atas dua yaitu model rangkaian jangkar motor dan model karakteristik *back EMF* motor. Berikut ini merupakan gambar rangkaian ekuivalen motor BLDC.



Gambar 3.7 Rangkaian ekuivalen motor BLDC

Berdasarkan hukum Kirchoff tegangan tiap fasa pada rangkaian kumparan jangkar motor BLDC di atas adalah:

$$E_{au}(t) = R_a \cdot i_{au}(t) + L_a \cdot \frac{di_{au}(t)}{dt} + E_{bu}(t) \quad (3.1)$$

$$E_{av}(t) = R_a \cdot i_{av}(t) + L_a \cdot \frac{di_{av}(t)}{dt} + E_{bv}(t) \quad (3.2)$$

$$E_{aw}(t) = R_a \cdot i_{aw}(t) + L_a \cdot \frac{di_{aw}(t)}{dt} + E_{bw}(t) \quad (3.3)$$

Keterangan:

$E_{au}(t)$, $E_{av}(t)$, dan $E_{aw}(t)$: tegangan input jangkar (V)

$E_{bu}(t)$, $E_{bv}(t)$, dan $E_{bw}(t)$: tegangan *back emf* (V)

$i_{au}(t)$, $i_{av}(t)$, dan $i_{aw}(t)$: arus jangkar (A)

R_a : resistansi jangkar (Ω)

L_a : induktansi jangkar (Ω)

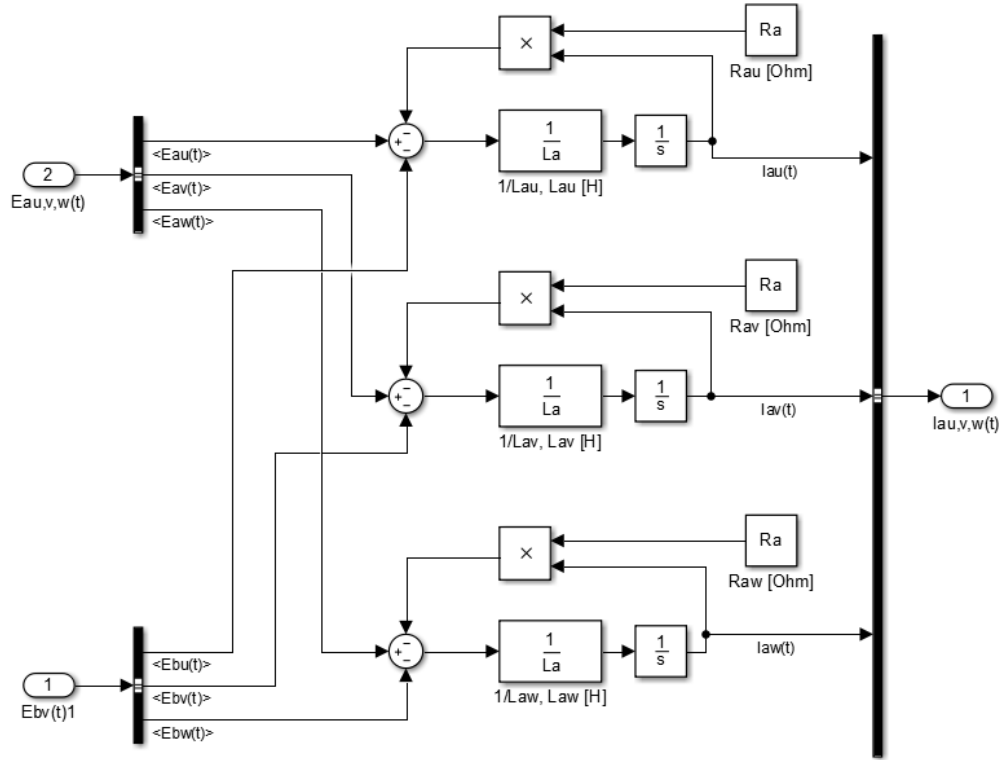
Agar dapat diimplementasikan dengan mudah pada Matlab/Simulink, persamaan (3.1), (3.2), dan (3.3) dapat dimodifikasi menjadi persamaan berikut:

$$\frac{di_{au}(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} (E_{au}(t) - R_a \cdot i_{au}(t) - E_{bu}(t)) \quad (3.4)$$

$$\frac{di_{av}(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} (E_{av}(t) - R_a \cdot i_{av}(t) - E_{bv}(t)) \quad (3.5)$$

$$\frac{di_{aw}(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} (E_{aw}(t) - R_a \cdot i_{aw}(t) - E_{bw}(t)) \quad (3.6)$$

Persamaan (3.4), (3.5), dan (3.6) kemudian diimplementasikan pada *Simulink/Matlab* sehingga menghasilkan model *armature* seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.8 Model blok *armature*

Untuk model *back emf* motor, persamaan pada tiap fasanya adalah sebagai berikut:

$$E_{bu}(t) = K_b \cdot \omega_m(t) \cdot f_u(\theta_e) \quad (3.7)$$

$$E_{bv}(t) = K_b \cdot \omega_m(t) \cdot f_v(\theta_e) \quad (3.8)$$

$$E_{bw}(t) = K_b \cdot \omega_m(t) \cdot f_w(\theta_e) \quad (3.9)$$

Keterangan:

K_b : konstanta generator (Vs/rad)

$\omega_m(t)$: kecepatan putaran motor (rad/s)

θ_e : sudut elektrik rotor ($^\circ$)

$E_{bu}(t)$, $E_{av}(t)$, dan $E_{aw}(t)$: tegangan *back emf* (V)

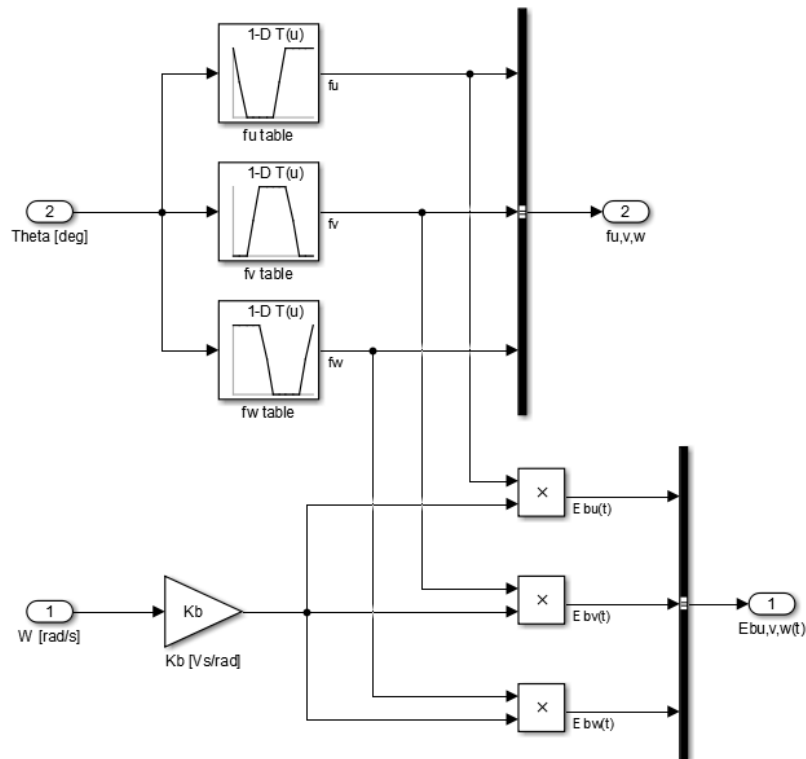
$f_u(\theta_e)$, $f_v(\theta_e)$, dan $f_w(\theta_e)$: fungsi sudut rotor terhadap fasa

Dapat dilihat pada persamaan di atas, model *back emf* motor BLDC merupakan fungsi sudut rotor. Fungsi ini akan membentuk karakteristik *back emf* motor BLDC yang berbentuk trapezoid. Berikut adalah tabel fungsi sudut rotor motor BLDC.

Tabel 3.2 Fungsi sudut rotor motor BLDC [10]

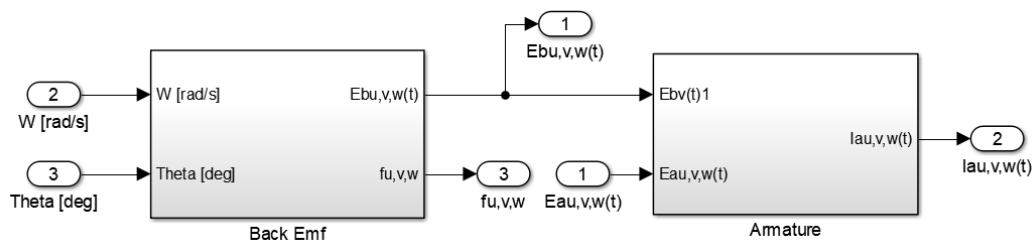
θ_r	$f_u(\theta_r)$	$f_v(\theta_r)$	$f_w(\theta_r)$
$0^\circ - 60^\circ$	$1 - \frac{6\theta_r}{\pi}$	-1	1
$60^\circ - 120^\circ$	-1	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 3$	1
$120^\circ - 180^\circ$	-1	1	$5 - \frac{6\theta_r}{\pi}$
$180^\circ - 240^\circ$	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 7$	1	-1
$240^\circ - 300^\circ$	1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

Persamaan (3.7), (3.8), dan (3.9) kemudian diimplementasikan pada *Simulink/Matlab* sehingga membentuk blok *back emf* seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.9 Model blok *back emf*

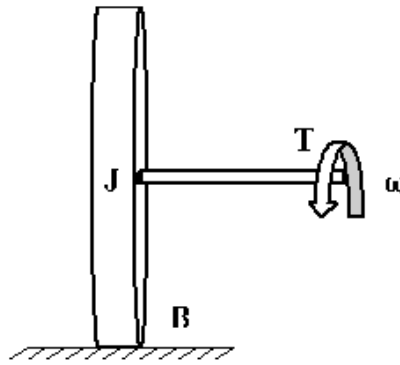
Jadi, model blok *electrical* secara keseluruhan terdiri dari dua blok yaitu blok *armature* dan blok *back emf* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Model blok *electrical*

3.3.1.1.2 Mechanical

Model blok *mechanical* model dinamika dari komponen mekanik motor BLDC. Motor BLDC mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Gerak mekanik yang dihasilkan berupa perputaran rotor. Gambar di bawah ini menunjukkan ilustrasi perputaran rotor pada motor.



Gambar 3.11 Putaran rotor pada motor BLDC

Berdasarkan hukum *Newton*, persamaan gerak rotasi pada motor BLDC adalah sebagai berikut:

$$T(t) = J \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B \cdot \omega_m(t) \quad (3.10)$$

$$T(t) = T_u(t) + T_v(t) + T_w(t) \quad (3.11)$$

$$\omega_m(t) = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3.12)$$

$T(t)$ adalah jumlah dari $T_u(t)$, $T_v(t)$, dan $T_w(t)$ yang merupakan besar torsi yang diakibatkan oleh masing-masing fasa. Dimana $T_u(t)$, $T_v(t)$, dan $T_w(t)$ adalah:

$$T_{eu}(t) = K_m \cdot i_{au} \cdot f_u(\theta_e) \quad (3.13)$$

$$T_{ev}(t) = K_m \cdot i_{av} \cdot f_v(\theta_e) \quad (3.14)$$

$$T_{ew}(t) = K_m \cdot i_{aw} \cdot f_w(\theta_e) \quad (3.15)$$

dan θ_e adalah:

$$\theta_e = \frac{P}{2} \cdot \theta_m \quad (3.16)$$

Keterangan:

$T(t)$: total torsi (Nm)

K_m : konstanta motor (Nm/A)

J : inersia motor (Nms^2/rad)

B : beban motor (Nms/rad)

P : jumlah pasang kutub

$\omega_m(t)$: kecepatan putaran motor (rad/s)

θ_m : sudut mekanik rotor ($^\circ$)

θ_e : sudut elektrik rotor ($^\circ$)

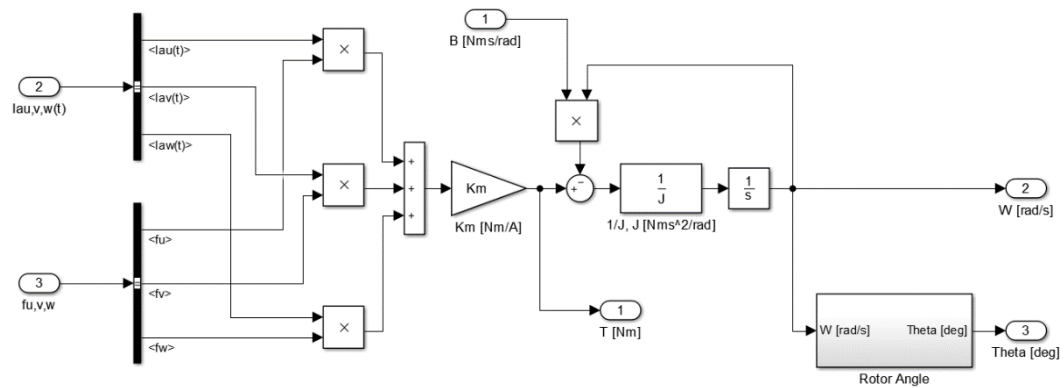
$T_u(t)$, $T_v(t)$, dan $T_w(t)$: torsi pada masing-masing fasa (Nm)

$f_u(\theta_e)$, $f_v(\theta_e)$, dan $f_w(\theta_e)$: fungsi sudut rotor terhadap fasa

Agar dapat diimplementasikan dengan mudah pada Matlab/Simulink, persamaan (3.10) dapat dimodifikasi menjadi persamaan berikut:

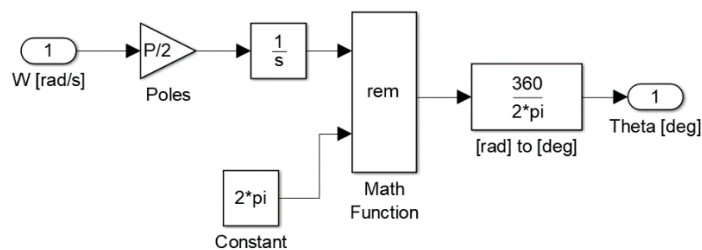
$$\frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{1}{J} (T(t) - B \cdot \omega_m(t)) \quad (3.17)$$

Persamaan tersebut diatas diimplementasikan pada *Simulink/Matlab* sehingga membentuk blok *mechanical* seperti gambar di bawah ini.



Gambar 3.12 Model blok *mechanical*

Dapat dilihat pada Gambar 3.12, terdapat blok *rotor angle*. Fungsi dari blok *rotor angle* yaitu untuk mengonversi keluaran kecepatan motor ω (rad/s) menjadi posisi rotor dalam bentuk sudut rotor. Sehingga keluaran blok *mechanical* yaitu kecepatan motor dan posisi rotor dalam bentuk sudut rotor. Berikut ini model blok *rotor angle*.

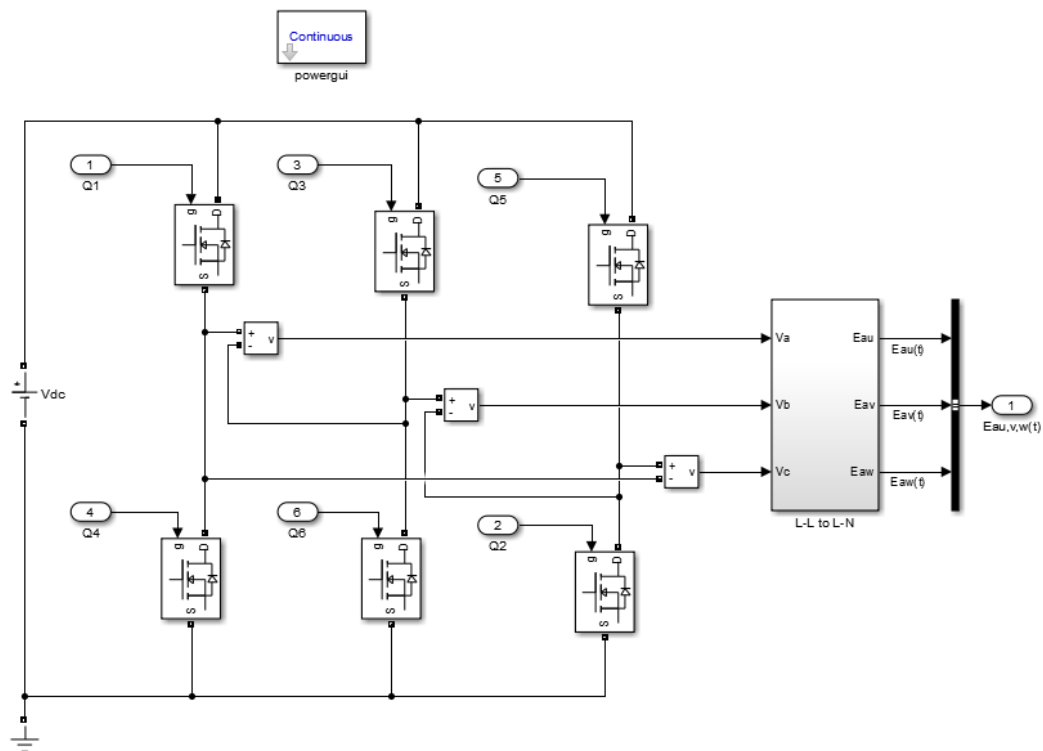


Gambar 3.13 Model blok *rotor angle*

Prinsip kerja dari subsistem ini berdasarkan persamaan (3.16). Blok *math function* berfungsi untuk mengulang nilai keluaran setiap satu putaran ($2\pi \text{ rad}$) sehingga menghasilkan nilai sudut rotor. Kemudian satuan sudut rotor diubah dari radian (*rad*) menjadi derajat ($^{\circ}$) menggunakan blok *[rad] to [deg]*.

3.3.1.2 Inverter

Pada sistem penggerak motor BLDC inverter yang digunakan berupa inverter tiga fasa. Inverter tiga fasa terdiri dari enam buah *MOSFET* yang dirangkai secara berpasangan sehingga menghasilkan keluaran tegangan tiga fasa. Model rangkaian di atas diimplementasikan pada *Simulink/Matlab* menggunakan komponen *power electronics* dari *Simscape Power System library* pada Simulink. Gambar di bawah ini menunjukkan model blok inverter.

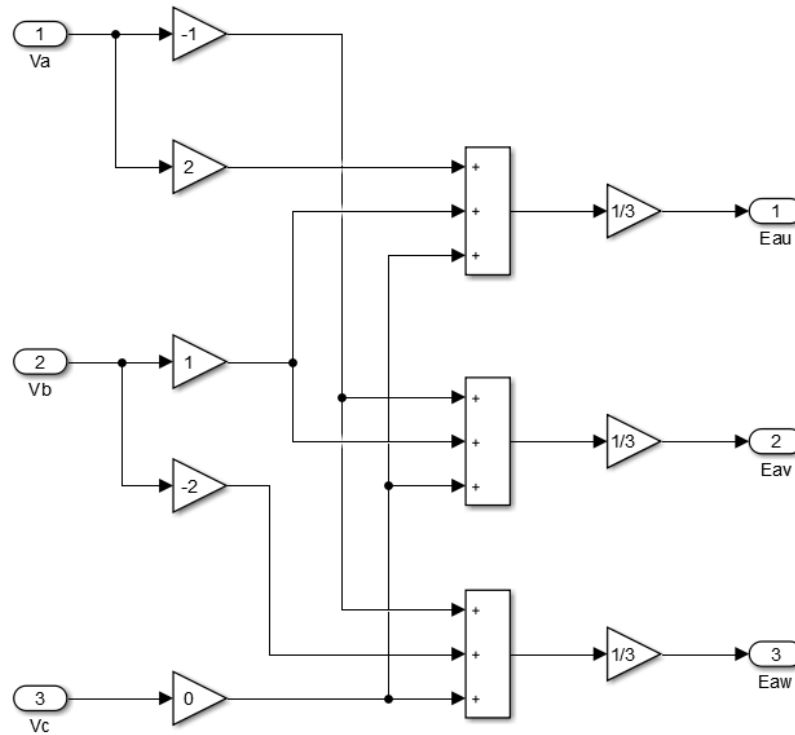


Gambar 3.14 Model blok inverter

Tegangan keluaran yang dihasilkan dari model diatas merupakan tegangan *line to line*. Sedangkan tegangan input yang masuk ke motor BLDC merupakan tegangan *line to neutral*. Oleh karena itu, dibutuhkan blok tambahan *L-L to L-N*. Blok *L-L to L-N* merupakan blok fungsi dari persamaan (3.18) untuk mengubah tegangan *line to line* menjadi *line to neutral* [11].

$$\begin{bmatrix} E_{au} \\ E_{av} \\ E_{aw} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

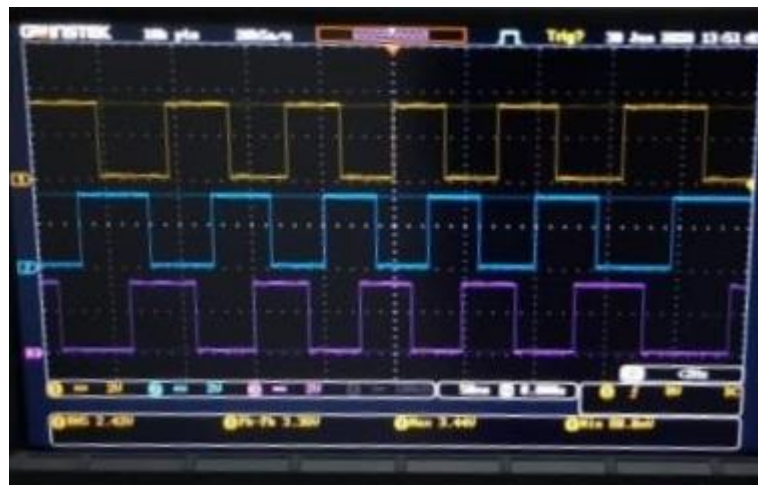
Gambar berikut ini menunjukkan model blok *L-L to L-N* yang merupakan implementasi dari persamaan (3.18).



Gambar 3.15 Model blok *L-L to L-N*

3.3.1.3 Hall Sensor

Terdapat tiga buah *hall sensor* yang digunakan pada motor BLDC yang masing-masing dipasang terpisah sebesar 120° elektrik. Tiga buah *hall sensor* tersebut akan mengirimkan informasi posisi rotor ke blok *switching control* dalam bentuk kode biner. Gambar 3.16 di bawah ini menampilkan sinyal keluaran dari *hall sensor* dan pada Tabel 3.3 menyajikan data keluaran *hall sensor* berdasarkan sudut rotor.



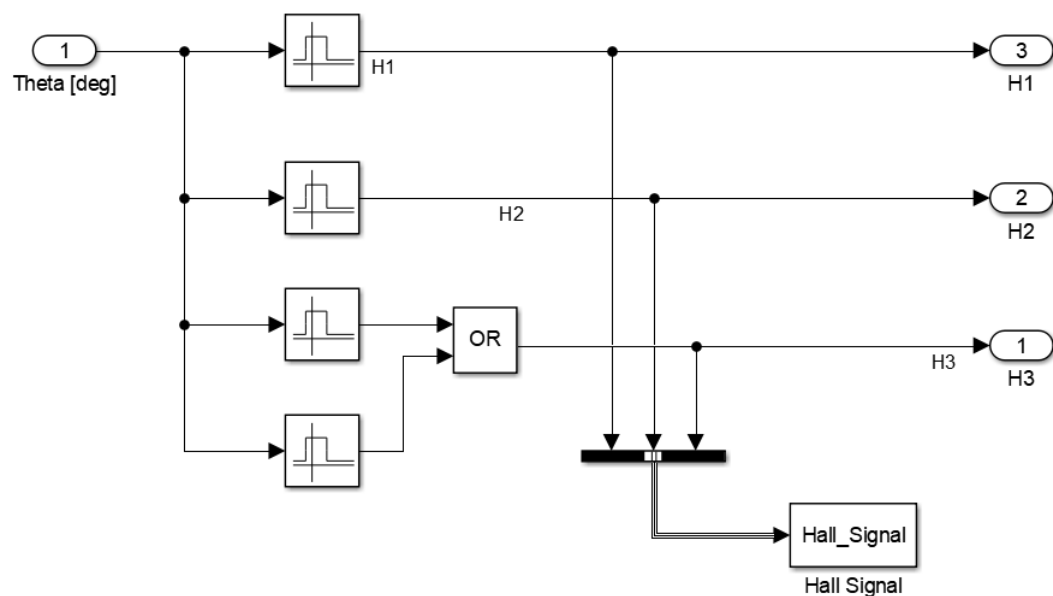
Gambar 3.16 Sinyal keluaran *hall sensor*

Tabel 3.3 Keluaran *hall sensor* berdasarkan sudut rotor [10]

θ_e	X	Y	Z
$0^\circ - 60^\circ$	1	0	1
$60^\circ - 120^\circ$	1	0	0
$120^\circ - 180^\circ$	1	1	0
$180^\circ - 240^\circ$	0	1	0

$240^\circ - 300^\circ$	0	1	1
$300^\circ - 360^\circ$	0	0	1

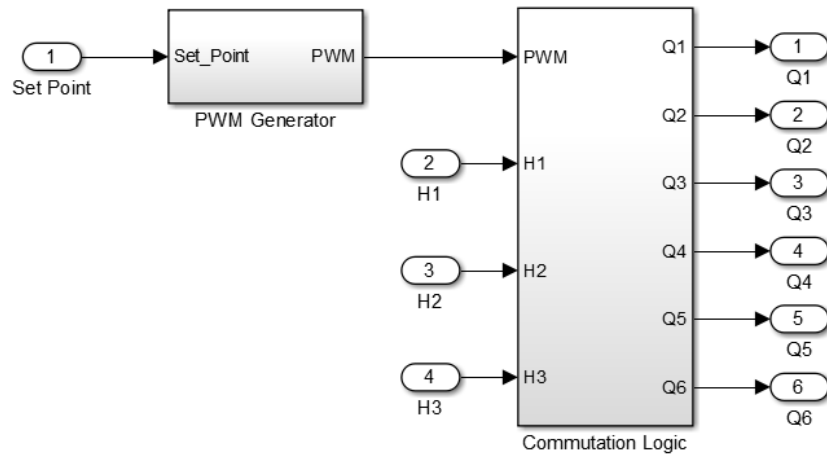
Berdasarkan tabel keluaran *hall sensor* di atas, maka dibuatlah model blok *hall sensor* seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 3.17 Model blok *hall sensor*

3. 3. 1. 4 *Switching Control*

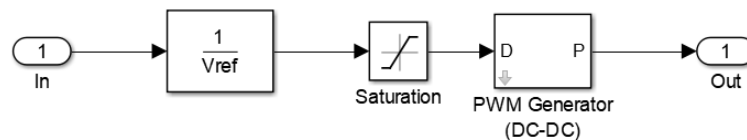
Blok *switching control* merupakan blok yang berfungsi sebagai pengatur pola pensaklaran pada inverter. Blok ini dibangun oleh dua buah blok subsistem yaitu blok *PWM generator* dan blok *commutation logic*. Berikut ini merupakan model blok *switching control*.



Gambar 3.18 Model blok *switching control*

3. 3. 1. 4. 1 *PWM Generator*

Pada pengendalian motor BLDC, pengaturan kecepatan motor dilakukan dengan mengubah-ubah besar tegangan input motor. Tegangan input motor BLDC ini dapat diubah dengan metode PWM dimana sinyal PWM berfungsi untuk memodulasi tegangan dari inverter ke motor BLDC. Besar tegangan yang dihasilkan akan bergantung pada *duty cycle* sinyal PWM. Berikut ini merupakan model blok *PWM generator*.

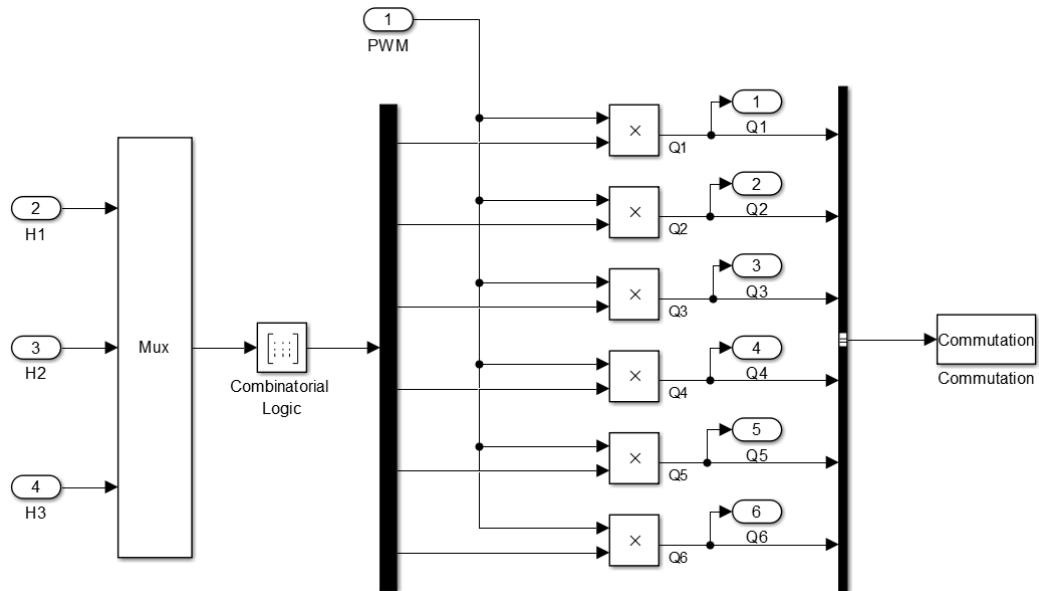


Gambar 3.19 Model blok *PWM Generator*

3. 3. 1. 4. 2 *Commutation Logic*

Blok *commutation logic* memiliki empat input yaitu PWM dan tiga *hall signal*, dan enam output yaitu sinyal kontrol *MOSFET*. Pada blok ini sinyal PWM akan diaktifkan pada masing-masing sinyal kontrol secara berkala berdasarkan *hall*

signal yang diterima pada port input. Berikut ini merupakan model blok *commutation logic* dan pola komutasi motor BLDC.



Gambar 3.20 Model blok *commutation logic*

Tabel 3.4 Pola komutasi motor BLDC

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

3.3.2 Frekuensi Generator

Blok *frequency generator* ini merupakan pembangkit sinyal pulsa dimana frekuensi yang dihasilkan dapat diatur oleh tegangan inputnya. Prinsip kerja dari *frequency generator* ini sama dengan prinsip kerja VCO dimana terdapat *frequency gain* (Hz/V) sebagai konstanta untuk menentukan sensitifitas atau akurasi *frequency generator*. Nilai *frequency gain* yang digunakan pada model ini ditentukan menggunakan persamaan berikut ini.

$$K = \frac{RPM_{max} \times P}{60 \times V_{ref} \times 2} \quad (3.19)$$

Keterangan:

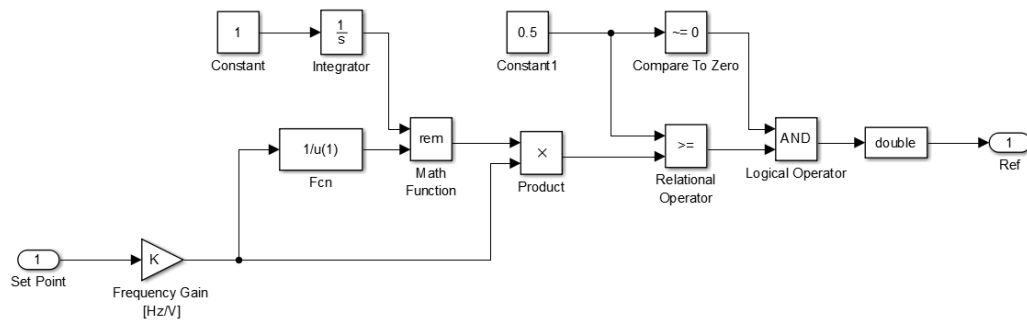
RPM_{max} = kecepatan maksimal motor (*rpm*)

K = *frequency gain* (Hz/V)

P = jumlah kutub

V_{ref} = tegangan referensi set point (V)

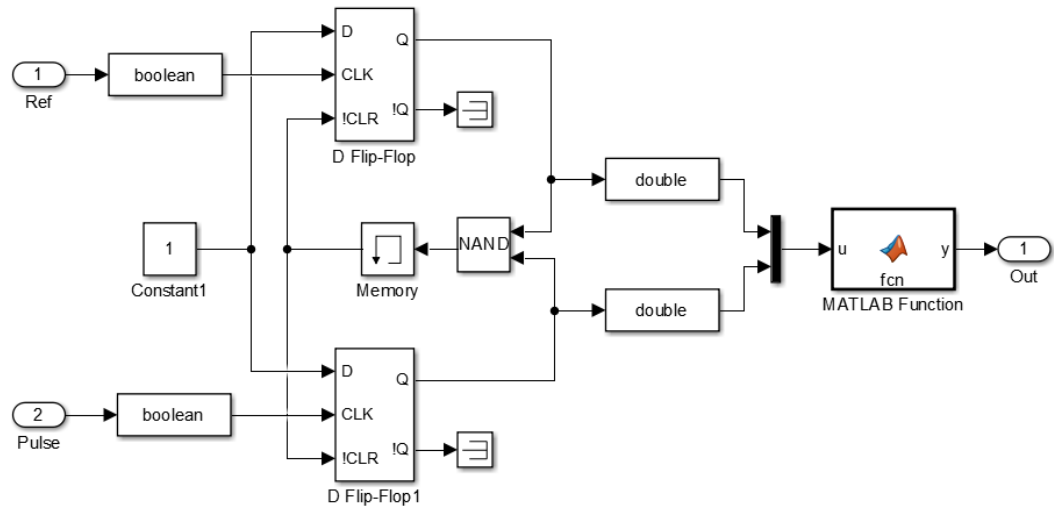
Berikut ini merupakan model blok *frequency generator*.



Gambar 3.21 Model blok *frequency generator*

3.3.3 Phase Detector

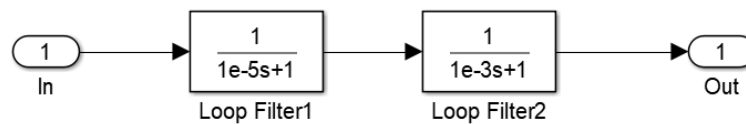
Blok *Phase Detector* berfungsi untuk mendeteksi perbedaan fasa antara sinyal referensi dengan sinyal *feedback*. Blok ini dibangun menggunakan dua buah *D-flip flop* yang berfungsi untuk mendeteksi apakah frekuensi sinyal *feedback* lebih besar atau lebih kecil dari sinyal referensi. Kemudian terdapat 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. Berikut ini merupakan model blok *phase detector*.



Gambar 3.22 Model blok *phase detector*

3.3.4 Loop Filter

Karena sinyal eror yang berasal dari blok *phase detector* merupakan sinyal pulsa dengan frekuensi tinggi, maka agar dapat diproses oleh blok *PI controller* sinyal eror perlu difilter untuk menghilangkan sinyal frekuensi tinggi dari eror sehingga menghasilkan tegangan DC. Pada blok *loop filter* ini digunakan dua buah filter orde satu dengan nilai *time constant* yaitu 1×10^{-5} detik dan 1×10^{-3} detik. Berikut ini merupakan model blok *loop filter*.

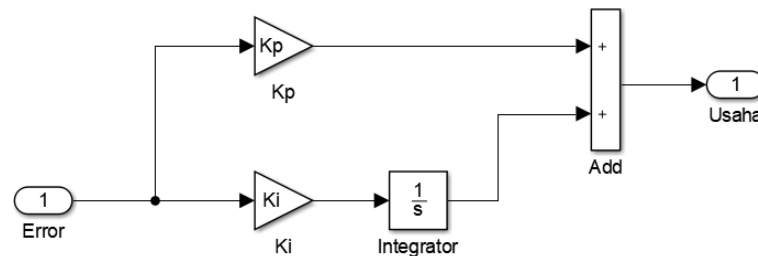


Gambar 3.23 Model blok *loop filter*

3.3.5 PI Controller

Blok *PI Controller* ini dibangun menggunakan dua buah blok gain dan sebuah blok *integrator* sebagai komponen pengendali. Input dari blok ini yaitu

sinyal eror dalam bentuk tegangan dan akan menghasilkan usaha yang juga berupa tegangan berdasarkan sinyal eror yang diterimanya. Berikut ini merupakan model blok *PI controller*.



Gambar 3.24 Model blok *PI controller*

3.4 Skenario Pengujian

Pengujian sistem kendali dilakukan dalam bentuk simulasi model pada *Simulink/Matlab* dengan beberapa skenario. Pengujian ini bertujuan untuk melakukan validasi dan verifikasi sistem agar didapatkan hasil yang diinginkan. Skenario pengujian dilakukan dalam lima tahap yaitu:

1. Pengujian daur terbuka;
2. Pengujian dengan gangguan;
3. Pengujian kondisi transien;
4. Pengujian variasi kecepatan;
5. Pengujian karakteristik pembebanan.

3.4.1 Pengujian Daur Terbuka

Pada skenario ini, model yang digunakan berupa model daur terbuka dimana pengendali PI tidak digunakan. Pengujian ini difokuskan pada model sistem penggerak motor BLDC. Pada pengujian ini, keluaran dari setiap blok sistem

penggerak motor BLDC akan direkam kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik parameter terhadap waktu. Tujuan pengujian pada skenario ini yaitu untuk memastikan fungsi dari tiap-tiap blok sistem penggerak motor BLDC berjalan sesuai dengan rancangan yang telah dibuat.

3. 4. 2 Pengujian dengan Gangguan

Pengujian ini dilakukan dengan memberikan gangguan pada motor berupa beban yang bervariasi dengan nilai tegangan *set point* konstan. Tujuan pengujian ini adalah untuk mencari nilai parameter pengendali PI terbaik.

Pada pengujian ini performa pengendali PI ditentukan berdasarkan dua parameter, yaitu error dan usaha. Error adalah selisih setiap saat antara referensi kecepatan dengan kecepatan motor yang sebenarnya. Sedangkan usaha adalah usaha yang dilakukan dalam bentuk tegangan untuk mengurangi nilai error. Kemudian nilai K_p dan K_i terbaik ditentukan dengan menggunakan metode nilai optimal suatu fungsi tujuan. Pada metode ini, performa sistem ditentukan berdasarkan nilai *root mean square* dari error (RMSE) dan *root mean square* dari usaha (RMSU). Pada sistem kendali kecepatan motor BLDC ini, performa sistem yang diinginkan yaitu sistem menghasilkan error yang serendah mungkin dengan usaha yang paling minimal. Oleh karena itu, dibuatlah fungsi tujuan berdasarkan RMSE dan RMSU. Nilai K_p dan K_i yang terbaik adalah nilai K_p dan K_i yang menghasilkan nilai optimal fungsi tujuan yaitu pada nilai J yang paling minimal. Berikut ini adalah persamaan fungsi tujuan yang digunakan.

$$J = \sqrt{(p \times RMSE)^2 + (q \times RMSU)^2} \quad (3.20)$$

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 = $1/\text{Usaha}_{\max}$

Hasil dari pengujian ini berupa data hasil pencarian nilai K_p dan K_i terbaik dan perbandingan performa motor BLDC tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI.

3. 4. 3 Pengujian Kondisi Transien

Pengujian kondisi transien dilakukan dengan melakukan perbandingan simulasi kondisi transien tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI. Input tegangan *set point* dibuat konstan dan dijalankan dalam waktu yang sangat kecil untuk melihat kecepatan respon transien motor. Tujuan pengujian ini yaitu untuk melihat pengaruh pengendali PI terhadap respon transien motor BLDC. Hasil dari pengujian ini berupa perbandingan hasil simulasi tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI.

3. 4. 4 Pengujian Variasi Kecepatan

Pada skenario ini motor disimulasikan dengan memberikan variasi pada referensi kecepatan. Simulasi dilakukan pada sistem tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI. Variasi kecepatan didapatkan dengan memberikan input tegangan *set point* yang bervariasi. Tujuan dari pengujian ini yaitu untuk melihat

pengaruh pengendali PI terhadap respon motor BLDC pada kondisi kecepatan yang bervariasi. Hasil dari pengujian ini berupa perbandingan hasil simulasi tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI.

3. 4. 5 Pengujian Karakteristik Pembebanan

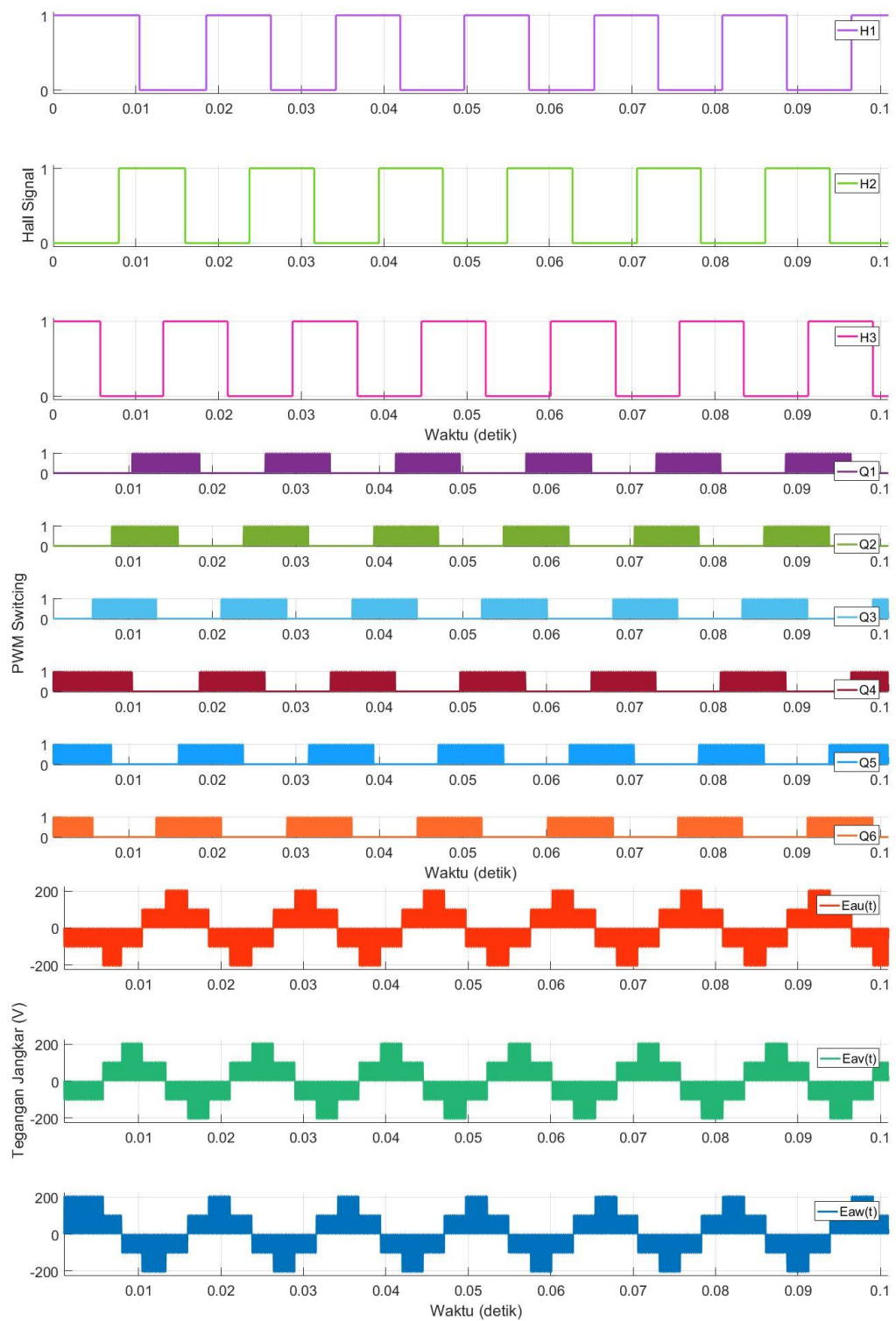
Pengujian karakteristik pembebanan motor bertujuan untuk melihat pengaruh pengendali PI terhadap linearitas motor BLDC. Pada skenario simulasi dilakukan dengan iterasi. Iterasi percobaan meliputi simulasi dengan lima referensi kecepatan dalam lima nilai beban yang berbeda. Pada setiap iterasi dilakukan pengukuran kecepatan motor yang sebenarnya. Hasil dari pengujian ini berupa perbandingan data simulasi tanpa pengendali dan dengan pengendali.

BAB 4

HASIL SIMULASI PENGUJIAN

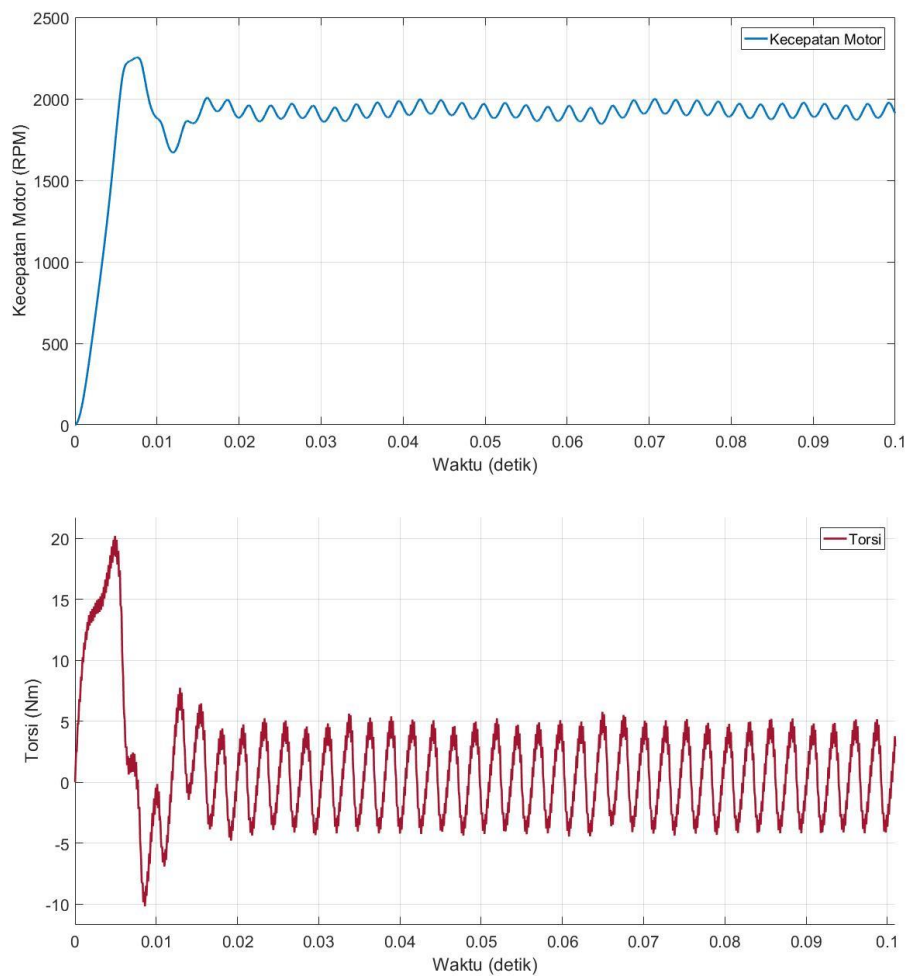
4.1 Hasil Pengujian Daur Terbuka

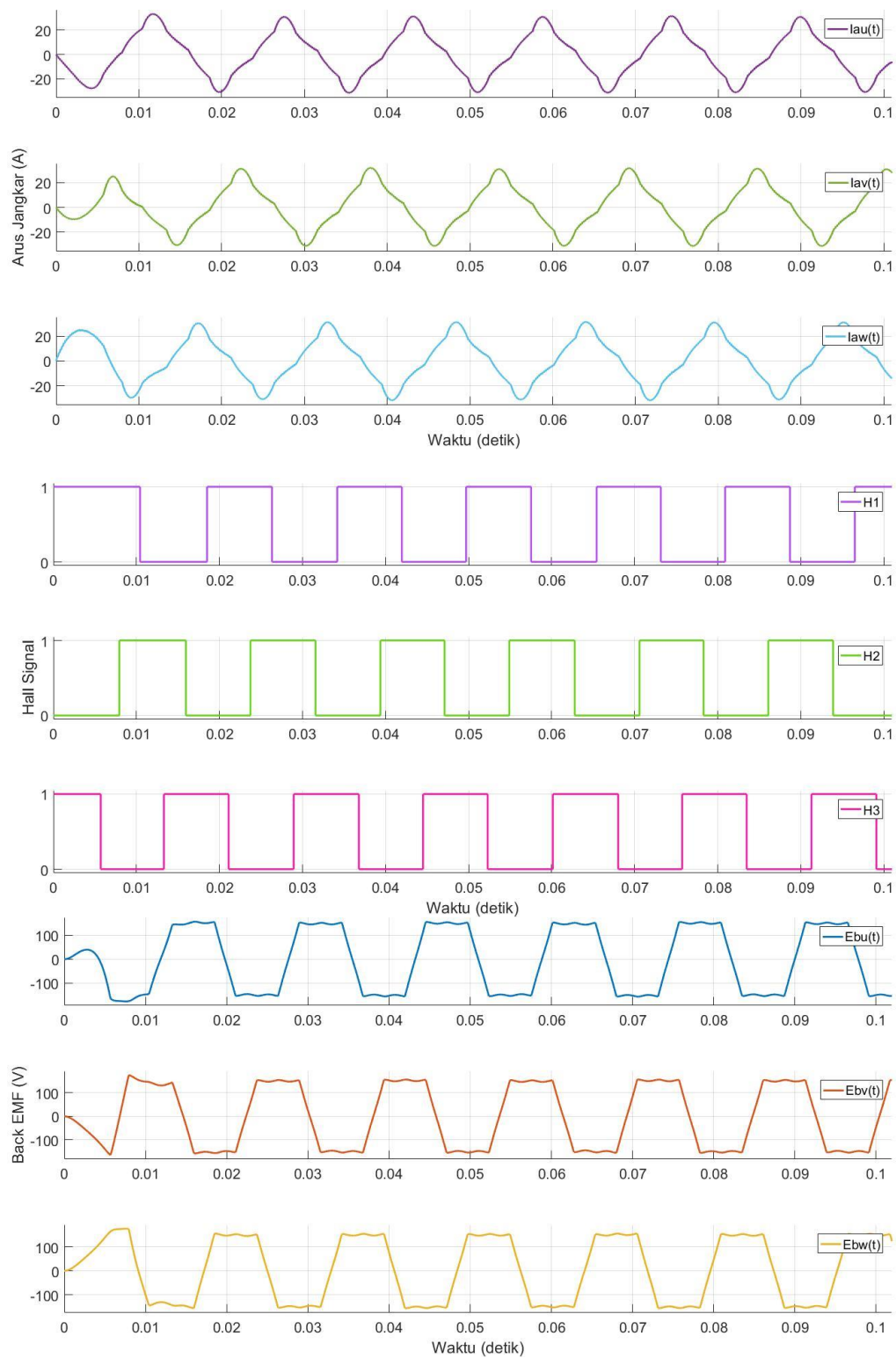
Pada pengujian ini *set point* diatur pada tegangan 3 Volt. Hasil pengujian yang didapatkan yaitu pola komutasi dan keluaran blok motor BLDC. Pola komutasi motor terdiri dari *hall signal*, *PWM switching*, dan tegangan input. Keluaran pada blok motor BLDC terdiri dari kecepatan motor, torsi, arus jangkar, *hall signal*, dan *back emf*. Berikut ini adalah hasil pola komutasi motor BLDC.



Gambar 4.1 Pola komutasi

Dapat dilihat pada gambar di atas, ketiga *hall signal* saling terpisah sebesar 120° , pola *PWM switching* berubah setiap terjadi perubahan pola *hall signal* dimana setiap sinyal *PWM switching* aktif setiap 180° , dan tegangan jangkar berbentuk *quasi square wave* dimana masing-masing fasanya terpisah sebesar 120° . Hasil ini menunjukkan bahwa model yang telah dirancang telah berhasil menghasilkan pola komutasi yang tepat. Kemudian pada gambar di bawah ini menunjukkan keluaran blok motor BLDC.





Gambar 4.2 Keluaran blok motor BLDC

Dari hasil simulasi pengujian daur terbuka ini, karakteristik kecepatan motor terlihat pada gambar di atas terdapat kondisi transien selama 0,012 detik sebelum mencapai *steady state*. Torsi yang dihasilkan mula-mula besar kemudian menurun saat motor mencapai kondisi *steady state*. Karakteristik arus jangkar tidak berbentuk sinusoidal sempurna sehingga menyebabkan torsi motor yang kurang stabil.

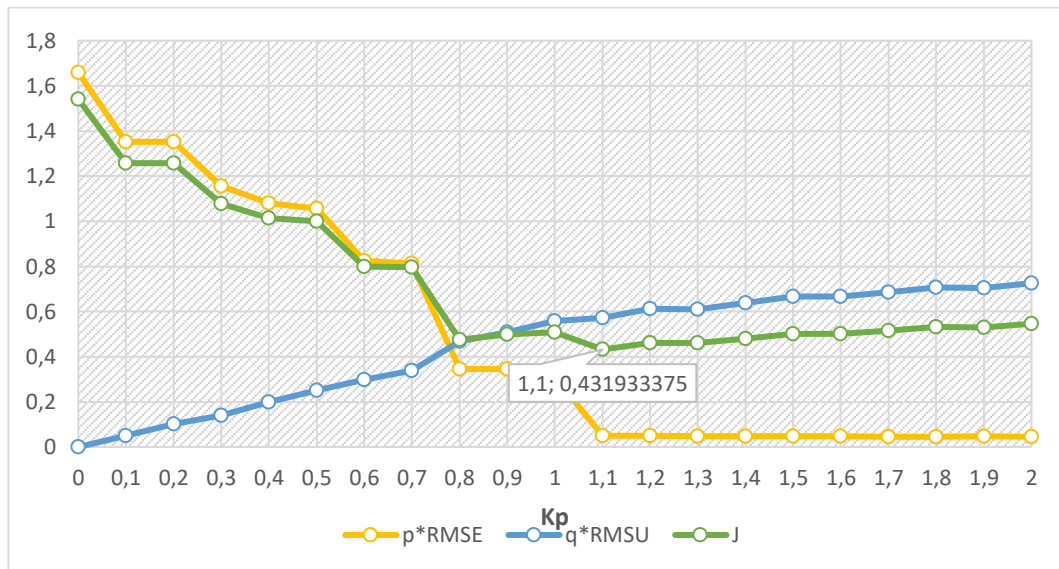
Selain itu dapat dilihat juga keluaran sinyal *hall signal* dan *back emf* yang berbentuk trapezoid. Masing-masing fasa pada *hall signal* dan *back emf* terpisah sebesar 120° . Hal ini menunjukkan bahwa model yang telah dirancang menghasilkan keluaran yang tepat.

4.2 Hasil Pengujian dengan Gangguan

Waktu simulasi pada pengujian dengan gangguan yaitu selama 45 detik. *Set point* yang diberikan yaitu sebesar 3 Volt dan referensi kecepatan sebesar 3000 rpm. Gangguan yang digunakan untuk setiap iterasi pada pengujian ini sama. Pencarian nilai parameter pengendali dimulai dari pencarian nilai K_p terbaik. Pada saat pencarian nilai K_p , nilai K_i dibuat konstan pada nilai 0. Kemudian setelah mendapatkan nilai K_p terbaik, nilai tersebut digunakan untuk mencari nilai K_i terbaik. Pencarian nilai K_p dan K_i dimulai dari 0 - 2 dengan interval sebesar 0,1. Sehingga jumlah iterasi yang dilakukan sebanyak 21 untuk masing-masing parameter. Hasil dari pencarian tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 4.1 Hasil pencarian nilai K_p terbaik

No	K_p	K_i	p^*RMSE	q^*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

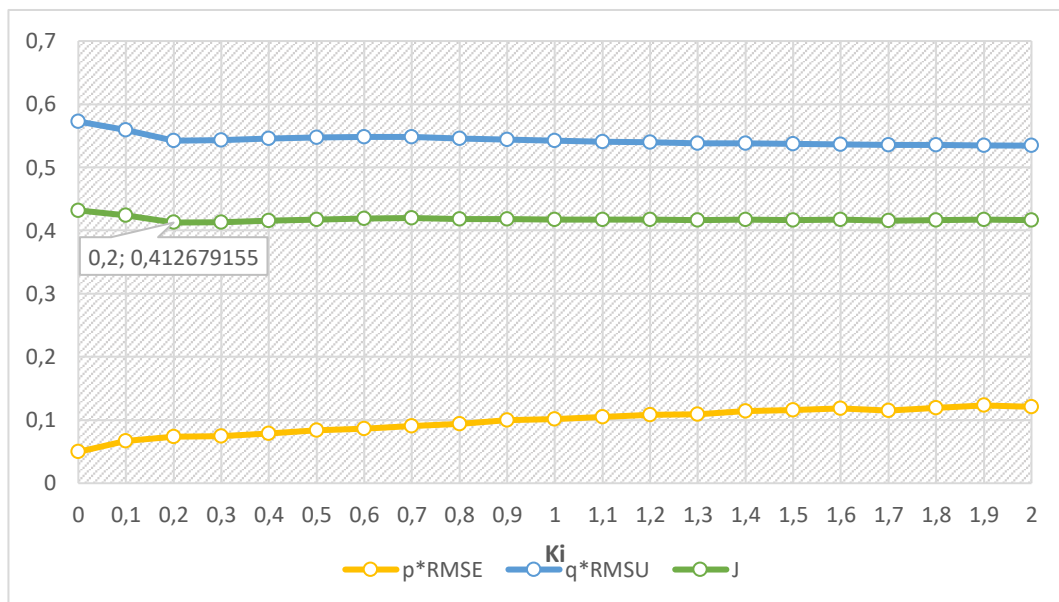


Gambar 4.3 Grafik hasil pencarian nilai K_p terbaik

Tabel 4.2 Hasil pencarian nilai K_i terbaik

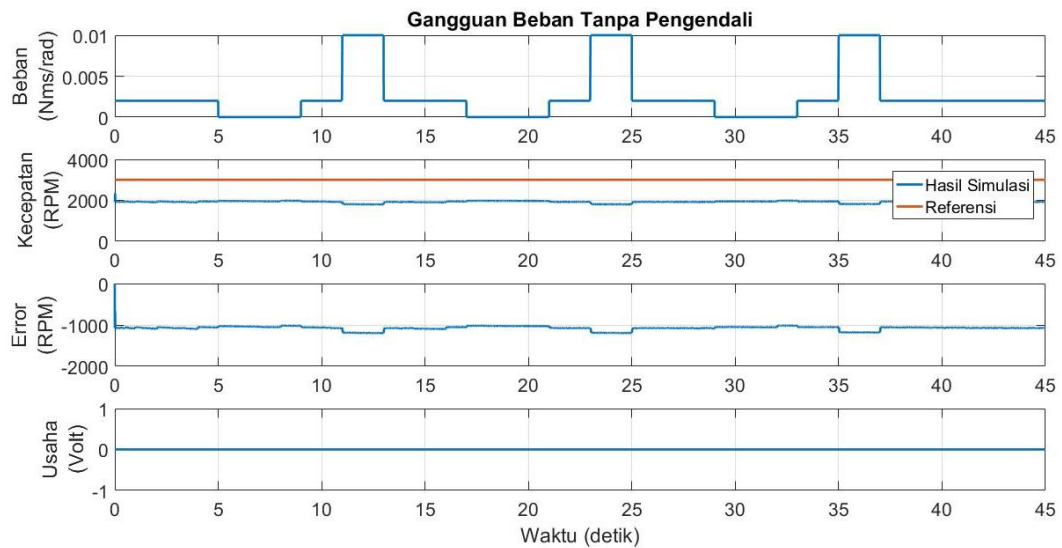
No	K_p	K_i	p^*RMSE	q^*RMSU	J
1	1,1	0	0,049661	0,57262	0,431933
2	1,1	0,1	0,066975	0,559118	0,423925
3	1,1	0,2	0,073848	0,542589	0,412679
4	1,1	0,3	0,074803	0,542769	0,41296
5	1,1	0,4	0,079068	0,545348	0,415548
6	1,1	0,5	0,083407	0,547077	0,417554
7	1,1	0,6	0,086735	0,548303	0,41904
8	1,1	0,7	0,09054	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

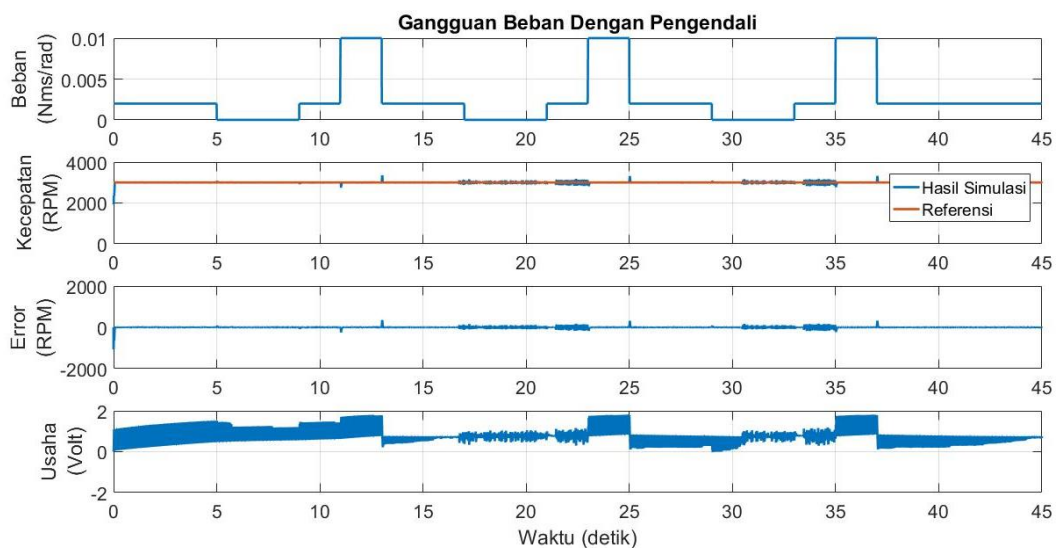


Gambar 4.4 Grafik hasil pencarian nilai K_i terbaik

Dapat dilihat dari hasil pencarian tersebut diatas, didapatkan nilai K_p terbaik yaitu 1,1 dengan nilai J yaitu sebesar 0,431933 dan nilai K_i terbaik yaitu 0,2 dengan nilai J yaitu sebesar 0,412679. Kemudian perbandingan hasil simulasi performa motor BLDC pada pengujian dengan gangguan tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI menggunakan nilai K_p dan K_i terbaik yaitu sebagai berikut.



Gambar 4.5 Hasil simulasi pengujian gangguan tanpa pengendali PI



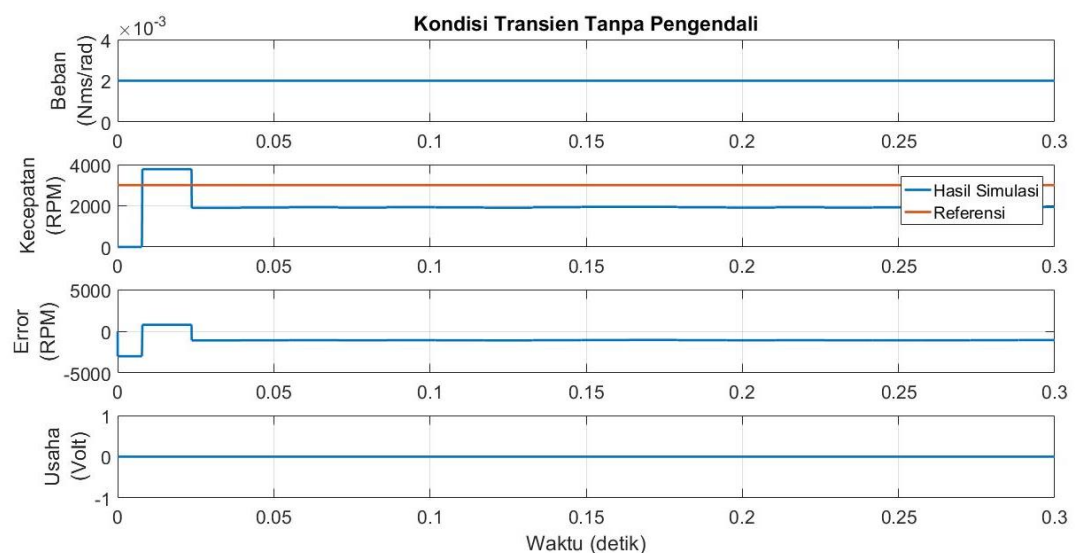
Gambar 4.6 Hasil simulasi pengujian gangguan dengan pengendali PI

Dapat dilihat pada Gambar 4.5 respon kecepatan motor hasil simulasi berbeda dengan referensi kecepatan yang diberikan sehingga menghasilkan eror sebesar -1000 rpm. Selain itu saat terjadi gangguan motor tidak dapat mempertahankan kecepatannya. Hal ini terjadi karena motor belum menggunakan

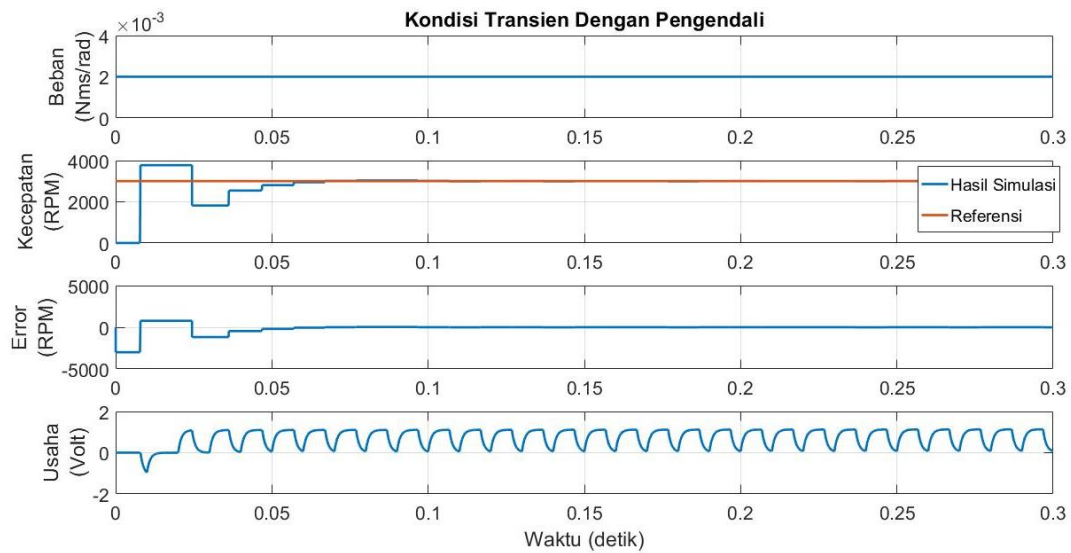
pengendali sehingga usaha untuk mengurangi eror adalah 0. Setelah menggunakan pengendali PI, terlihat pada Gambar 4.6, terdapat usaha yang dihasilkan oleh pengendali sehingga terjadi perubahan yang signifikan pada respon kecepatan motor. Kecepatan motor hasil simulasi berhasil mencapai referensi kecepatan yang diberikan yaitu sebesar 3000 rpm dan hanya terjadi sedikit perubahan pada saat terjadi gangguan. Sehingga menghasilkan eror yang sangat kecil dan nilai RMSE turun dari 1078,242 menjadi 48,001.

4.3 Hasil Pengujian Kondisi Transien

Simulasi yang dilakukan pada skenario pengujian ini berlangsung selama 0,3 detik. *Set point* diatur pada tegangan 3 Volt dengan referensi kecepatan sebesar 3000 rpm. Berikut ini merupakan hasil simulasi pengujian kondisi transien motor BLDC.



Gambar 4.7 Hasil simulasi pengujian kondisi transien tanpa pengendali PI

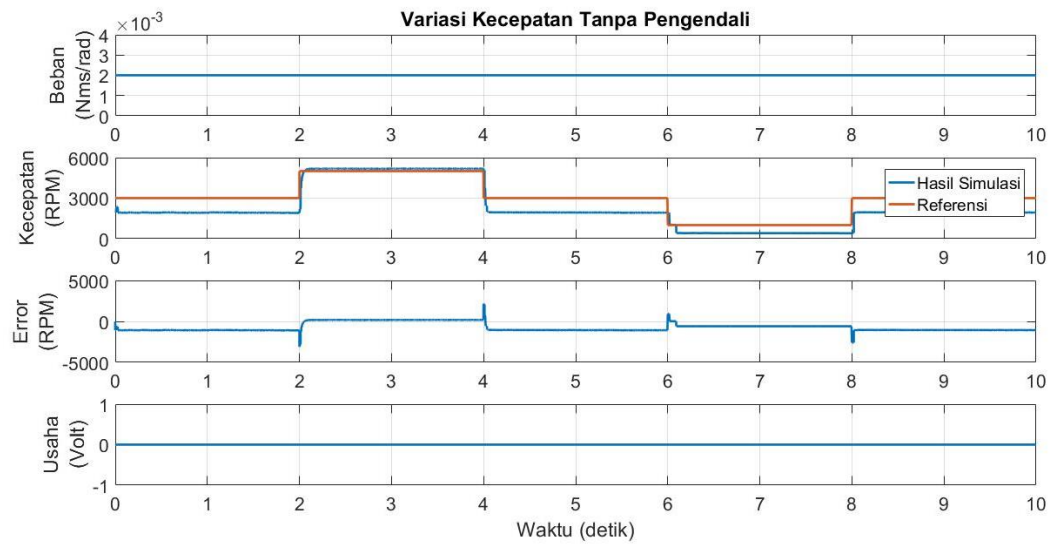


Gambar 4.8 Hasil simulasi pengujian kondisi transien dengan pengendali PI

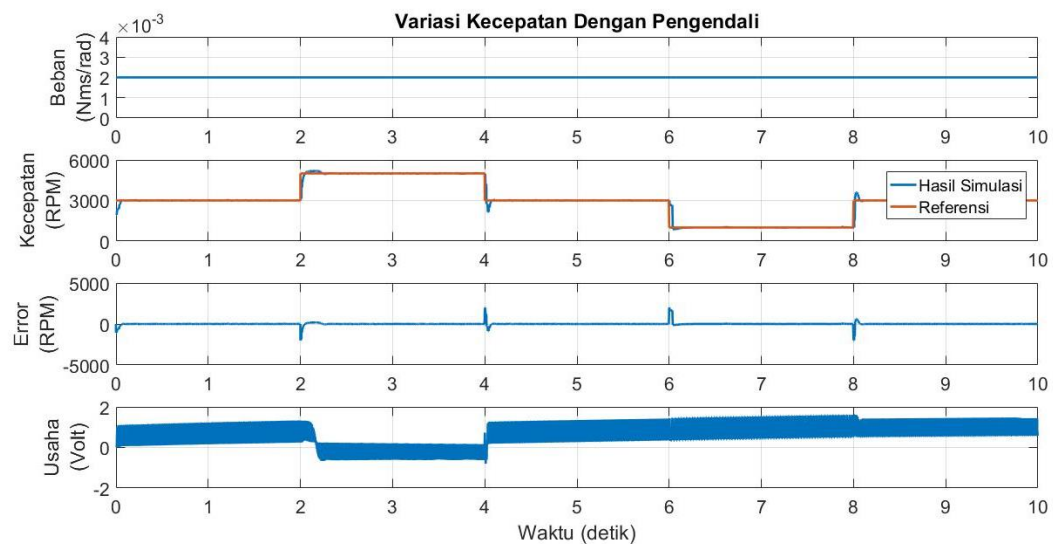
Pada Gambar 4.7 terlihat bahwa terdapat *overshoot* kecepatan mencapai 3800 rpm motor. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *steady state* yaitu selama 0,025 detik. Pada hasil simulasi ini juga terdapat *steady state error* sebesar -1000 rpm. Setelah menggunakan pengendali PI *steady state error* berkurang hingga mencapai 0 rpm. Tetapi waktu untuk mencapai kondisi *steady state* bertambah menjadi 0,07 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Selain itu masih terdapat *overshoot* kecepatan.

4.4 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan

Pada skenario pengujian ini simulasi dijalankan selama 10 detik. Variasi kecepatan dibuat dengan menaikkan dan menurunkan kecepatan sebesar 2000 rpm dari kecepatan referensi. Jadi variasi kecepatan yang diberikan yaitu 3000 rpm, 5000 rpm, dan 1000 rpm. Berikut ini adalah hasil simulasi pengujian variasi kecepatan motor BLDC.



Gambar 4.9 Hasil simulasi pengujian variasi kecepatan tanpa pengendali PI



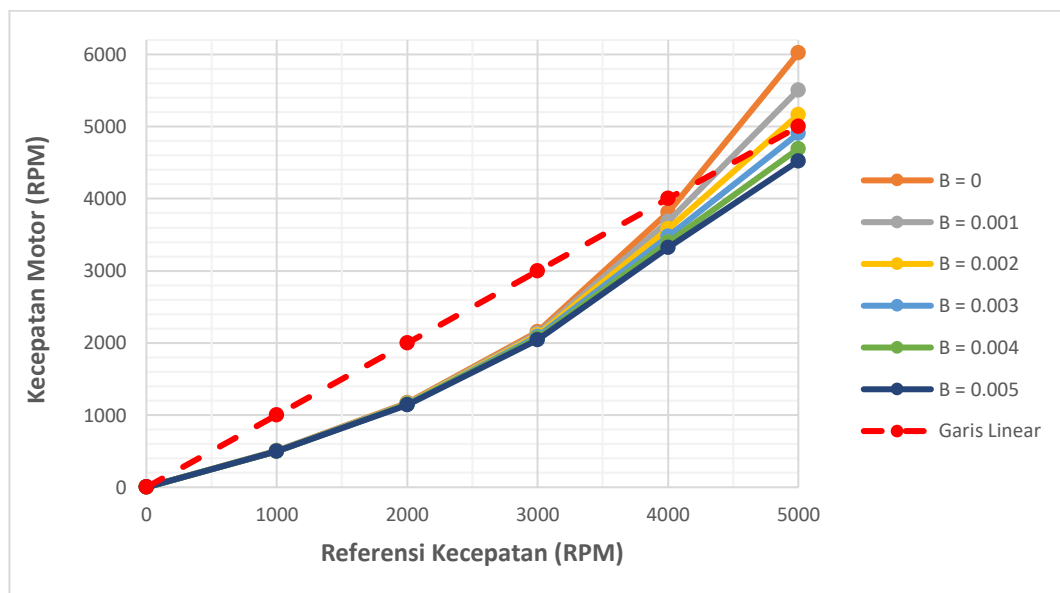
Gambar 4.10 Hasil simulasi pengujian variasi kecepatan dengan pengendali PI

Dari hasil simulasi tersebut diatas, dapat dilihat kecepatan hasil simulasi tanpa pengendali PI tidak dapat mengikuti perubahan referensi kecepatan yang diberikan. Hal ini terjadi karena belum terdapat usaha yang dilakukan oleh pengendali untuk menguraangi error. Setelah menggunakan pengendali PI terjadi perubahan hasil yang signifikan terhadap kecepatan motor BLDC. Dimana

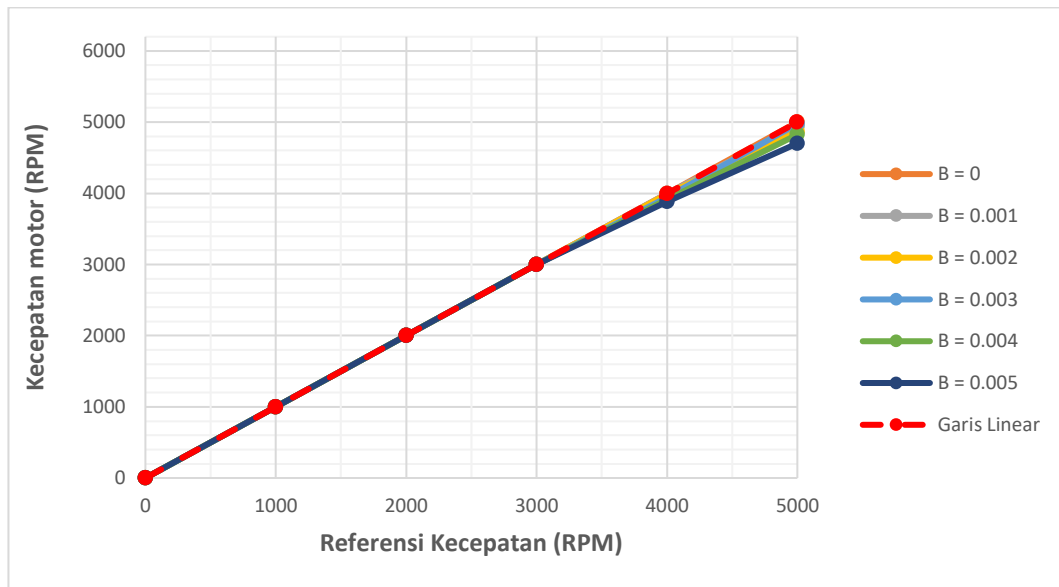
kecepatan hasil simulasi dapat mengikuti perubahan referensi kecepatan dengan hanya terjadi sedikit *overshoot* disetiap transisi nilai kecepatan. Selain itu, nilai RMSE setelah menggunakan pengendali PI menurun dari 890,2436 menjadi 192,0067.

4.5 Hasil Pengujian Karakteristik Pembebanan

Simulasi pengujian karakteristik pembebanan motor BLDC dijalankan selama 10 detik dengan iterasi sebanyak lima kali yang meliputi lima nilai referensi kecepatan untuk lima enam nilai beban yang berbeda. Nilai beban yang diberikan pada pengujian ini yaitu pada beban 0 – 0,005 Nms/rad dengan interval sebesar 0,001 Nms/rad. Berikut ini adalah hasil pengujian karakteristik pembebanan motor BLDC.



Gambar 4.11 Karakteristik pembebanan motor BLDC tanpa pengendali PI



Gambar 4.12 Karakteristik pembebanan motor BLDC dengan pengendali PI

Dari Gambar 4.11 terlihat bahwa motor BLDC yang digunakan merupakan motor yang tidak linear. Hal ini terlihat pada semua nilai beban yang diberikan, grafik hubungan kecepatan motor terhadap referensi kecepatan menjauhi garis linear. Setelah menggunakan pengendali PI terjadi perubahan yang signifikan pada grafik. Grafik untuk semua nilai beban tampak merapat menuju garis linear pada rentang kecepatan 0 – 3000 rpm, lalu kemudian terjadi sedikit penyimpangan grafik pada rentang kecepatan 3000 – 5000 rpm untuk beban 0,004 Nms/rad dan 0,005 Nms/rad. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali PI yang disematkan pada model sistem kendali kecepatan motor BLDC dapat melinearkan motor.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 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 commutation* dan menggunakan pengendali PI dengan struktur PLL sebagai pengendali kecepatan daur tertutup.
2. Dari hasil pencarian yang telah dilakukan, nilai K_p dan K_i terbaik yang didapatkan berdasarkan nilai optimal fungsi tujuan J yaitu $K_p = 1,1$ dan $K_i = 0,2$ dengan $J = 0,412679$.
3. Berdasarkan hasil pengujian, setelah menggunakan pengendali PI maka respon terhadap gangguan menjadi lebih baik dimana RMSE turun dari 1078,242 menjadi 48,001, nilai *steady state error* pada kondisi transien menurun dari 1000 rpm menjadi 0 rpm tetapi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai *steady state* lebih lambat yaitu dari 0,0025 detik menjadi 0,007 detik, dan respon terhadap variasi kecepatan menjadi lebih baik dimana kecepatan motor hasil simulasi dapat mengikuti perubahan referensi kecepatan dengan nilai RMSE berubah dari 890,2436 menjadi 192,0067. Selain itu, penggunaan pengendalian PI dapat melinearkan motor BLDC.

5.2 Saran

Adapun saran yang diharapkan dapat menunjang pengembangan dan penelitian penyempurnaan penelitian terkait adalah sebagai berikut:

1. Melakukan analisis yang lebih jauh mengenai metode yang paling tepat untuk setiap aplikasi motor BLDC yang berbeda.
2. Menggunakan sensor yang tepat untuk mendeteksi kecepatan motor yang akurat.
3. Menggunakan sinyal *feedback* kecepatan sebagai pengganti *feedback* pulsa pada model sistem kendali kecepatan pengendali PI untuk menyederhanakan algoritma pengendalian.
4. Mengembangkan struktur pengendali untuk mengendalikan torsi motor.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Dharmawan, “Pengendalian Motor Brushless DC dengan Metode PWM Sinusoidal menggunakan ATMEGA16,” Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [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] 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.
- [5] A. P. C. Rao, Y. P. Obulesh dan C. S. Babu, “Mathematical Modeling of BLDC Motor with Closed Loop Speed Control Using PID Controller Under Various Conditions,” *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, pp. 1321-1328, 2012.
- [6] 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.

- [7] R. Parikh, "Operation Overview of Three Phase Inverter with 120o, 150o, and 180o Conduction Mode," *International Journal For Technological Research in Engineering*, pp. 33-36, 2017.
- [8] A. M. Ahmed, M. S. Elksasy, A. Ali-Eldin dan F. F. Freed, "Brushless DC Motor Speed Control using both PI Controller and Fuzzy PI Controller," *International Journal of Computer Applications*, vol. 109, pp. 29-35, 2015.
- [9] 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.
- [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.

LAMPIRAN