



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

DESAIN DAN IMPLEMENTASI INVERTER TIGA FASA
DALAM PENGENDALIAN MOTOR *BRUSHLESS* DC
SENSORLESS DENGAN METODE DETEKSI *BACK-EMF*
PADA PESAWAT TANPA AWAK

Arif Rachman Hakim
NRP 0711154000072

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI INVERTER TIGA FASA
DALAM PENGENDALIAN MOTOR *BRUSHLESS* DC
SENSORLESS DENGAN METODE DETEKSI *BACK-EMF*
PADA PESAWAT TANPA AWAK**

Arif Rachman Hakim
NRP 0711154000072

Dosen Pembimbing
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

**DESIGN AND IMPLEMENTATION 3-PHASE INVERTER
CONTROL OF BLDC SENSORLESS MOTOR WITH BACK
ELECTROMOTIVE FORCE (EMF) METHOD FOR
UNMANNED AERIAL VEHICLE**

Arif Rachman Hakim
NRP 0711154000072

Supervisors
Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

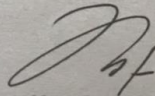
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa seluruh isi pada tugas akhir ini dengan judul "**DESAIN DAN IMPLEMENTASI INVERTER TIGA FASA DALAM PENGENDALIAN MOTOR *BRUSHLESS DC SENSORLESS* DENGAN METODE DETEKSI *BACK-EMF* PADA PESAWAT TANPA AWAK**" adalah merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan sumber materi yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2019



Arif Rachman Hakim
0711154000072

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI INVERTER TIGA FASA
DALAM PENGENDALIAN MOTOR *BRUSHLESS* DC
SENSORLESS DENGAN METODE DETEKSI *BACK-EMF* PADA
PESAWAT TANPA AWAK**

TUGAS AKHIR

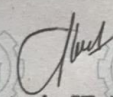
**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19800603 200604 1 003


Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.
NIP. 19651012 199003 1 003



**SURABAYA
JULI, 2019**

iii

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI INVERTER TIGA FASA
DALAM PENGENDALIAN MOTOR *BRUSHLESS* DC
SENSORLESS DENGAN METODE DETEKSI *BACK-EMF* PADA
PESAWAT TANPA AWAK**

Nama : Arif Rachman Hakim
Dosen Pembimbing I : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Doaen Pembimbing II : Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.

ABSTRAK

Motor *Brushless* DC telah digunakan diberbagai aplikasi salah satunya pada pesawat tanpa awak. Motor BLDC mempunyai magnet permanen pada bagian rotor dan elektromagnet pada bagian stator. Komutasi motor BLDC menggunakan inverter tiga fasa untuk membuat putaran pada kutub magnet. Informasi posisi rotor digunakan untuk memutar motor BLDC agar kutub magnet yang muncul pada belitan dapat berada pada posisi yang tepat sesuai dengan posisi kutub magnet permanen. Terdapat metode *back-emf* untuk mendeteksi posisi rotor. Skema *back-emf* berfungsi membaca keadaan *floating* pada motor yang terdeteksi selama *Pulse Width Modulation* (PWM) dalam keadaan *off*. Pembacaan *back-emf* menggunakan komparator dengan menghubungkan titik *virtual neutral* yang dikomparasi dengan ground. Adapun pendekatan *zero crossing* merupakan salah satu metode paling sederhana deteksi *back-emf* yang mana pendeteksian saat kurva *back-emf* pada fasa sama dengan nol. *Zero crossing* ini berfungsi untuk menentukan frekuensi suatu gelombang dengan cara mendeteksi banyaknya *zero point* pada suatu rentang waktu.

Dari hasil implementasi didapatkan bahwa sistem kendali kecepatan motor BLDC *sensorless* dengan metode *back-emf* menunjukkan bahwa semakin tinggi frekuensi PWM, maka semakin besar tegangan *back-emf* yang terbangkit. Selain itu, semakin tinggi nilai frekuensi PWM, maka semakin besar kecepatan motor BLDC. Dari segi efisiensi sistem kendali kecepatan motor BLDC memiliki efisiensi saat pengujian tanpa beban maksimum 73% dan berbeban maksimum 77%.

Kata kunci : *Back-emf*, Frekuensi PWM, *Six-Step Commutation*, Motor BLDC, *Zero Crossing Point*

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

**DESIGN AND IMPLEMENTATION 3-PHASE INVERTER
CONTROL OF BLDC SENSORLESS MOTOR WITH BACK
ELECTROMOTIVE FORCE (EMF) METHOD FOR
UNMANNED AERIAL VEHICLE**

Name : Arif Rachman Hakim
Supervisor I : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.
Supervisor I : Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.

ABSTRACT

Brushless DC motors have been used in various applications, one of them on unmanned aircraft. The BLDC motor has a permanent magnet on the rotor and electromagnet parts of the stator. The commutation of a BLDC motor uses a three phase inverter to make a rotation on the magnetic pole. Information on the position of the rotor is used to rotate the BLDC motor so that the magnetic pole that appears on the windings can be in the right position according to the position of the permanent magnet pole. There is a back-emf method for detecting the position of the rotor. The back-emf scheme functions to read the floating state on a motor that is detected during Pulse Width Modulation (PWM) off. Back-emf readings use a comparator by connecting a virtual neutral point that is compared with ground. The zero crossing approach is one of the simplest methods of back-emf detection which detects when the back-emf curve on phase is zero. Zero crossing serves to determine the frequency of a wave by detecting the number of zero points in a time range.

From the results of the implementation it was found that the sensorless BLDC motor speed control system with the back-emf method showed that the higher the PWM frequency, the greater the back-emf voltage generated. In addition, the higher the PWM frequency value, the greater the BLDC motor speed. In terms of efficiency, the BLDC motor speed control system has an efficiency when testing without a maximum load of 73% and a maximum load of 77%.

Keywords : Back-emf, BLDC Motor, PWM Frequency, Six-step Commutation, Zero Crossing Point.

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

KATA PENGANTAR

Puji Syukur atas keadirat Tuhan Yang Maha Esa dan segala rahmat yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI INVERTER TIGA FASA DALAM PENGENDALIAN MOTOR BRUSHLESS DC SENSORLESS DENGAN METODE DETEKSI BACK-EMF PADA PESAWAT TANPA AWAK**” dengan tepat waktu.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya pembuatan laporan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga Penulis terutama Bapak Sarijan, Ibu Wariyani, dan Mas Eko Suwarno, S.E. yang selalu mendukung baik secara moral dan material.
2. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D dan Bapak Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan dan petunjuk dalam menyelesaikan laporan tugas akhir.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu pada saat perkuliahan maupun diluar perkuliahan.
4. Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia yang telah memberikan bantuan biaya pendidikan yaitu Beasiswa BIDIKMISI selama menjalankan perkuliahan di ITS.
5. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik yang telah memberi masukan-masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
6. Teman-teman Trainer Keilmiah ITS Batch 7 yang selalu kompak dan berjuang bersama di tahun terakhir.
7. Keluarga Kementerian Riset dan Teknologi BEM ITS yang sudah memberi kebahagiaan dan hiburan selama masa pengerjaan Tugas Akhir ini.
8. Teman-teman e-55 yang saling berjuang dan memberi semangat satu sama lain dalam pengerjaan tugas akhir.

9. Teman-teman saya sewaktu SMA yang sudah memberi dukungan supaya tugas akhir ini dapat selesai tepat waktu.

Penulis menyadari bahwa terdapat banyak ketidaksempurnaan pada laporan tugas akhir ini, oleh karena itu diharapkan saran dari pembaca agar nantinya laporan tugas akhir ini dapat menjadi referensi yang berguna bagi penelitian selanjutnya.

Surabaya, Juli 2019

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Tugas Akhir.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 SISTEM PENGENDALIAN MOTOR BLDC DENGAN <i>SIX-STEP COMMUTATION</i>	5
2.1 Motor BLDC	5
2.2 Bagian-Bagian Sistem Kendali Motor BLDC	9
2.2.1 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor).....	9
2.2.2 <i>Optocoupler</i>	12
2.3 Sistem Pengendalian Motor BLDC	12
2.3.1 Inverter Tiga Fasa	12
2.3.2 Metode Pendeteksian Perubahan Komutasi	13
2.3.3 Metode Kontrol Tegangan dengan PWM	18
BAB 3 DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI.....	21
3.1 Diagram Blok Sistem.....	21
3.2 Inverter dan Suplai DC	22
3.3 Rangkaian Driver Inverter Tiga Fasa	23
3.4 Rangkaian Pendeteksian Sinyal <i>Back-emf</i>	26

3.5	Algoritma Pengendalian Motor BLDC <i>Sensorless</i> ...	28
3.6	Rangkaian Mikrokontroler	34
3.7	Hasil Implementasi Sistem Pengendalian Motor BLDC <i>Sensorless</i>	35
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA		39
4.1	Alat Pengujian Sistem Pengendalian Motor BLDC <i>Sensorless</i>	39
4.2	Pengujian Sinyal PWM	40
4.3	Pengujian Deteksi <i>Back-emf</i>	43
4.4	Pengujian Inverter Tiga Fasa	46
4.5	Pengujian Sistem Pengendalian Motor BLDC	47
4.5.1	Pengujian Sistem Tanpa Beban	47
4.5.2	Pengujian Sistem dengan Pembebanan	48
BAB 5 PENUTUP.....		53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran.....	53
DAFTAR PUSTAKA.....		55
LAMPIRAN.....		57
1.	Pengujian Tanpa Beban.....	57
2.	Datasheet	58
3.	Program Arduino	60
BIODATA PENULIS.....		71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Rotasi Rotor.....	5
Gambar 2.2 Distribusi Fluks pada Fasa A.....	6
Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC Tiga Fasa	8
Gambar 2.4 Konfigurasi Saklar Elektrik	13
Gambar 2.5 Grafik Karakteristik MOSFET, I_D sebagai Fungsi V_{DS} dengan Parameter V_{GS}	11
Gambar 2.6 Konfigurasi Saklar Elektrik.....	13
Gambar 2.7 Bentuk Ideal <i>back-emf</i> dan Arus di Setiap Fasa.....	14
Gambar 2.8 Skema <i>Back-emf Zero Crossing Detection</i> dengan <i>Virtual Neutral Point</i>	15
Gambar 2.9 Gelombang Arus Tiga Fasa.....	16
Gambar 2.10 Skema Proses Komutasi.....	17
Gambar 2.11 Metode Kontrol dengan PWM Konvensional.....	18
Gambar 3.1 Diagram Keseluruhan Sistem Pengendalian Motor BLDC dengan Deteksi <i>Back-emf</i>	21
Gambar 3.2 Diagram Kerja Kendali Motor BLDC.....	21
Gambar 3.3 Skematik Inverter dan Suplai DC.....	22
Gambar 3.4 Rangkain IR2104.....	24
Gambar 3.5 Rangkaian Driver Inverter.....	26
Gambar 3.6 Skematik Pendeteksian Sinyal <i>Back-emf</i>	27
Gambar 3.7 Hasil Simulasi Sinyal <i>Back-emf</i>	28
Gambar 3.8 Diagram Alir Kendali Motor BLDC <i>Sensorless</i>	29
Gambar 3.9 (a). <i>Output</i> PWM pin 5, 4, dan 3 (b). <i>Output</i> PWM pin 11, 10, dan 9.....	30
Gambar 3.10 Proses Komutasi pada Motor BLDC.....	32
Gambar 3.11 Rangkaian Inverter <i>Full Bridge</i>	33
Gambar 3.12 Hasil Simulasi Inverter <i>Full Bridge</i>	33
Gambar 3.13 Skematik Sistem Mikrokontroler.....	34
Gambar 3.14 Hasil Implementasi Alat.....	37
Gambar 4.1 Pengujian Rangkaian Sistem Pengendalian Motor BLDC <i>Sensorless</i>	39
Gambar 4.2 (a). <i>Output</i> PWM <i>high</i> input (b) <i>Output</i> PWM <i>low</i> input...	41

Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Nilai Variasi Terhadap Frekuensi PWM.....	42
Gambar 4.4 Pengujian <i>back-emf</i> dan <i>zero crossing</i>	43
Gambar 4.5 Kombinasi Tiga Fasa <i>Back-emf</i>	44
Gambar 4.6 Grafik Frekuensi PWM Terhadap Tegangan <i>Back-emf</i>	45
Gambar 4.7 Tegangan <i>Output</i> Inverter Tiga Fasa.....	46
Gambar 4.8 Grafik Frekuensi PWM Terhadap Kecepatan (tanpa beban).....	48
Gambar 4.9 Grafik Frekuensi PWM Terhadap Kecepatan (berbeban).....	50
Gambar 4.10 Hubungan <i>Thrust</i> dengan Kecepatan.....	51

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Keadaan <i>back-emf</i> pada Proses Komutasi.....	16
Tabel 3.1 Spesifikasi Motor BLDC EMAX XA2212 980 KV.....	22
Tabel 3.2 Pengaturan Sakelar Inverter 3 Fasa.....	31
Tabel 3.3 Komponen Implementasi Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC <i>Sensorless</i>	36
Tabel 4.1 Pengaruh Nilai Variasi terhadap Frekuensi PWM.....	42
Tabel 4.2 Pengujian Frekuensi PWM Terhadap Tegangan <i>Back-emf</i>	45
Tabel 4.3 Pengujian Sistem Tanpa Beban.....	47
Tabel 4.4 Pengujian Sistem Berbeban.....	49

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor *brushless* DC (tanpa sikat) telah digunakan diberbagai aplikasi salah satunya pada pesawat tanpa awak. Hal ini dikarenakan motor BLDC memiliki struktur yang sederhana dan pengaturan kecepatan tinggi serta respon dinamis yang cepat karena inersia rotor kecil [1]. Selain itu, motor BLDC memiliki efisiensi tinggi akibat adanya magnet permanen, kerapatan daya yang tinggi dan torsi keluaran yang besar [2].

Motor BLDC mempunyai magnet permanen pada bagian rotor dan elektromagnet pada bagian stator. Komutasi motor BLDC menggunakan inverter tiga fasa untuk membuat putaran pada kutub magnet. Informasi posisi rotor digunakan untuk memutar motor BLDC agar kutub magnet yang muncul pada belitan dapat berada pada posisi yang tepat sesuai dengan posisi kutub magnet permanen [3]. Penggunaan *hall effect* merupakan cara yang sering dipakai untuk mengetahui posisi rotor. Namun, penggunaan sensor posisi rotor *hall effect* memiliki kompleksitas dan biaya yang tinggi [4].

Sistem kendali motor BLDC dengan sensor posisi akan meningkatkan biaya dan ukuran motor karena kebutuhan untuk meletakkan sensor pada motor BLDC. Jika menggunakan *hall effect*, sensor ini sangat peka temperatur yang menyebabkan reduksi reliabilitas karena penempatan komponen dan pengkabelan. Oleh karena itu, motor BLDC tanpa sensor (*sensorless*) menjadi solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut [5]. Terdapat dua tipe teknik kendali tanpa sensor yaitu metode *back-emf* untuk mendeteksi posisi rotor dan metode estimasi berdasarkan parameter motor, tegangan, dan arus. Namun pada metode estimasi memiliki kompleksitas komputasinya, umumnya memerlukan *digital signal processor* (DSP) dan memerlukan biaya yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan metode *back-emf*. Sehingga metode *back-emf* lebih sering digunakan [6]. Skema *back-emf* berfungsi membaca keadaan floating pada motor yang terdeteksi selama *Pulse Width Modulation* (PWM) dalam keadaan *off*. Pembacaan *back-emf* menggunakan *op-Amp* dengan menghubungkan titik *virtual neutral* yang dikomparasi dengan *ground* [7].

Oleh karena itulah untuk implementasi pengendalian kecepatan motor BLDC tanpa sensor pada pesawat tanpa awak diperlukan kontrol

kecepatan dengan menggunakan metode *back-emf* sebagai pendeteksi posisi rotor. Pada penelitian ini akan dikaji tentang skema pengendalian motor BLDC tanpa sensor, algoritma pembacaan deteksi posisi rotor dan urutan komutasi yang sesuai untuk mengatur pensaklaran transistor daya pada inverter tiga fasa serta frekuensi PWM saat kondisi berbeban dan tanpa beban.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Pembahasan skema pengendalian motor BLDC tanpa sensor dengan metode *back-emf*.
2. Perancangan sistem pengendalian motor BLDC dengan kontrol tegangan berbasis PWM yang diterapkan menggunakan mikrokontroler arduino uno.
3. Hubungan kecepatan terhadap frekuensi PWM yang digunakan pada kondisi berbeban dan tanpa beban.
4. Hubungan efisiensi inverter tiga fasa pada kondisi berbeban dan tanpa beban.

1.3 Tujuan Tugas Akhir

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk

1. Mendapatkan skema pengendalian motor BLDC tanpa sensor dengan metode *back-emf*.
2. Mendapatkan parameter-parameter dari sistem pengendalian motor BLDC.
3. Pengujian nilai frekuensi PWM pada kecepatan motor BLDC.
4. Pengujian efisiensi inverter tiga fasa pada kondisi berbeban dan tanpa beban.

1.4 Batasan Masalah

1. Parameter motor BLDC yang digunakan adalah EMAX XA2212 980 KV.
2. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang terdapat di pasaran dan peralatan uji di Laboratorium Konversi Energi Listrik.
3. Analisa serta perhitungan dilakukan saat kondisi *steady state* serta semua komponen dianggap ideal.
4. Pembebanan yang digunakan adalah propeller 10x4,5 cm.
5. Pengujian dilakukan dengan *open loop system*.

1.5 Metodologi

Metodologi penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Tahap awal dari penelitian ini mencari literatur dari hasil penelitian sebelumnya, buku maupun internet untuk mengetahui karakteristik komponen, prinsip kerja serta teori yang menunjang lainnya. Diharapkan dengan literatur yang didapat bisa memberikan arahan untuk mengurangi kesalahan dalam penelitian.

2. Perancangan simulasi

Pada tahap ini dilakukan simulasi perancangan sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan rangkaian mikrokontroler, rangkaian *power supply* dan model rangkaian *inverter* tiga fasa serta rangkaian pendeteksi sinyal *back-emf* pada *software* Proteus 8.0.

3. Perancangan *hardware*

Dalam perancangan dan pembuatan alat pada penelitian ini terdiri dari perancangan skematik dan pembuatan *hardware*. Pada perancangan skematik mendesain layout rangkaian PCB, rangkaian *power supply*, driver MOSFET, inverter tiga fasa dan pendeteksi sinyal *back-emf* menggunakan *software* EAGLE. Sedangkan pada pembuatan *hardware* dilakukan penyablonan rangkaian hingga penyolderan komponen-komponen ke PCB dan kemudian dilakukan pengujian.

4. Implementasi keseluruhan sistem

Penggabungan antara *software* dan *hardware* yang dimana *software* yang diperlukan berupa program di mikrokontroler arduino uno tentang modul *direction* dan PWM yang menghasilkan output berupa urutan penyulutan masing-masing MOSFET.

5. Analisa dan pengambilan data

Setelah melakukan pengujian keseluruhan sistem bekerja dengan baik dan hasilnya sesuai, maka selanjutnya dilakukan pengambilan data terkait hubungan kecepatan terhadap frekuensi PWM saat kondisi berbeban dan tanpa beban. Kemudian dianalisa data yang telah didapatkan.

6. Penyusunan laporan

Pada tahap terakhir, hasil pengambilan data dan analisa dimasukkan ke pembahasan. Kemudian dapat ditarik kesimpulan yang menyangkut kinerja alat dan saran yang dapat memperbaiki kekurangan yang ada.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dibagi menjadi lima bab yang terdiri dari :

Bab 1. Pendahuluan

Bab ini membahas mengenai latar belakang masalah, permasalahan, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi pada penelitian ini.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas mengenai dasar teori dan teori pendukung mengenai cara kerja motor BLDC, konsep inverter tiga fasa, metode *back-emf* dan kontrol tegangan berbasis PWM.

Bab 3. Desain, Simulasi dan Implementasi

Bab ini akan dijelaskan bagaimana desain kontrol kecepatan motor BLDC meliputi rangkaian inverter tiga fasa dan skema *back-emf*, simulasi rangkaian menggunakan *software* Proteus 8.0 dan implementasi rangkaian kontrol kecepatan BLDC. Kemudian dijelaskan bagaimana cara mendapatkan parameter – parameter dari rangkaian pengaturan kecepatan motor BLDC yang telah didesain. Selain itu, dijelaskan mengenai pembuatan dan pemilihan komponen dengan memperhatikan *rating* tegangan dan arus yang melalui komponen tersebut.

Bab 4. Hasil Pengujian dan Analisa Data

Bab ini berisi pengujian dan analisis data terhadap inverter tiga fasa dan metode *back-emf* dari hasil simulasi dan implementasi. Pengujian yang dilakukan merupakan pengujian dalam skala laboratorium.

Bab 5. Penutup

Pada bab terakhir ini akan dipaparkan kesimpulan dari penelitian dan saran untuk penelitian ini, agar kedepannya dapat menjadi referensi yang berguna dalam pengembangan sistem kontrol kecepatan motor BLDC.

1.7 Relevansi

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

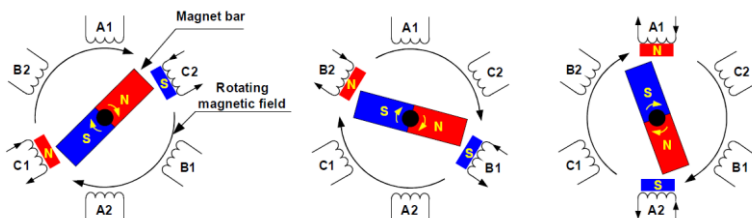
1. Sebagai referensi bagi peneliti lain yang ingin melakukan penelitian tentang sistem kontrol kecepatan motor BLDC *sensorless*.
2. Sebagai referensi untuk pengembangan sistem kontrol kecepatan motor BLDC pada pesawat tanpa awak.

BAB 2

SISTEM PENGENDALIAN MOTOR BLDC DENGAN SIX-STEP COMMUTATION

2.1 Motor BLDC

Motor *brushless* DC merupakan salah satu jenis motor sinkron magnet permanen yang disuplai oleh sumber listrik DC pada kontrolnya, serta membutuhkan sumber listrik AC tiga fasa untuk menggerakkan motornya. Bagian utama motor BLDC meliputi bagian stator dan rotor. Pada motor BLDC mempunyai tiga kumparan pada bagian stator. Terdapat dua tipe kumparan stator yaitu *sinusoidal* dan *trapezoidal* [3]. Kedua tipe tersebut dikategorikan berdasarkan bentuk dari sinyal *back-emf* (*Back Electromotive Force*). Bentuk dari sinyal *back-emf* ditentukan oleh perbedaan hubungan kumparan dan jarak dari celah udara [3]. Motor dengan bentuk sinyal *back-emf sinusoidal* menghasilkan torsi elektromagnetik yang lebih halus jika dibandingkan dengan motor dengan bentuk sinyal *trapezoidal*, namun harganya akan menjadi lebih mahal karena dibutuhkan komponen tambahan seperti *chopper windings* [3]. Sinyal *back-emf* merupakan tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Pada rotor terdapat shaft dan permanent magnet. Prinsip kerja motor BLDC adalah berdasarkan gaya tarik dan gaya lawan antara kutub magnet [3]. Arus melewati salah satu dari kumparan stator, dan menghasilkan kutub magnet yang akan menarik kutub yang berlawanan dari magnet permanen yang terdekat. dengan secara bergantian mengalirkan arus pada kumpara stator, maka akan menyebabkan rotor akan berputar [3].



Gambar 2.1 Skema Rotasi Rotor [3].

Persamaan diferensial dari motor BLDC tiga fasa dengan hubungan stator *wye*, jenis kumparan *full-pitch*, dan komutasi terpisah sebesar 120° elektrik dapat diturunkan sebagai berikut [1]:

Tegangan tiap fasa pada kumparan motor BLDC dapat dituliskan dalam

$$u_x = R_x i_x + e_{\psi x} \quad (2.1)$$

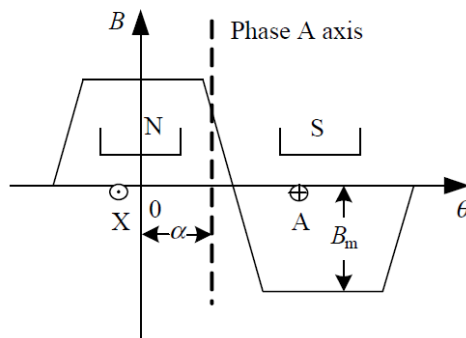
Dimana u , i , dan R adalah tegangan, arus, dan resistansi pada fasa x (fasa A, B, dan C). Sementara e_{ψ} adalah *emf* yang terinduksi pada fasa x . Besar *emf* yang terinduksi adalah sebanding dengan laju perubahan fluks.

$$e_{\psi x} = \frac{d\psi_x}{dt} \quad (2.2)$$

Kemudian besar fluks pada fasa A adalah :

$$\psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \psi_{PM}(\theta), \quad (2.3)$$

Dimana ψ_{PM} adalah *flux linkage* yang disebabkan oleh permanent magnet pada fasa A, θ adalah sudut yang menyatakan posisi rotor, L_A adalah induktansi diri, M_{AB} dan M_{AC} adalah induktansi bersama fasa A dengan fasa B dan C. Besar dari $\psi_{PM}(\theta)$ bergantung pada distribusi medan magnet dari magnet permanen pada celah udara. Komponen radial dari medan magnet pada celah udara yang ditimbulkan oleh magnet permanen terdistribusi secara *trapezoidal* sepanjang permukaan dalam dari stator seperti yang ditunjukkan gambar 2.2.



Gambar 2.2 Distribusi Fluks pada Fasa A [1].

Seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.2, ketika rotor berputar berlawanan arah jarum jam, kumparan AX bergerak searah sepanjang sumbu θ . Lalu nilai efektif dari fluks pada fasa A akan berubah sejalan dengan perubahan posisi rotor. Besarnya *flux linkage* pada fasa A karena magnet permanen adalah sebanding dengan banyaknya lilitan (N) dan nilai fluks pada fasa A yang ditimbulkan karena magnet permanen. Apabila rotor sedang berada pada posisi a , maka besarnya *fluks linkage* pada fasa A adalah :

$$\psi_{PM}(a) = NS \int_{-\frac{\pi}{2}+a}^{\frac{\pi}{2}+a} B(\theta)d\theta \quad (2.4)$$

Dengan $B(\theta)$ adalah kerapatan fluks radial pada celah udara yang disebabkan oleh magnet permanen pada rotor.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2) - (2.4) ke dalam (2.1), apabila jenis rotor dari motor BLDC ada *non salient*, maka nilai induktansi diri dan bersama adalah tetap dan tidak tergantung pada posisi rotor. Hal tersebut dikarenakan pada magnet permanen jenis *non salient* fluks yang ditimbulkan adalah bersifat *isotropic*. Kemudian apabila kumparan fasa stator adalah simetris maka $L_A = L_B = L_C = L$ dan $M_{AB} = M_{BA} = M_{BC} = M_{CB} = M_{AC} = M_{CA} = M$. Sehingga persamaan (2.5) dapat dituliskan menjadi :

$$\begin{aligned} u_A &= Ri_A + \frac{d}{dt} (L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + \psi_{PM}(\theta)) \\ u_A &= Ri_A + L \frac{di_A}{dt} + M \frac{di_B}{dt} + M \frac{di_C}{dt} + e_A \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dengan,

$$\begin{aligned} e_A &= \frac{d}{dt} (NS \int_{-\frac{\pi}{2}+\theta}^{\frac{\pi}{2}+\theta} B(x)dx) \\ &= NS \left[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(-\frac{\pi}{2} + \theta\right) \right] \frac{d\theta}{dt} \\ &= NS\omega \left[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(-\frac{\pi}{2} + \theta\right) \right] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Besaran ω adalah kecepatan sudut dari motor. Pada gambar 2.2 Terlihat bahwa $B(\theta)$ memiliki periode sebesar 2π dan $B(\theta + \pi) = -B(\theta)$ maka :

$$e_A = NS\omega \left[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) - B\left(\frac{\pi}{2} + \theta + \pi - 2\pi\right) \right]$$

$$= 2NS\omega[B\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right)] \quad (2.7)$$

Nilai *back-emf* adalah mendahului sebesar 90° elektrik dari kerapatan medan pada celah udara, dan e_A dapat dinyatakan sebagai :

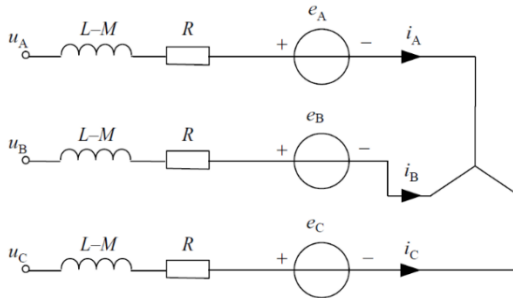
$$e_A = 2NS\omega B_m f_A(\theta) = \omega\psi_m f_A(\theta) \quad (2.8)$$

Dimana B_m dan ψ_m adalah nilai maksimum dari kerapatan medan pada celah udara dan nilai maksimum dari *flux linkage* pada tiap fasa stator. Kemudian $f_A(\theta)$ adalah fungsi dari gelombang *back-emf* dari fasa A dan memiliki nilai minimum dan maksimum adalah -1 dan 1. Pada motor BLDC 3 fasa dengan kumparan stator adalah simetris maka untuk fasa B dan C.

$$f_B(\theta) = f_A\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.9)$$

$$f_C(\theta) = f_A\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.10)$$

Pada motor BLDC 3 fasa memiliki rangkaian ekuivalen pada sisi stator adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC Tiga Fasa [10] .

Pada rangkaian ekuivalen tersebut berlaku hukum arus,

$$i_A + i_B + i_C = 0 \quad (2.11)$$

Maka persamaan dapat disederhanakan menjadi,

$$u_A = Ri_A + (L - M) \frac{di_A}{dt} + e_A \quad (2.12)$$

Sehingga persamaan matriks tegangan fasa pada tiap kumparan stator motor BLDC adalah sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_A \\ u_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_A \\ i_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & 0 & 0 \\ 0 & L - M & 0 \\ 0 & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} i_A \\ i_A \\ i_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_A \\ e_A \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Sedangkan persamaan matriks untuk tegangan antar fasanya didapatkan dari pengurangan tegangan antar fasa dan didapatkan :

$$\begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{AC} \\ u_{CA} \\ e_A - e_B \\ e_B - e_C \\ e_C - e_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & -R & 0 \\ 0 & R & -R \\ -R & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_A \\ i_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L - M & M - L & 0 \\ 0 & L - M & M - L \\ M - L & 0 & L - M \end{bmatrix} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} i_A \\ i_A \\ i_A \end{bmatrix} + \quad (2.14)$$

Sementara torsi elektromagnetik dapat dirumuskan [7] :

$$T_{em} = J \frac{d\omega t}{dt} + B\omega r + T_L \quad (2.15)$$

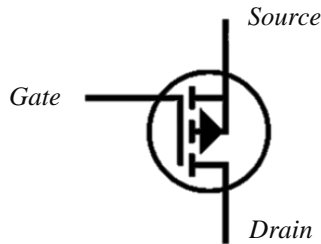
Dimana J, B, ωr dan T_L masing – masing adalah momen Inersia, koefisien gesek, kecepatan sudut, dan torsi beban dari motor [1].

2.2 Bagian-Bagian Sistem Kendali Motor BLDC

2.2.1 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

MOSFET merupakan salah satu jenis FET (*Field Effect Transistor*) yang jauh berbeda dengan JFET (*Junction Field Effect*) dan IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) [8].

MOSFET memiliki 3 buah kaki konduktor yaitu kaki pertama (ujung atas) dinamakan drain, kaki kedua (ujung bawah) dinamakan *source*, dan kaki ketiga dinamakan *gate*. *Gate* biasanya memiliki 1 atau 2 buah kaki. Pada kedua sisi kiri dan kanan terdapat *implant semikonduktor* yang berbeda tipe bahan. Terminal kedua sisi *implant* ini terhubung satu dengan yang lainnya secara internal dan dinamakan *gate*. Yang membedakan MOSFET dengan FET yang lainnya terletak pada *gate*, karena *gate* pada MOSFET diisolasi oleh bahan metal oksida. *Gate* sendiri terbuat dari bahan metal seperti aluminium. Oleh karena itu, transistor efek medan ini dinamakan *metal oxide semiconductor* [8].



Gambar 2.4 Lambang MOSFET [8]

Grafik karakteristik MOSFET arus I_D sebagai fungsi V_{DS} dengan parameter V_{GS} ditunjukkan dalam Gambar 2.4. Pada MOSFET terdapat tiga operasi yaitu daerah *cut-off*, linier dan saturasi. Pada daerah *cut-off*, tegangan gerbang lebih kecil dari tegangan ambang, sehingga tidak terbentuk saluran, dan arus tidak dapat mengalir ($I_D=0$).

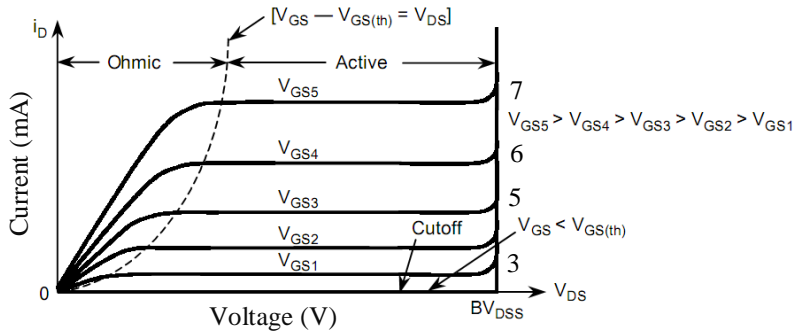
Pada daerah linier, pada awalnya gerbang diberi tegangan hingga terbentuk saluran. Apabila drain diberi tegangan yang kecil, maka elektron akan mengalir dari *source* menuju *drain* atau arus akan mengalir dari *drain* ke *source*. Selanjutnya saluran tersebut akan bertindak sebagai suatu tahanan, sehingga arus *drain* (I_D) akan sebanding dengan tegangan *drain*.

$$I_D(LIN) = K_n[V_{GS} - V_T]V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \quad (2.16)$$

Apabila tegangan *drain* terus ditingkatkan hingga tegangan pada *gate* menjadi netral, lapisan inversi saluran pada sisi *drain* akan hilang

dan mencapai suatu titik *pinch-off*. Pada titik *pinch-off* merupakan permulaan dari daerah kerja saturasi. Apabila melebihi titik ini, peningkatan tegangan *drain* tidak akan mengubah arus *drain*, sehingga arus *drain* tetap (konstan).

$$I_D(SAT) = \frac{K_n}{2} (V_{GS} - V_{Tn})^2 \quad (2.17)$$



Gambar 2.5 Grafik Karakteristik MOSFET, I_D sebagai Fungsi V_{DS} dengan Parameter V_{GS} [8]

Analisa kurva *drain* dilakukan dengan mencoba beberapa tegangan V_{GS} konstan, kemudian dibuat grafik hubungan antara I_D terhadap V_{DS} . Dari Gambar 2.5 kurva ini terlihat jelas bahwa MOSFET dapat bekerja (ON) mulai dari tegangan V_{GS} 3V sampai nilai V_{GS} maksimum 7V, biasanya MOSFET yang difungsikan sebagai elektronik daya memiliki nilai V_{GS} maksimal yang berbeda-beda sesuai dengan tipe atau seri MOSFET yang digunakan. Terdapat dua daerah kerja, yang pertama adalah daerah *ohmic* dimana resistansi *drain-source* adalah fungsi dari :

$$R_{DS(ON)} = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} \quad (2.18)$$

Tujuan mengetahui *drain characteristics* agar MOSFET yang akan digunakan bisa diketahui keandalannya terkait kemampuan arus dan tegangan pada MOSFET terutama pada tegangan yang diuji V_{DS} sama dengan *datasheet*. Karakteristik ini dapat memberikan informasi tentang pengosongan dan pengisian electron pada MOSFET.

2.2.2 Optocoupler

Pada umumnya sistem driver (*optocoupler*) digunakan untuk menghubungkan antara sistem kontrol yang bekerja pada tegangan dan arus kecil dengan sistem daya yang bekerja pada rating tegangan dan arus besar, dimana kedua sistem ini mempunyai level *grounding* yang berbeda (*floating*) sehingga pada topologi inverter tiga fasa mutlak diperlukan adanya driver atau suatu sistem isolasi antara mikrokontroler dengan MOSFET [9].

Optocoupler juga merupakan salah satu jenis komponen yang memanfaatkan sinar sebagai pemicu *on/off*-nya. *Optocoupler* memiliki dua bagian penting yang membuat komponen ini bekerja sesuai fungsinya yaitu *transmitter* dan *receiver*. Pada *transmitter* dibangun dari sebuah LED (*Light Emitting Diode*) inframerah. Jika dibandingkan dengan menggunakan LED biasa, LED inframerah memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap sinyal tampak. Selain itu, *receiver* dibangun dengan dasar komponen *photodiode*. *Photodiode* merupakan suatu transistor yang peka terhadap cahaya. Suatu sumber cahaya menghasilkan energi panas, begitupula dengan spektrum infra merah, karena spektrum infra mempunyai efek panas yang lebih besar dari cahaya tampak, maka *photodiode* lebih peka untuk menangkap radiasi dari sinar infra merah. Selain *photodiode*, pada *receiver* terdapat *operational amplifier*, resistor dan hubungan transistor [9].

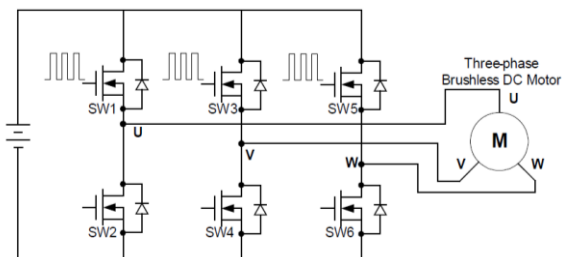
Ditinjau dari kegunaan fisik *optocoupler* dapat berbentuk bermacam-macam. Bila hanya digunakan untuk mengisolasi level tegangan atau data pada *transmitter* dan sisi *receiver*, maka *optocoupler* ini biasanya dibuat dalam bentuk solid (tidak ada ruang antara LED dan *photodiode*). Sehingga sinyal listrik yang ada pada input dan output akan terisolasi. Dengan kata lain *optocoupler* ini digunakan sebagai opsilator jenis IC [9].

2.3 Sistem Pengendalian Motor BLDC

2.3.1 Inverter Tiga Fasa

Inverter tiga fasa sering digunakan untuk memasok beban tiga fasa, seperti motor AC. Struktur dasar dari inverter tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 2.6. Masing-masing dari tiga kaki menghasilkan *output* fasa yang terpisah oleh 120° setiap fasanya. Output dari masing-masing kaki

MOSFET tergantung pada status sakelar dan tegangan input. Karena salah satu dari dua sakelar (MOSFET) di setiap kaki selalu menyala, tegangan output tidak tergantung arus beban keluaran [10].



Gambar 2.6 Konfigurasi Saklar Elektrik [1].

Untuk mengontrol durasi setiap saklar ON menggunakan metode yang disebut *Pulse Width Modulation* (PWM). Tiga fasa yang seimbang tegangan output diperoleh dari *switching* PWM dengan gelombang segitiga yang dibandingkan dengan tiga tegangan kontrol sinusoidal yang memiliki pergeseran komutasi sebesar 120° tiap fasanya. Setiap saklar di inverter mendapatkan rasio *duty cycle* dari PWM *switching*, dan rasio *duty cycle* ini mengontrol jika *switch* dibuka atau ditutup [10].

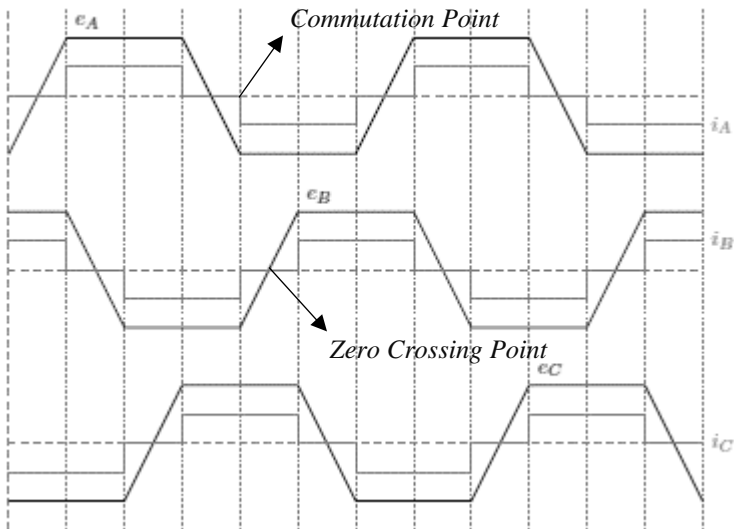
Selain itu, prinsip kendali motor BLDC adalah menjaga salah satu fasa *floating* dan membiarkan arus mengalir di dua fasa lainnya. Pada dasarnya terdapat arus positif di salah satu fasa dan pada saat yang sama dua fasa lainnya terdapat arus negatif dan fasa yang lain mengalami *floating*. Sehingga hal tersebut mengakibatkan enam keadaan komutasi yang berbeda dalam kendali motor BLDC.

2.3.2 Metode Pendeteksian Perubahan Komutasi

Dalam pengendalian motor BLDC diperlukan adanya *timing* perubahan komutasi yang tepat agar motor BLDC dapat dikendalikan dengan kecepatan dan torsi konstan. Apabila *timing* perubahan komutasi tidak tepat, motor BLDC akan mengalami *slip*. Akibat adanya *slip* adalah kecepatan dan torsi tidak konstan. Hal ini tampak terutama pada saat motor berputar pada kecepatan tinggi. Ketika terjadi *slip*, kecepatan motor akan cenderung turun dan memiliki kemungkinan motor berhenti berputar. Untuk menentukan *timing* perubahan komutasi terdapat metode *sensorless*. Metode *sensorless* dilakukan dengan cara mendeteksi *back-*

emf dan *zero crossing* pada fasa motor yang mengalami kondisi *floating* [1].

Pada metode *sensorless*, metode ini tidak dapat digunakan pada kecepatan yang rendah. Hal ini terjadi karena tanggapan yang diinduksikan pada kumparan yang tidak dialiri arus (*floating*) nilainya cukup kecil sehingga tidak dapat dideteksi. Selain itu, metode ini tidak dapat digunakan pada metode pengendalian sinusoidal karena pada metode ini tidak terdapat satu fasa pun yang mengalami kondisi *floating*. Adapun bentuk ideal *back-emf*, arus dalam fasa ditunjukkan pada Gambar 2.7 [1].



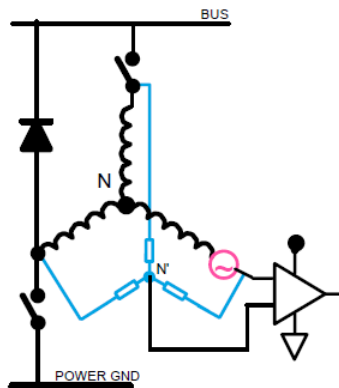
Gambar 2.7 Bentuk Ideal *back-emf* dan Arus di Setiap Fasa [1]

Pada Gambar 2.7 menunjukkan bahwa gelombang arus setiap fasa dengan *back-emf* yang muncul di setiap fasa. Untuk mendapatkan kontrol optimal dan torsi atau ampere maksimum, perlu diketahui arus yang terkomutasi dalam fasa *back-emf*. Waktu komutasi ditentukan oleh posisi rotor. Karena *back-emf* menunjukkan posisi rotor, hal tersebut digunakan untuk menentukan waktu komutasi. Pada Gambar.2.7, arus fasa berada dalam fasa *back-emf*. Jika *zero crossing* dari fase *back-emf* dapat diukur, akan diketahui waktu arus komutasinya.

Seperti disebutkan sebelumnya, pada satu waktu yang bersamaan hanya dua fasa arus yang terkonduksi, belitan ketiga terbuka. Hal ini membuka cara untuk mendeteksi *back-emf* pada belitan yang mengalami *floating*.

Skema ini membutuhkan tegangan titik netral motor untuk mendapatkan *zero crossing* dari *back-emf*, karena tegangan *back-emf* mengacu pada titik netral motor. Tegangan terminal dibandingkan dengan titik netral, maka *zero crossing* dari *back-emf* dapat diperoleh [11].

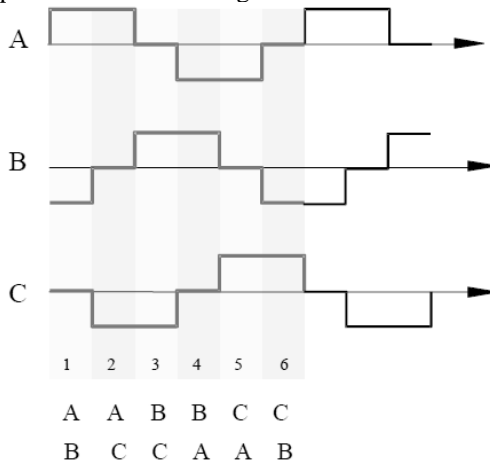
Dalam kebanyakan kasus, titik netral motor tidak tersedia. Dalam praktiknya, paling umum metode yang digunakan adalah membangun *virtual neutral point* yang sesuai secara teori yaitu berada di potensi yang sama dengan pusat motor menggunakan belitan *wye* dan kemudian merasakan perbedaan antara *virtual neutral* dan tegangan di terminal yang mengalami *floating*. *Virtual neutral point* dibuat dengan menambahkan resistor, yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema *Back-emf Zero Crossing Detection* dengan *Virtual Neutral Point* [11].

Pendeteksian dengan menggunakan *back-emf* dan *zero crossing* dapat disebut dengan pendeteksian *sensorless* karena pendeteksian ini dilakukan dengan cara mendeteksi tegangan yang timbul akibat induksi magnet rotor pada salah satu kumparan stator yang mengalami kondisi *floating*. Kondisi *floating* merupakan kondisi dimana suatu fasa tidak terdapat arus yang mengalir (tidak aktif) dan terjadi setiap 60 derajat. Sehingga sinyal kendali yang diberikan berupa sinyal kendali periodik yang dibagi menjadi 6 keadaan (*six-step*).

Metode *six-step commutation* merupakan metode yang paling sering digunakan dalam pengendalian BLDC secara komersial. Hal ini terjadi karena metode ini sederhana sehingga mudah diimplementasikan. Metode *six-step* digunakan agar mampu menciptakan gelombang *trapezoid* atau *square*. Digunakan PWM *square* yang terdiri dari 6 bagian yakni 2 bagian positif, 2 bagian negatif dan 2 bagian *floating*. Masing-masing bagian besarnya 60° gelombang *square*. Kondisi *floating* pada algoritma *six-step* adalah kondisi ketika gelombang *square* berpotongan pada titik nol. Adapun proses komutasi dengan metode *six step* yang ditunjukkan pada Gambar 2.9 sebagai berikut :



Gambar 2.9 Gelombang Arus Tiga Fasa [12].

Terdapat transisi dari satu langkah ke langkah lain yang berbeda disebut komutasi. Sehingga, ada 6 langkah dalam satu siklus. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.9, langkah pertama adalah AB, lalu ke AC, ke BC, ke BA, ke CA, ke CB dan kemudian hanya mengulangi pola ini. Adapun proses komutasi ditunjukkan pada Tabel 2.1 sebagai berikut:

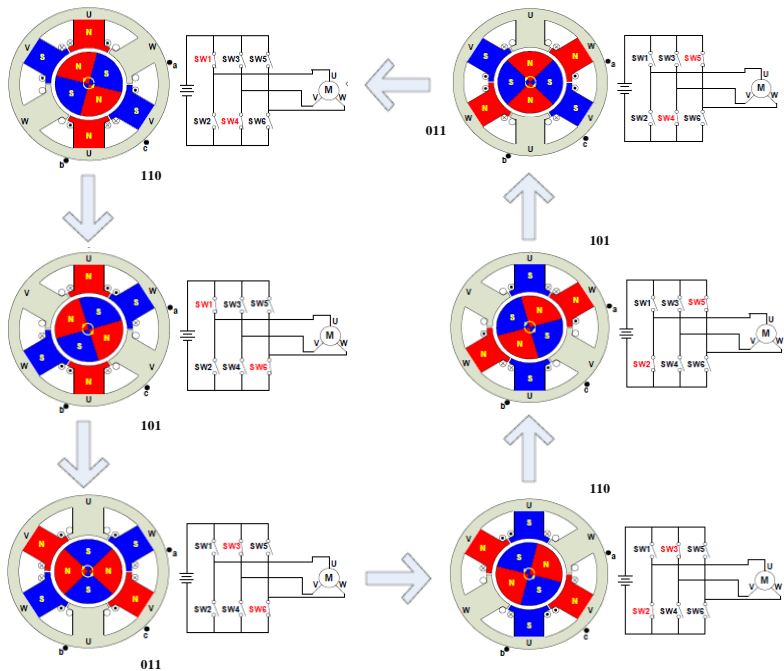
Tabel 2. 1 Keadaan *back-emf* pada Proses Komutasi [11].

<i>Back-emf</i>			<i>Phase</i>		
a	b	c	A	B	C
1	-1	0	+	-	<i>open</i>
1	0	-1	+	<i>open</i>	-
0	1	-1	<i>open</i>	+	-

Tabel 2. 1 Keadaan *back-emf* pada Proses Komutasi [11] (lanjutan).

-1	1	0	-	+	<i>open</i>
-1	0	1	-	<i>open</i>	+
0	-1	1	<i>open</i>	-	+

Ketika proses komutasi sesuai maka informasi rotor tersebut nantinya akan menentukan MOSFET mana yang akan mengalami konduksi pada proses komutasi. Apabila digambarkan maka skema proses komutasi adalah :



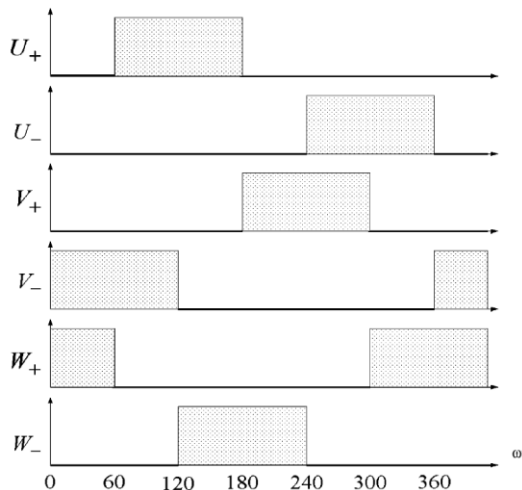
Gambar 2.10 Skema Proses Komutasi [3].

Pada gambar 2.10 menunjukkan kumparan stator dari motor BLDC dengan fasa U, V, dan W adalah mengalami konduksi atau tidak konduksi (*floate*d) adalah berdasarkan sinyal *back-emf* a, b, dan c. Pada contoh ini motor berputar dengan arah berlawanan jarum jam.

Besar tegangan pada kumparan stator dari motor BLDC akan mempengaruhi kecepatan motor BLDC, sehingga dengan mengatur tegangan pada kumparan stator sama dengan mengatur kecepatan motor. Variasi dari tegangan stator dapat didapatkan dari pengaturan *duty cycle* dari sinyal PWM yang mencacah *gating signal* [13].

2.3.3 Metode Kontrol Tegangan dengan PWM

Sinyal PWM berperan sebagai pengatur MOSFET pada inverter. Inverter dikontrol dengan sinyal PWM yang mengatur proses komutasi dengan cara membuat 2 dari 3 fasa adalah dalam keadaan konduksi dan 1 dalam keadaan *floating*. Dengan demikian maka akan terbentuk rotasi fluks pada stator.



Gambar 2.11 Metode Kontrol dengan PWM Konvensional [13].

Pada gambar 2.11 merupakan salah satu metode kontrol PWM konvensional yang disebut sebagai metode PWM 120°. Metode ini menimbulkan *switching losses* yang kecil pada sisi inverter dengan

konten harmonik besar sehingga menyebabkan *losses* yang besar pada sisi motor [13]. Frekuensi sinyal PWM yang mencacah *gating signal* harus lebih besar daripada frekuensi putaran motor. Secara umum, frekuensi sinyal PWM minimal 10 kali lebih besar dari frekuensi maksimum putaran motor [13].

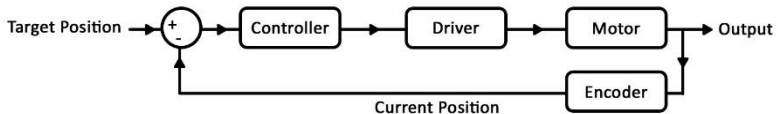
--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 3 DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

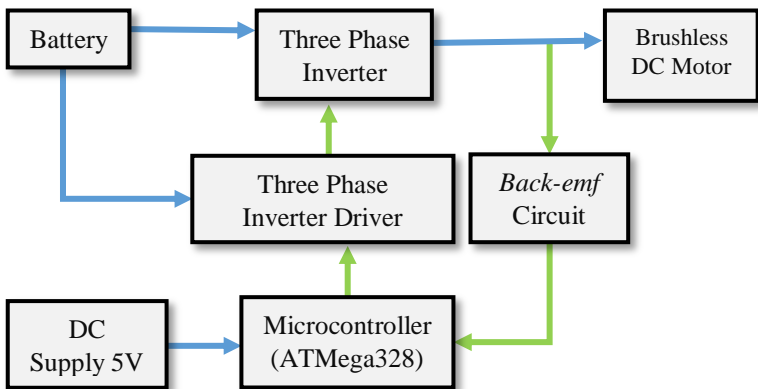
Pada bab 3 akan dibahas mengenai proses desain, simulasi dan implementasi sistem pengendalian motor BLDC dengan deteksi posisi rotor menggunakan metode *back-emf* untuk aplikasi pada pesawat tanpa awak. Proses desain meliputi perhitungan parameter komponen yang digunakan. Kemudian dilanjutkan dengan proses simulasi menggunakan Proteus 8.0 untuk mengetahui apakah rangkaian sistem kendali kecepatan dengan metode *back-emf* dapat bekerja dengan baik dan sesuai dengan desain yang telah dibuat.

3.1 Diagram Blok Sistem

Gambar 3.1 dan Gambar 3.2 merupakan diagram blok sistem dan diagram kerja dari sistem kendali motor BLDC dengan metode deteksi *back-emf* sebagai berikut:



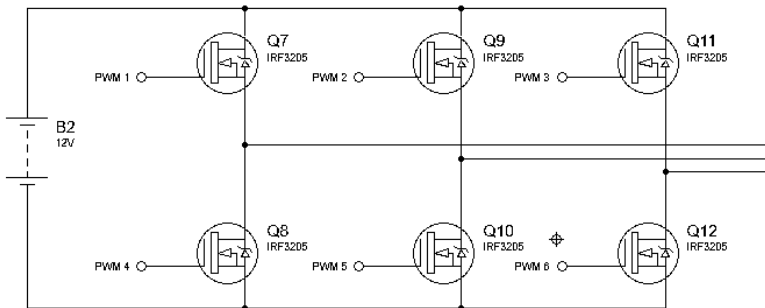
Gambar 3. 1 Diagram Keseluruhan Sistem Kendali Motor BLDC dengan Deteksi *Back-emf*.



Gambar 3.2 Diagram Kerja Kendali Motor BLDC

Sumber DC yang digunakan adalah baterai li-po 1800 mAh. Sedangkan input sumber 5V pada arduino uno dengan menambahkan IR7805 untuk menurunkan tegangan dari 12V ke 5V. *Output* dari sistem penggerak daya ini berupa putaran. Pada motor BLDC memiliki *six step commutation* atau tahapan komutasi. Tiap komutasi memiliki kedudukan atau posisi pada stator motor BLDC, kemudian dari posisi tersebut akan memberikan tegangan balik pada fasa yang mengalami *floating* yang akan di deteksi oleh *back-emf circuit*. Motor BLDC memberikan *feedback* ke mikrokontroler berupa sinyal *back-emf* yang artinya motor BLDC memberitahukan kepada mikrokontroler agar mikrokontroler memberikan perintah ke driver inverter tiga fasa. Kemudian driver inverter tiga fasa akan bekerja dengan cara melakukan perubahan *switching time* pada MOSFET sesuai dengan perintah pada sistem kontrol.

3.2 Inverter dan Suplai DC



Gambar 3.3 Skematik Inverter dan Suplai DC.

Inverter yang digunakan adalah jenis *full bridge*, sehingga tersusun atas 6 buah MOSFET. Acuan untuk mendesain inverter tiga fasa adalah spesifikasi dari motor yang digunakan. Adapun motor BLDC yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor BLDC EMAX XA2212 980 KV

No. of Cells:	2-3 Li-Poly
Kv:	980 RPM/V
Max. Efficiency:	80%

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor BLDC EMAX XA2212 980 KV (lanjutan)

Max. Efficiency Current:	(4-9)>80%
No Load Current:	0,3 A/10 V
Resistance:	120 mΩ
Max. Current:	15,1 A
Max Watts:	190 Watt
Weight:	50 g
Size:	28 x 28 mm
Shaft Diameter:	3 mm
Poles:	14
Model Weight:	300 - 800 g

Berdasarkan spesifikasi motor BLDC yang dipilih maka arus nominal yang dibutuhkan dalam pemilihan komponen agar sesuai dengan kebutuhan perencanaan sebagai berikut:

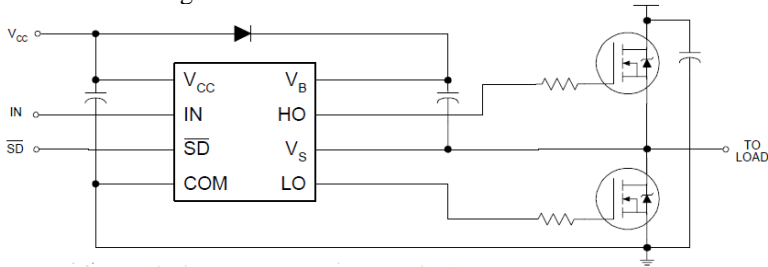
$$I_{motor} = \frac{P_{motor}}{V_{motor}} \quad (3.1)$$
$$I_{motor} = \frac{190}{11.1}$$
$$I_{motor} = 17.117 A$$

Dari perhitungan tersebut didapatkan arus nominal yang akan mengalir melalui MOSFET adalah sebesar 17,117 A sehingga MOSFET harus mampu menahan arus minimal sesuai dengan perhitungan. Jenis MOSFET yang memiliki parameter arus diatas 17,117 A adalah tipe IRF3205 dengan kemampuan arus sebesar 62 A dan tegangan sebesar 55V.

3.3 Rangkaian Driver Inverter Tiga Fasa

Mosfet driver yang digunakan adalah IR2104. IR2104 berfungsi sebagai penghubung antara rangkaian kontrol dengan rangkaian daya, selain itu juga memiliki fungsi sebagai pengaman pada rangkaian daya dan rangkaian kontrol. Disisi lain, IR2104 mampu menyediakan tegangan

V_{GS} lebih dari 10V, yang dibutuhkan untuk membuat mosfet berfungsi sebagai saklar. IR2104 digunakan untuk sisi high side dan low side dari tipe N-MOSFET, sehingga di dalam IC IR2104 terdapat rangkaian bootstrap yang berfungsi untuk menaikkan tegangan V_{GS} disisi high side N-MOSFET, agar MOSFET tersebut dapat berfungsi sebagai saklar dengan baik. Adapun rangkaian driver inverter tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 3.4 sebagai berikut:



Gambar 3.4 Rangkain IR2104

Pada Gambar 3.4 terdapat resistor, yang dimana dalam pemilihan resistor dengan spesifikasi tersebut berdasarkan tegangan maksimum yang datang dari rangkaian kontrol sebesar 5V dan syarat arus (I_f) sebesar 130 mA yang keluar pada IR2104. Oleh karena itu, ditentukan persamaan sebagai berikut:

$$\frac{V_{max}}{R} \leq I_f \quad (3.2)$$

$$R = \frac{V_{max}}{I_f}$$

$$R = \frac{5 \text{ V}}{130 \text{ mA}}$$

$$R = 38,462 \ \Omega$$

Jadi, pemilihan resistor dalam rangkaian driver inverter tiga fasa minimal menggunakan tahanan sebesar 38,462 Ω . Akan tetapi dalam desain driver inverter tiga fasa ini nilai resistor diberikan jarak yang jauh, sehingga menggunakan tahanan sebesar 100 Ω agar lebih aman.

Pada Gambar 3.4 terdapat dioda yang dimana berfungsi sebagai *reverse diode* yang artinya untuk memblokir arus yang datang dari motor

BLDC, agar tidak masuk ke rangkaian kontrol. Adapun perhitungan pemilihan dioda, jika $R = 100 \Omega$, dan tegangan maksimum yang terjadi sebesar 5 V maka nilai I_f sebagai berikut:

$$I_f = \frac{V_{max}}{R}$$

$$I_f = \frac{5 V}{100 \Omega}$$

$$I_f = 0.05 A = 50 mA$$

Jadi arus pada dioda yang dibutuhkan harus lebih besar dari 50 mA. Maka dari itu, dipilih *high-speed* dioda dengan tipe 1N4148, karena memiliki nilai I_f sebesar 200 mA.

Sedangkan besarnya nilai kapasitor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang terdapat pada *Application Note AN-978*. Mengacu pada *datasheet* 1N148, IR2104 dan IRF3205, didapatkan nilai parameter-parameter untuk perhitungan kapasitor antara lain:

$$Q_G = 146 \times 10^{-9} \text{ C (Gate charge of high side FET)}$$

$$I_{QBS} = 55 \times 10^{-6} \text{ A (Maximum } V_{BS} \text{ quiescent current)}$$

$$I_{CBS} = 50 \times 10^{-6} \text{ A (Bootstrap capacitor leakage current)}$$

$$V_{CC} = 12 \text{ V (Logic section voltage source)}$$

$$V_f = 0,72 \text{ V (Forward voltage across the bootstrap diode)}$$

$$V_{LS} = 0,3 \text{ V (Voltage drop across the low-side FET or load)}$$

$$V_{min} = 10 \text{ V (Minimum voltage between } V_B \text{ and } V_S)$$

$$Q_{LS} = 5 \times 10^{-9} \text{ C (Level shift charge required per cycle [typically 5 nC for 500/600V and 20 nC for 1200V])}$$

$$f = 31.372 \text{ Hz}$$

Sehingga,

$$C \geq \frac{2[2Q_G + \frac{I_{QBS}}{f} + Q_{LS} + \frac{I_{CBS}}{f}]}{V_{CC} - V_f - V_{LS} - V_{min}} \quad (3.3)$$

$$C \geq \frac{2[2 \times 146 \times 10^{-9} + \frac{55 \times 10^{-6}}{31372} + 5 \times 10^{-9} + \frac{50 \times 10^{-6}}{31372}]}{12 - 0.72 - 0.3 - 10}$$

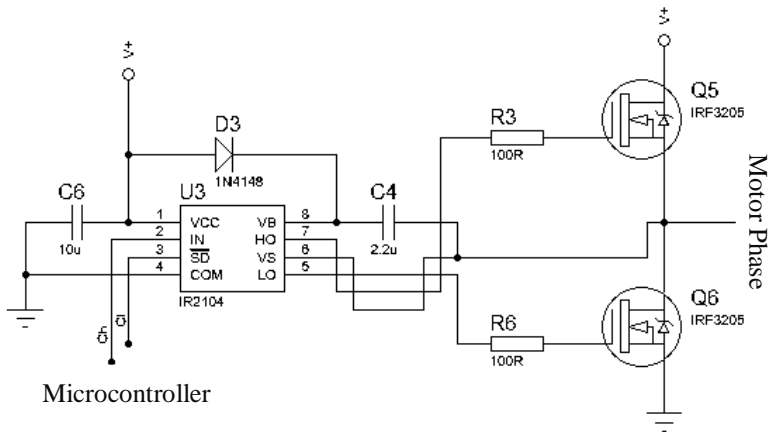
$$C \geq 0.613 \mu F$$

Sehingga, didapatkan nilai kapasitor yaitu $C \geq 0.613 \mu F$. Dikarenakan jenis kapasitor yang digunakan merupakan kapasitor elektrolit, sehingga nilai C dikalikan faktor 15 menjadi :

$$C \geq 0.613 \mu F \times 15$$

$$C \geq 9.194 \mu F.$$

Oleh karena itu, kapasitor yang digunakan bernilai $10 \mu F$. Sehingga desain rangkaian driver inverter tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 3.5 sebagai berikut:



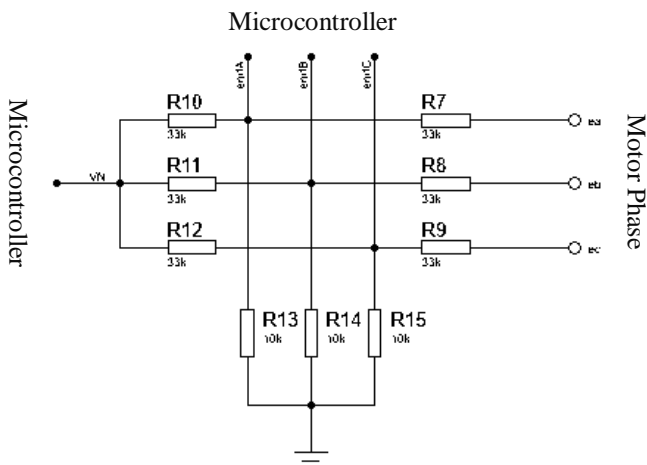
Gambar 3.5 Rangkaian Driver Inverter

3.4 Rangkaian Pendeteksian Sinyal *Back-emf*

Kontrol komutasi *sensorless* berfokus pada komutasi motor BLDC *sensorless* dengan teknik *back-emf zero crossing*. *Back-emf* yang muncul pada fasa *floating* merupakan indikasi dari posisi rotor dan dapat digunakan untuk menentukan waktu pergantian komutasi. Pendeteksian sinyal *back-emf* memerlukan tegangan netral sebagai referensi menentukan titik *zero* dari sinyal untuk menghasilkan bentuk sinyal

digital. Namun, titik netral pada motor BLDC sulit diperoleh karena letaknya yang sulit dijangkau. Oleh karena itu, titik netral dibuat dengan menyatukan ketiga fasa motor dapat disebut dengan *virtual neutral point*. Titik netral ini disusun dengan resistor yang disambungkan pada mikrokontroler.

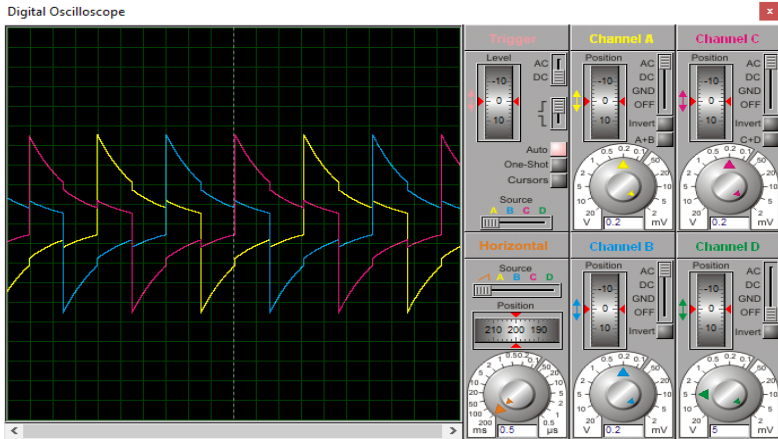
Virtual neutral point adalah didapatkan dari rangkaian 3 komparator. Komparator dihasilkan menggunakan 3 resistor yang terhubung dengan mikrokontroler. Ketika *back-emf* yang dihasilkan dalam belitan mengalami *floating*, kemudian melintasi titik nol menuju sisi positif, output komparator melakukan transisi dari rendah ke tinggi. Ketika *back-emf* yang dihasilkan dalam belitan yang mengalami *floating* melintasi titik nol ke sisi negatif, output komparator melakukan transisi dari tinggi ke rendah. Dengan memiliki tiga rangkaian pembandingan seperti itu, satu dari setiap fase memberikan tiga sinyal digital yang sesuai dengan sinyal *back-emf* dalam belitan. Kombinasi ketiga sinyal ini digunakan untuk memperoleh urutan pergantian. Berikut rangkaian pendeteksian sinyal *back-emf* ditunjukkan pada Gambar 3.6:



Gambar 3.6 Skematik Pendeteksian Sinyal *Back-emf*

Pada Gambar 3.6 menunjukkan bahwa tiga resistor 33 k Ω pertama terhubung ke fase motor dan tiga resistor 10 k Ω digunakan sebagai pembagi tegangan, karena dalam rangkaian tersebut tidak dapat memasok

mikrokontroler dengan tegangan 12 V, tiga resistor 33k lainnya menghasilkan titik alami virtual. Titik alami virtual terhubung ke pin arduino uno. Adapun hasil simulasi deteksi sinyal *back-emf* pada proteus ditunjukkan Gambar 3.7:



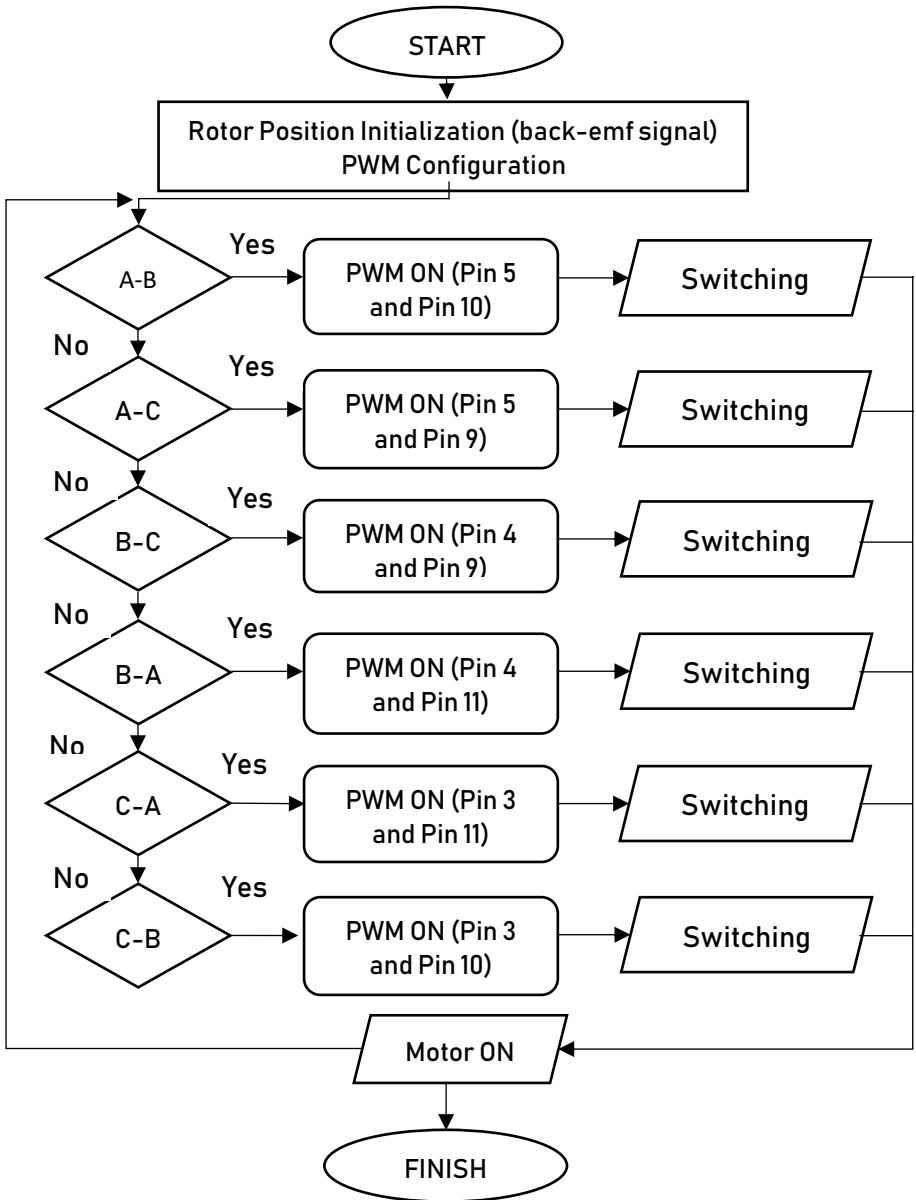
→ Phase A → Phase B → Phase C

Gambar 3.7 Hasil Simulasi Sinyal *Back-emf*

Pengujian simulasi dengan proteus dilakukan dengan merangkai komponen pendeteksi *back-emf* pada sistem pengendalian kecepatan motor BLDC. Pada simulasi ini bertujuan untuk mengecek rangkaian dan program sesuai dan berjalan dengan baik.

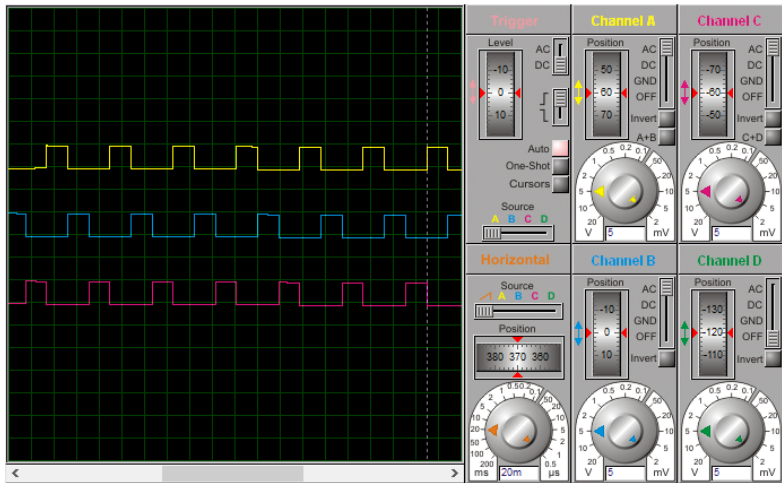
3.5 Algoritma Pengendalian Kecepatan Motor BLDC

Perancangan perangkat lunak dibuat menggunakan bahasa pemrograman arduino uno. Cara kerja sistem ini dengan mengatur nilai PWM, nilai PWM tersebut akan dibaca oleh ADC kemudian diproses oleh arduino uno. Untuk menentukan urutan pensaklaran pada mosfet, rangkaian deteksi *back-emf* harus terdeteksi terlebih dahulu, setelah *back-emf* mempunyai informasi posisi rotor, selanjutnya akan mensaklar ke enam mosfet secara bergantian yang akan menghasilkan tegangan AC, sehingga dapat menjalankan motor BLDC *sensorless*. Adapun diagram alir kendali kecepatan motor BLDC dan hasil simulasi *output* PWM dari mikrokontroler (arduino uno) ditunjukkan pada Gambar 3.8 sebagai berikut:



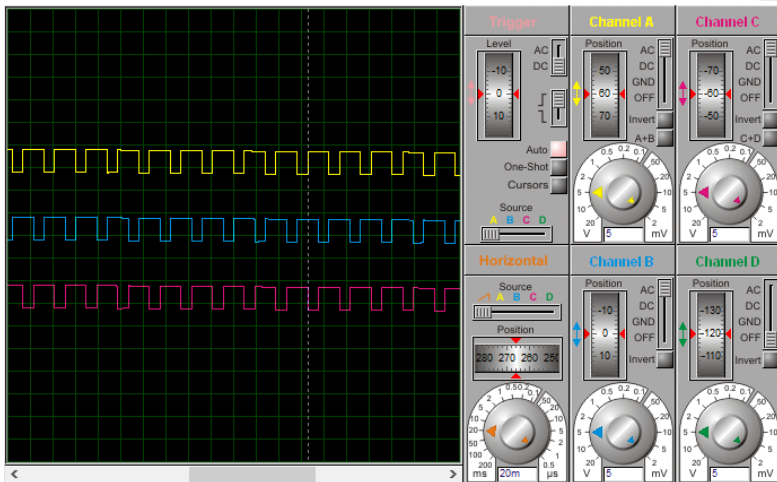
Gambar 3.8 Diagram Alir Pengendalian Motor BLDC *Sensorless*

Digital Oscilloscope



(a)

Digital Oscilloscope



(b)

Gambar 3.9 (a). *Output* PWM pin 5, 4, dan 3 (b). *Output* PWM pin 11, 10, dan 9

Pada Gambar 3.8 menunjukkan diagram alir pendeteksian sinyal *back-emf* yang akan dirubah menjadi sinyal pensaklaran (*gating signal*) yaitu sinyal yang mengatur MOSFET mana saja yang bekerja dan tidak bekerja. *Gating signal* tersebut akan mengatur proses komutasi sehingga motor akan berputar. Kecepatan putar motor akan tergantung pada besarnya tegangan yang diberikan pada motor. Besar dari RMS tegangan yang diberikan pada tiap fasa motor dapat diatur dengan menggunakan metode PWM. Sinyal PWM akan terhubung secara *AND* dengan *gating signal*, sehingga *gating signal* akan tercacah dan tegangan pada motor dapat bervariasi sesuai dengan *duty cycle* dari sinyal PWM. Sinyal PWM didapatkan dengan membangkitkan sinyal segitiga yang dihubungkan dengan sinyal kontrol keluaran kontroler yang mengatur besarnya *duty cycle* mulai dari 0 hingga 100 %.

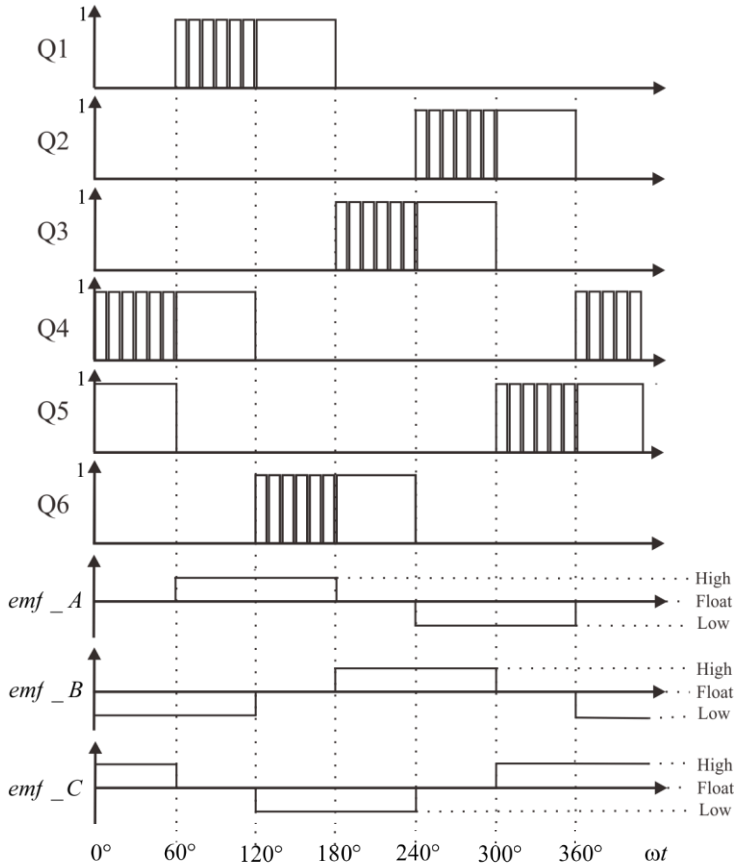
Untuk membentuk keluaran gelombang komutasi 120° diatur melalui mikrokontroler. Pengaturan dapat dilakukan dengan menggunakan rangkaian pendeteksi sinyal *back-emf* untuk menentukan waktu sakelar ON atau OFF, untuk motor BLDC digunakan 3 fasa *back-emf* sebagai penentu waktu kerja sakelar. Kombinasi penyaklaran dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Pengaturan Sakelar Inverter 3 Fasa

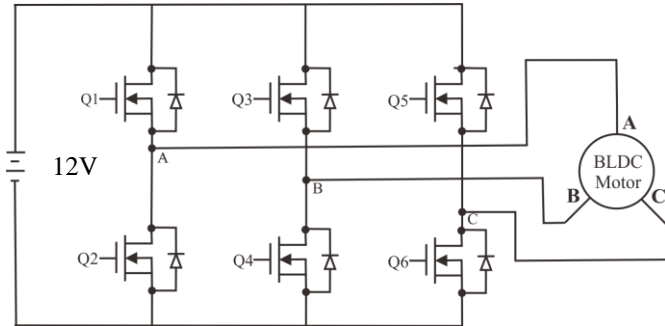
<i>Back-emf</i> (eA, eB, eC)	Fasa	<i>Switching</i> MOSFET
110	A→B	S1 & S4
101	A→C	S1 & S6
011	B→C	S3 & S6
110	B→A	S3 & S2
101	C→A	S5 & S2
011	C→B	S5 & S4

Setiap sakelar pada inverter 3 fasa terkonduksi berpasangan sebesar 60° sesuai urutan seperti pada Tabel 3.2. Pada saat posisi *back-emf* [110] sakelar yang terkonduksi adalah S1 dan S4 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S1 dan S4 menuju kumparan A – B. Pada saat posisi *back-emf* [101] sakelar yang terkonduksi adalah S1 dan S6 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S1 dan S6 menuju kumparan A – C. Pada saat posisi

back-emf [011] sakelar yang terkonduksi adalah S3 dan S6 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S3 dan S6 menuju kumparan B – C. Pada saat posisi *back-emf* [110] sakelar yang terkonduksi adalah S3 dan S2 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S3 dan S2 menuju kumparan B – A. Pada saat posisi *back-emf* [101] sakelar yang terkonduksi adalah S5 dan S2 sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S5 dan S2 menuju kumparan C – A. Pada saat posisi *back-emf* [011] sakelar yang terkonduksi adalah S5 dan S4, sehingga V_{DC} akan mengalir melalui S5 dan S4 menuju kumparan C – B.

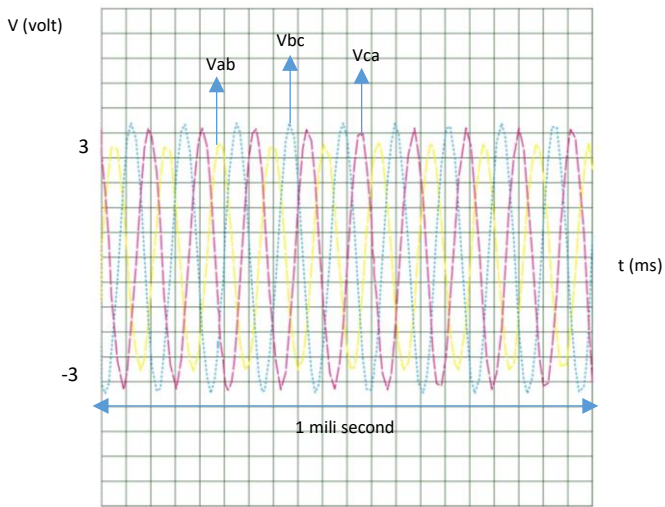


Gambar 3.10 Proses Komutasi pada Motor BLDC [1]



Gambar 3.11 Rangkaian Inverter *Full Bridge* [10]

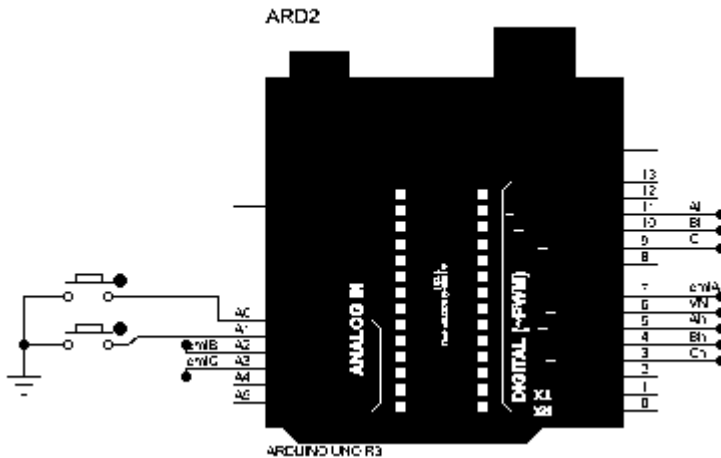
Gating signal yang menuju sisi atas inverter pada Gambar 3.11 adalah tercacah menjadi $1/6$ periode fundamental dan dengan nilai *duty cycle* tertentu yang besarnya diatur oleh sinyal kontrol keluaran kontroler. Begitu juga *gating signal* yang menuju sisi bawah inverter adalah memiliki periode yang sama dengan *gating signal* yang menuju sisi atas inverter. Adapun hasil simulasi tegangan keluaran inverter tiga fasa yang ditunjukkan pada Gambar 3.12 sebagai berikut:



Gambar 3.12 Hasil Simulasi Inverter *Full Bridge*

3.6 Rangkaian Mikrokontroler

Rangkaian kontrol pada sistem kendali kecepatan motor BLDC *sensorless* menggunakan mikrokontroler ATmega328 karena mudah dalam pemrograman, handal, banyak dipasaran dan harganya relatif terjangkau. Agar mikrokontroler dapat bekerja, maka harus dibuat rangkaian sistem seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.13 sebagai berikut:



Gambar 3.13 Skematik Sistem Mikrokontroler

Mikrokontroler ATmega328 memiliki beberapa fungsi antara lain menerima sinyal *back-emf* dan input sinyal PWM untuk digabungkan dengan sinyal *switching* menuju MOSFET.

Agar dapat mengontrol kecepatan motor, nilai PWM yang telah dibangkitkan oleh ATmega328 dimasukkan ke program komutasi *six-step*. ATmega328 memiliki satu komparator analog. *Positive input* komparator terdapat pada arduino uno pin 6 (AIN0) dan *negative input* komparator terdapat pada arduino uno pin 7 (AIN1), A0 (ADC0), A1 (ADC1), A2 (ADC2), A3 (ADC3), A4 (ADC4) atau A5 (ADC5). Sehingga dalam menghubungkan *virtual neutral point* dapat dilakukan ke pin positif komparator analog yaitu pin 6. Selain itu, *back-emf* fasa A dihubungkan ke pin 7 (AIN1), *back-emf* fasa B dihubungkan ke pin A2

dan *back-emf* fasa C dihubungkan ke pin A3. Komparator analog membandingkan input positif AIN0 (pin 6) dengan input negatif yang dapat berupa AIN1 (pin 7), ADC2 (pin A2) atau ADC3 (pin A3). Ketika tegangan pin positif lebih tinggi dari tegangan pin negatif, maka *output* komparator analog ACO diatur dan ketika tegangan pin positif lebih rendah dari tegangan pin negatif, maka ACO dihapus. Dalam skematik ini menggunakan interupsi komparator analog yaitu interupsi kenaikan (transisi dari *low to high*) dan interupsi penurunan (transisi dari *high to low*). Hal ini menimbulkan indikasi *zero crossing* pada mikrokontroler.

Disisi lain, arduino uno pin 9, 10 dan 11 dapat menghasilkan sinyal PWM yang dimana pin 9 dan pin 10 menggunakan modul *Timer1* (OC1A dan OC1B) dan pin 11 menggunakan modul *Timer2* (OC2A). Kedua modul *timer* dikonfigurasi untuk menghasilkan sinyal PWM dengan frekuensi sekitar 31 kHz dan resolusi 8 bit. *Duty cycle* dari sinyal PWM dapat diatur dengan menekan tombol *push button* (*speed up* atau *speed down*) yang dimana hal tersebut diprogram ke register mikrokontroler (OCR1A, OCR1B dan OCR2A). Adapun pin arduino yang terhubung dalam sistem kendali kecepatan motor BLDC sebagai berikut:

- AIN0 (pin 6) : *Positive input comparator*
- AIN1 (pin 7) : *Negative input comparator*
- ADC2 (pin A2) : *Negative input comparator*
- ADC3 (pin A3) : *Negative input comparator*
- Pin 5 : *Output PWM ke fasa A high*
- Pin 4 : *Output PWM ke fasa B high*
- Pin 3 : *Output PWM ke fasa C high*
- Pin 11 : *Output PWM ke fasa A low*
- Pin 10 : *Output PWM ke fasa B low*
- Pin 9 : *Output PWM ke fasa C low*

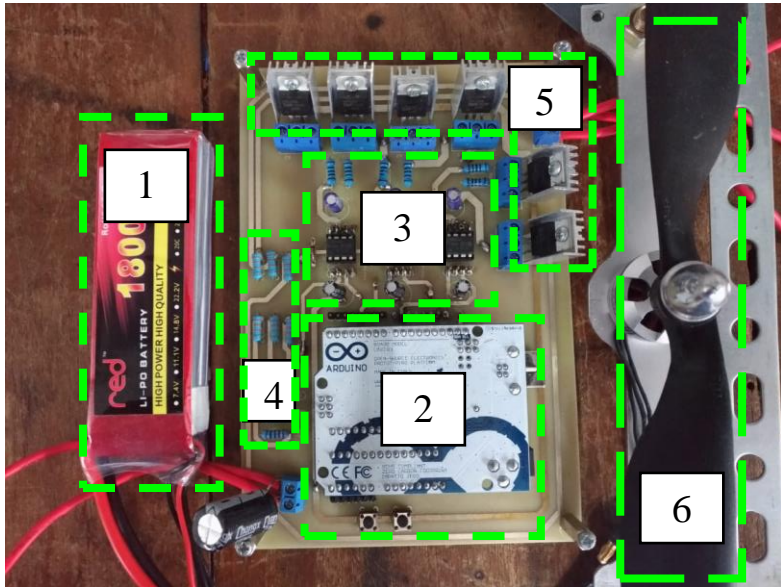
3.7 Hasil Implementasi Sistem Pengendalian Motor BLDC *Sensorless*

Berdasarkan perhitungan desain, maka komponen-komponen yang diperlukan untuk implementasi sistem pengendalian motor BLDC *sensorless* tertulis pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 Komponen Implementasi Sistem Kendali Kecepatan Motor
BLDC *Sensorless*

Component	Value
DC <i>Supply</i>	12 V
Microcontroller	Arduino Uno
Gate Driver	IR2104
Diode	1N4148
C ₁	10 uF
C ₂	2,2 uF
R ₁	100 Ω
R ₂	33 k Ω
R ₃	10 k Ω
MOSFET	IRF3205
BLDC	A2122 980KV

Hasil implementasi sistem kendali kecepatan motor BLDC terlihat pada Gambar 3.14. Pada sistem kendali tersebut terdapat bagian-bagian berupa DC *supply*, *control unit* (arduino uno, MOSFET *driver*, dan komponen pendeteksi sinyal *back-emf*) dan inverter tiga fasa. Setiap komponen yang digunakan tentunya memiliki rugi-rugi karena tidak ada komponen yang ideal. Sehingga daya keluaran akan lebih rendah dari daya masukan.



Gambar 3.14 Hasil Implementasi Alat

Adapun keterangan Gambar 3.14 sebagai berikut:

1. *Battery Li-Po*
2. *Microcontroller (arduino uno)*
3. *Gate Driver*
4. Rangkaian pendeteksi sinyal *back-emf*
5. Inverter tiga fasa
6. *Motor BLDC + Propeller*

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

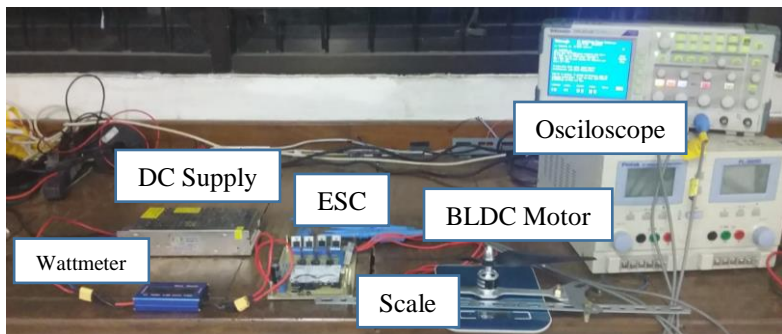
BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Pada bab 4 akan dibahas mengenai pengujian implementasi sistem kendali kecepatan motor BLDC *sensorless* dan analisis data hasil pengujian tersebut. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah *electrical speed control* telah bekerja sesuai desain. Pengujian yang dilakukan diantaranya adalah pengujian sinyal PWM, pengujian pensakelaran, pengujian tegangan *back-emf*, pengujian tanpa beban, pengujian berbeban dengan *propeller* 10x4,5 cm, pengujian *thrust test* motor BLDC, pengujian efisiensi sistem kendali kecepatan motor BLDC.

4.1 Alat Pengujian Sistem Pengendalian Motor BLDC *Sensorless*

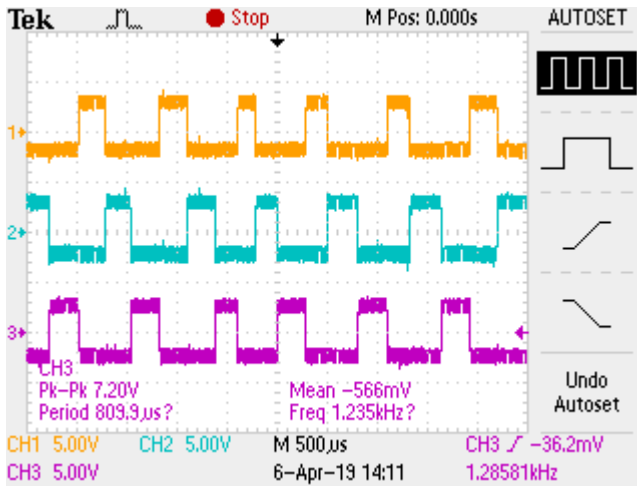
Digunakan peralatan yang terdapat di Laboratorium Konversi Energi untuk menguji rangkaian sistem kendali kecepatan motor BLDC *sensorless* hasil implementasi. Pengujian dilakukan menggunakan tegangan masukan berupa DC *Supply*. DC *Supply* yang digunakan memiliki *rating* maksimal 12 Volt dan arus maksimal 20 Ampere. Kemudian ditambahkan DC *wattmeter* disisi input ESC yang berfungsi sebagai pengukuran. Dalam pengujian *thrust test* terdapat timbangan dapur yang berfungsi membaca gaya tekan motor BLDC. Gelombang tegangan dan arus pada masing-masing komponen diamati menggunakan osiloskop yang tersedia di laboratorium.



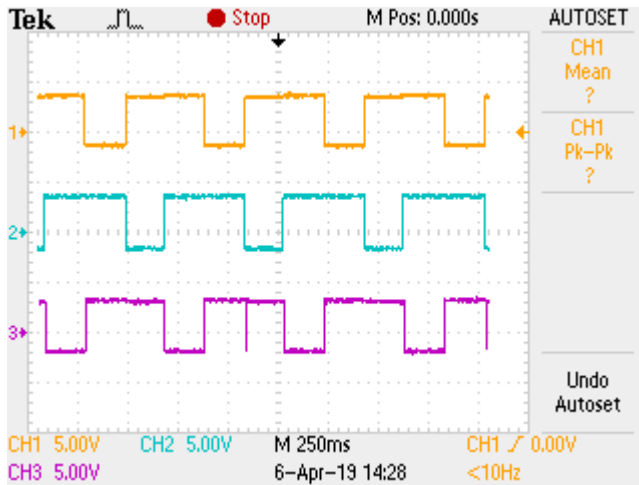
Gambar 4.1 Pengujian Rangkaian Sistem Pengendalian Motor BLDC *Sensorless*

4.2 Pengujian Sinyal PWM

Pada tugas akhir ini, sebelum membangkitkan sinyal berdasarkan deteksi sinyal *back-emf*, dilakukan pembangkitan berdasarkan *timing* waktu terlebih dahulu. Sinyal PWM akan dibangkitkan secara berulang dan terus-menerus melalui modul mikrokontroler. Agar tiap fasa tidak ada MOSFET sisi *high* dan *low* yang menyala secara bersamaan, maka diperlukan *deadtime* agar tidak terjadi *short circuit* ketika sinyal PWM disalurkan ke rangkaian inverter. Pengujian dilakukan menggunakan *oscilloscope* pada masing-masing fasa sisi *high* dan *low* yang akan ditunjukkan pada Gambar 4.2 sebagai berikut:



(a)



(b)

Gambar 4.2 (a). *Output PWM high input* (b) *Output PWM low input*

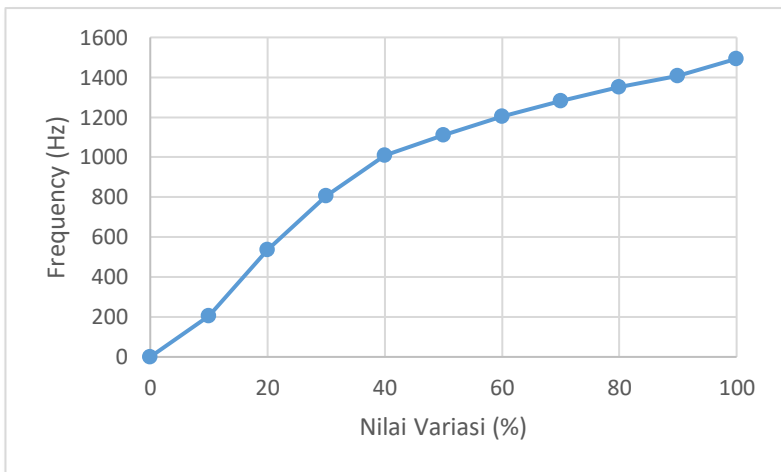
Dari Gambar 4.2 dapat dilakukan pengamatan pulsa keluaran pada Ch1, Ch2, dan Ch3 menggambarkan perbedaan masing-masing pulsanya. Untuk tiap fasa *high* dan fasa *low* memiliki perbedaan sudut penyulutan sebesar 120°. Masing-masing *channel* antara *high* dan *low* memiliki nilai *dead time* sebesar 60°.

Pembangkit PWM pada penelitian ini dengan membaca ADC dari *push button* yang dibaca oleh mikrokontroler arduino uno yang berupa nilai 8 bit (nilai variasi 0-255). Di dalam arduino uno terdapat 6 pin PWM diantaranya pin 11, 10, 9, 5, 4, dan 3. *Output* dari keenam pin tersebut berupa nilai PWM yang dapat diatur dengan nilai variasi 0 sampai dengan 255. Pengujian PWM dilakukan dengan cara mengukur frekuensi PWM (input nilai variasi 0-255 dari mikrokontroler ATmega328) yang diatur melalui *push button* kemudian dilihat bentuk gelombangnya melalui osiloskop. Adapun hasil pengujian PWM dengan mengatur nilai variasi yang mempengaruhi nilai frekuensi PWM ditunjukkan pada Tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4.1 Pengaruh Nilai Variasi terhadap Frekuensi PWM

Nilai Variasi 0-255 (%)	Frekuensi (Hz)
0	0
10	206,2
20	537,6
30	806,5
40	1010
50	1111
60	1205
70	1282
80	1351
90	1408
100	1493

Dari Tabel 4.1 dapat dilihat pengaruh nilai variasi terhadap frekuensi PWM ditunjukkan pada Gambar 4.3 sebagai berikut:

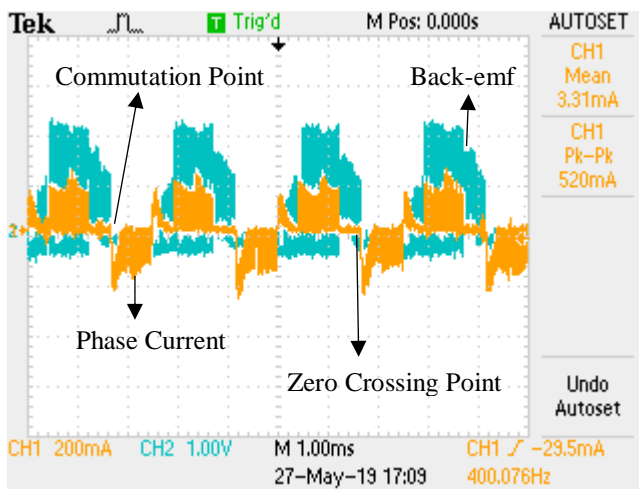


Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Nilai Variasi Terhadap Frekuensi PWM

Dari Gambar 4.3 dapat diketahui bahwa semakin meningkatnya nilai variasi yang diberikan maka respon frekuensi PWM akan semakin besar. Hal tersebut dapat dilakukan dengan menekan *push button (speed up)*. Begitupun sebaliknya, jika menekan *push button (speed down)* maka nilai variasi akan berkurang yang mengakibatkan respon frekuensi PWM akan semakin kecil.

4.3 Pengujian Deteksi *Back-emf*

Pengendalian motor BLDC dengan metode *back-emf* menggunakan *virtual neutral point* dengan menggunakan resistor yang dirangkai secara paralel. Pengujian dilakukan dengan cara memparalelkan *probe* osiloskop pada rangkaian pendeteksi sinyal *back-emf* dan menggunakan *probe* arus untuk pembacaan bentuk gelombang arus fasa pada osiloskop. Adapun hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.4 sebagai berikut:

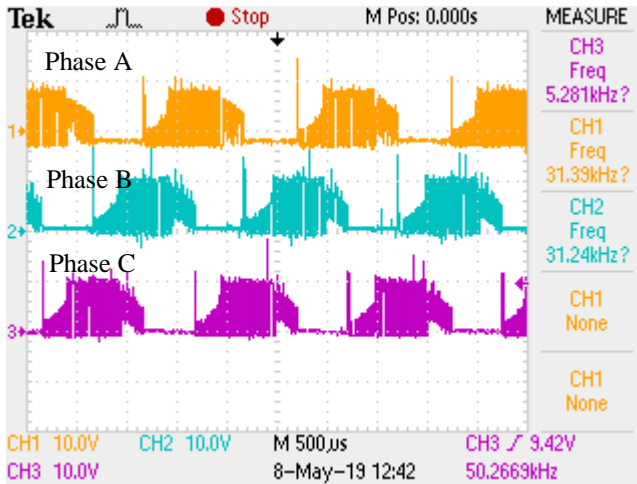


Gambar 4.4 Pengujian *back-emf* dan *zero crossing*

Pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa adanya tegangan timbul akibat induksi magnet rotor pada salah satu fasa kumparan stator yang mengalami *floating*. Dari gambar diatas didapatkan titik pertemuan antara arus fasa dengan tegangan *back-emf* yang disebut *zero crossing point*.

Selain itu, terdapat informasi komutasi pada fasa arus yang mengalami *floating* yang disebut titik komutasi (*commutation point*).

Adanya sistem komparator yang terdapat di mikrokontroler pada setiap fasa motor memberikan sinyal digital sesuai dengan adanya *back-emf* di setiap fasa motor. Berikut adalah kombinasi tiga sinyal yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 sebagai berikut:



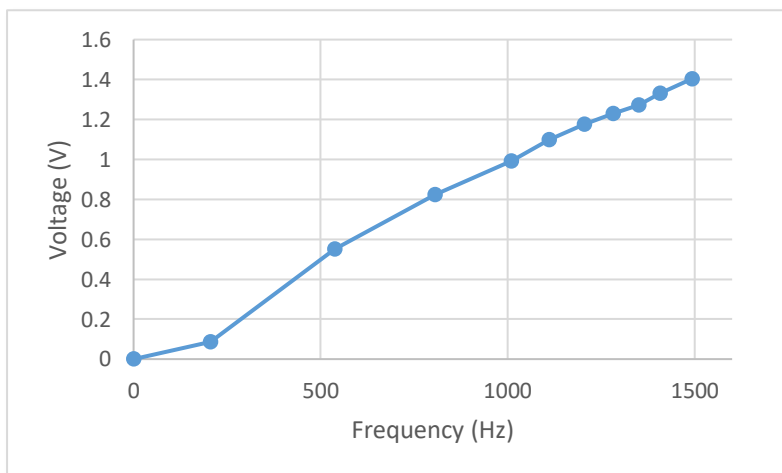
Gambar 4.5 Kombinasi Tiga Fasa *Back-emf*

Dari Gambar 4.5 didapatkan bahwa kondisi *floating* ketiga fasa *back-emf* terjadi setiap 60° . Tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor BLDC memiliki polaritas tegangan bellawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Besarnya tegangan balik dipengaruhi oleh frekuensi *back-emf*. Adapun pengujian yang dilakukan dengan cara memparalelkan salah satu fasa rangkaian deteksi sinyal *back-emf* untuk diukur tegangannya melalui avometer. Pengujian ini dilakukan bertujuan untuk melihat respon tegangan balik terhadap nilai frekuensi PWM ditunjukkan oleh Tabel 4.2 sebagai berikut:

Tabel 4.2 Pengujian Frekuensi PWM Terhadap Tegangan *Back-emf*

Nilai Variasi 0-255 (%)	Frekuensi (Hz)	V_{emf} (V)
0	0	0
10	206,2	0,0872
20	537,6	0,552
30	806,5	0,823
40	1010	0,992
50	1111	1,098
60	1205	1,177
70	1282	1,229
80	1351	1,273
90	1408	1,33
100	1493	1,404

Dari Tabel 4.2 dapat dilihat pengaruh nilai frekuensi PWM terhadap nilai tegangan *back-emf* ditunjukkan pada Gambar 4.6 sebagai berikut:

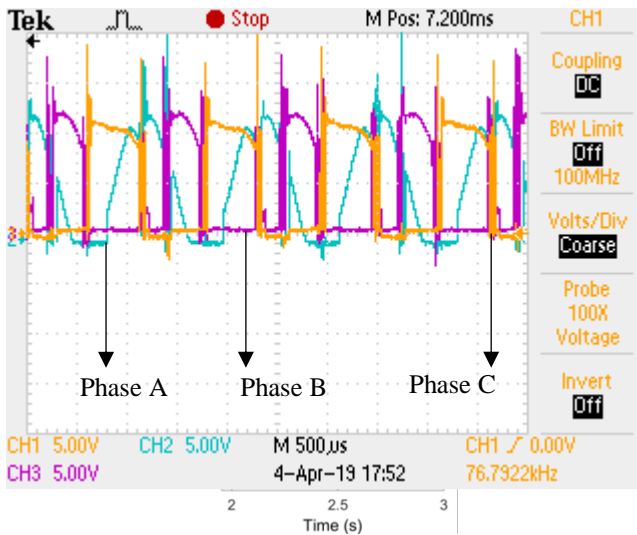


Gambar 4.6 Grafik Frekuensi PWM Terhadap Tegangan *Back-emf*

Dari Gambar 4.6 menunjukkan bahwa tegangan *back-emf* dipengaruhi oleh frekuensi PWM. Semakin besar nilai frekuensi PWM, maka semakin besar pula tegangan *back-emf* yang terbangkit. Dengan kata lain, nilai frekuensi PWM sebanding dengan nilai tegangan *back-emf* yang terbangkit.

4.4 Pengujian Inverter Tiga Fasa

Setelah pengujian sinyal PWM dari mikrokontroler berjalan dengan baik, selanjutnya dilakukan pengujian inverter tiga fasa. Pengujian inverter tiga fasa bertujuan untuk melihat respon tegangan yang terbangkit oleh keenam mosfet dengan metode *six-step commutation*. Pengujian dilakukan dengan cara memparalelkan *probe* osiloskop dengan fasa A, fasa B, dan fasa C ke tiga *channel* osiloskop. Berikut adalah hasil pengujian inverter tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 4.7 sebagai berikut:



Gambar 4.7 Tegangan *Output* Inverter Tiga Fasa

Pada Gambar 4.7 menunjukkan bahwa tegangan *output* inverter tiga fasa disuplai dengan sumber DC sebesar 12 V. Pada gelombang tiga fasa tersebut terlihat bahwa konduksi antar fasa berbeda sebesar 120° .

4.5 Pengujian Sistem Kendali Kecepatan Motor BLDC

4.5.1 Pengujian Sistem Tanpa Beban

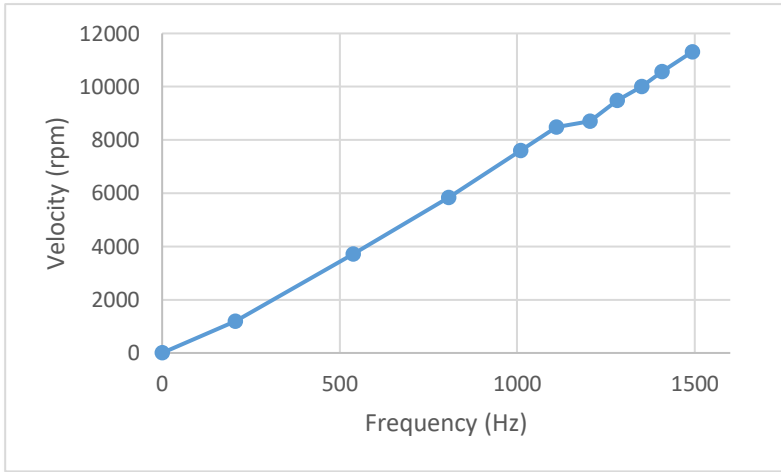
Pengujian sistem kendali kecepatan motor BLDC *sensorless* tanpa beban dilakukan dengan tidak menambahkan *propeller* pada motor BLDC. Pengujian dilakukan dengan cara menghubungkan sumber DC dengan *wattmeter* DC, selain itu dalam pembacaan daya *output* dilakukan dengan memparalelkan avometer antar fasanya, pada pembacaan arus *output* menggunakan *clampmeter* dan pada pengujian kecepatan menggunakan *tachometer*. Pengujian dilakukan dengan penambahan nilai frekuensi PWM, kemudian dapat dilihat daya *output* inverter, respon kecepatan (n) dan efisiensi sistem kendali kecepatan motor BLDC. Berikut adalah hasil pengujian sistem tanpa beban ditunjukkan pada tabel 4.3 sebagai berikut:

Tabel 4.3 Pengujian Sistem Tanpa Beban

Frekuensi (Hz)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	n (rpm)	η
0	0	0	0	0%
206,2	3,2676	0,513172	1201	16%
537,6	5,4802	2,0846964	3724	38%
806,5	5,825	3,3665525	5830	58%
1010	6,99	4,355415	7607	62%
1111	7,922	5,1254847	8493	65%
1205	8,7375	5,4377735	8711	62%
1282	9,1956	5,6648454	9484	62%
1351	9,5448	5,7947492	10003	61%
1408	10,0104	6,536933	10574	65%
1493	10,2432	7,4847112	11310	73%

Pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai frekuensi PWM sebanding lurus dengan nilai kecepatan. Semakin tinggi frekuensi maka semakin tinggi pula nilai kecepatan motor BLDC. Sebaliknya, semakin rendah nilai frekuensi, maka semakin rendah nilai kecepatan motor

BLDC. Hal ini menunjukkan semakin tinggi frekuensi PWM yang bangkitkan, maka semakin tinggi pula kecepatan medan magnet putar stator. Jika kecepatan medan magnet putar stator semakin tinggi, maka kecepatan perputaran rotor pun akan mengikuti peningkatan kecepatan medan magnet putar stator. Hubungan nilai frekuensi dan kecepatan ditunjukkan pada Gambar 4.8 sebagai berikut:



Gambar 4.8 Grafik Frekuensi PWM Terhadap Kecepatan (tanpa beban)

Pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa efisiensi yang paling baik sebesar 73% saat frekuensi bernilai 1.493 Hz. Sedangkan saat frekuensi 206,6 Hz, efisiensi sebesar 16%.

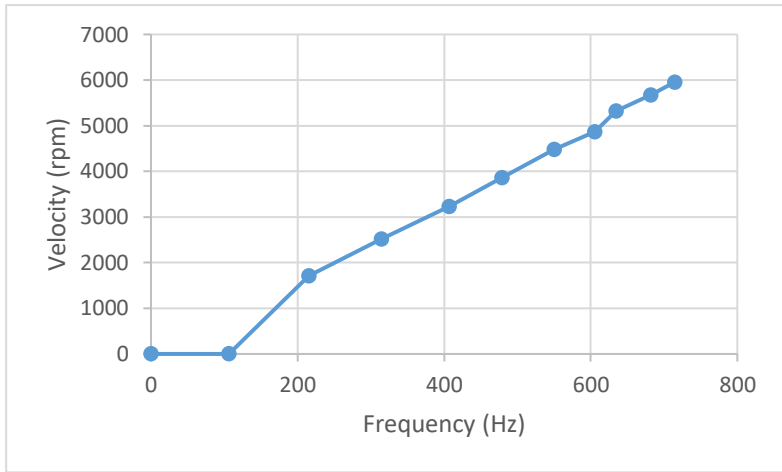
4.5.2 Pengujian Sistem dengan Pembebanan

Pengujian sistem kendali kecepatan motor BLDC *sensorless* dengan pembebanan dilakukan dengan penambahan *propeller* 10x4,5cm pada motor BLDC. Pengujian yang dilakukan sama halnya seperti pengujian sistem tanpa beban. Namun terdapat penambahan pengujian yaitu pengujian *thrust test* motor BLDC. *Thrust test* bertujuan untuk mengetahui gaya angkat atau gaya dorong motor BLDC. Cara pengujian *thrust test* dengan menggunakan timbangan dapur atau neraca pegas. Berikut adalah hasil pengujian sistem berbeban ditunjukkan pada Tabel 4.4 sebagai berikut:

Tabel 4.4 Pengujian Sistem Berbeban

Frekuensi (Hz)	P_{in} (W)	P_{out} (W)	Thrust (N)	n (rpm)	η
0	0	0	0	0	0
106,4	4,4346	0,74404	0	0	17%
215,1	6,413	3,4735	1,75	1708	54%
314,1	12,5712	8,49094	2,2	2524	68%
406,5	22,504	16,15652	2,55	3233	72%
478,9	32,6274	24,8189	3,35	3867	76%
550,3	47,1168	36,32028	4,45	4477	77%
605,4	63,4884	48,13024	5,2	4864	76%
634,7	81,5524	60,45528	5,9	5322	74%
681,6	100,8612	73,1524	6,5	5673	73%
714,3	119,3625	86,04216	6,9	5954	72%

Pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa nilai frekuensi PWM berbanding lurus dengan nilai kecepatan. Hal ini menunjukkan semakin tinggi frekuensi PWM yang terbangkit, maka semakin tinggi pula kecepatan medan magnet putar stator. Jika kecepatan medan magnet putar stator semakin tinggi, maka kecepatan perputaran rotor pun akan mengikuti peningkatan kecepatan medan magnet putar stator. Adapun hubungan nilai frekuensi PWM dan nilai kecepatan yang ditunjukkan pada Gambar 4.9 sebagai berikut:

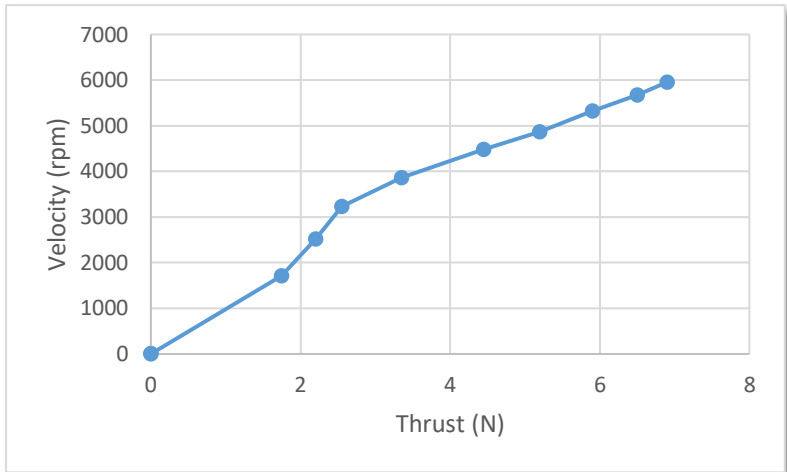


Gambar 4.9 Grafik Frekuensi PWM Terhadap Kecepatan (berbeban)

Pada Tabel 4.4 menunjukkan bahwa efisiensi sistem kendali kecepatan motor BLDC sebesar 77% saat frekuensi PWM 550,3 Hz, dan efisiensi terendah saat frekuensi PWM 106,4 Hz sebesar 17%.

Pada pengujian tersebut motor BLDC mulai dapat bekerja (berputar) pada saat frekuensi 215,1 Hz atau saat variasi nilai dari *push button* sebesar 30%. Hal ini disebabkan karena saat variasi nilai dibawah 30% arus yang menyuplai motor BLDC belum dapat memutar beban *propeller* 10x4,5 cm. Sehingga nilai kecepatan 0 rpm.

Di sisi lain, Dengan pengujian sistem pembebanan menggunakan *propeller* 10x4,5 cm didapatkan *thrust* maksimal sebesar 6,9 N. Hubungan nilai *thrust* dengan nilai kecepatan berbanding lurus. Semakin cepat putaran motor BLDC, maka semakin besar pula gaya dorong atau gaya angkat motor BLDC. Adapun hubungan *thrust* dengan kecepatan ditunjukkan pada Gambar 4.10 sebagai berikut:



Gambar 4.10 Hubungan *Thrust* dengan Kecepatan

Jika dibandingkan antara Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 menunjukkan hubungan pembebanan terhadap kecepatan, maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar beban (*propeller*) maka semakin rendah nilai kecepatan. Hal tersebut terjadi seiring dengan pembebanan yang mengakibatkan frekuensi PWM tanpa beban lebih tinggi dibandingkan dengan frekuensi PWM berbeban.

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 5

PENUTUP

Pada bab ini akan diuraikan beberapa kesimpulan dan saran dari serangkaian kegiatan penelitian yang dilakukan.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian implementasi dari sistem kendali kecepatan motor BLDC *sensorless* untuk aplikasi pada pesawat tanpa awak dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Implementasi sistem kendali kecepatan motor BLDC *sensorless* dengan metode *back-emf* menunjukkan bahwa semakin tinggi frekuensi PWM, maka semakin besar tegangan *back-emf* yang terbangkit.
2. Semakin tinggi nilai frekuensi PWM, maka semakin besar kecepatan motor BLDC.
3. Implementasi sistem kendali kecepatan motor BLDC memiliki efisiensi saat pengujian tanpa beban maksimum 73%.
4. Implementasi sistem kendali kecepatan motor BLDC memiliki efisiensi saat pengujian berbeban dengan *propeller* 10x4,5 cm maksimum 77%.
5. Perbandingan saat sistem berbeban dan tanpa beban menunjukkan bahwa semakin besar pembebanan yang diberikan pada motor BLDC maka kecepatan akan semakin menurun. Pembebanan juga mengakibatkan frekuensi PWM juga semakin menurun.
6. Semakin tinggi kecepatan motor BLDC dengan pembebanan *propeller* maka semakin besar pula gaya angkat atau gaya dorong (*thrust*) yang diberikan.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Menggunakan komponen SMD agar desain yang digunakan lebih kecil.
2. Pemilihan komponen agar dipertimbangkan resistansi dalam agar memperkecil rugi-rugi.

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. L. Xia, *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*. Tianjin University, P.R. China: John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd., 2012.
- [2] H. F. Prasetyo, A. S. Rohman, F. I. Hariadi, and H. Hindersah, "Controls of BLDC Motors in Electric Vehicle Testing Simulator," *IEEE 6th Int. Conf. Syst. Eng. Technol.*, p. 173. 2016.
- [3] J. Zhao and Y. Y. July, "Brushless DC Motor Fundamentals Application Note," no. July 2011, pp. 1–19, 2014.
- [4] R. Saranya, S. Saravana, R. Baskaran, A. V. Roc, K. Sathiyasekar, and S. A. E. College, "Sensorless Operation of Brushless DC Motor Drive using Back EMF Technique Sensorless Operation of Brushless DC Motor Drive using Back EMF Technique," *Int. J. Eng. Res.*, vol. 3, no. April 2014, pp. 3–6, 2016.
- [5] K. Rajashekara and A. Kawamura, "Sensorless control of permanent magnet AC motors Sensorless Control of Permanent Magnet AC Motors," no. October, 2015.
- [6] F. C. Lee, A. Q. Huang, and F. Wang, "Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives by Jianwen Shao Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and the State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of ," pp. 33–38, 2003.
- [7] J. C. Gamazo-real, E. Vázquez-sánchez, and J. Gómez-gil, "Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends," vol. 10, pp. 6901–6947, 2010.
- [8] J. Linggarjati, "PADA PENGENDALI ELEKTRONIKA MOTOR BLDC PEMBAHASAN Karakteristik Mosfet," vol. 20, no. 9, pp. 102–108, 2004.
- [9] F.D. Rumagit, "Perancangan Sistem Switching 16 Lampu Secara

Nirkabel Menggunakan Remote Control,” pp. 1–5, 2012.

- [10] F. Fürst, “Design of a 48 V three-phase inverter For automotive applications.” pp. 1-41, 2015.
- [11] Prokop L., Chalupa L., “3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80x,” pp. 1–56, 2005.
- [12] J. Shao, D. Nolan, and T. Hopkins, “A Novel Direct Back EMF Detection for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives,” vol. 00, no. c, pp. 33–38, 2002.
- [13] Y. Lai, S. Member, F. Shyu, and Y. Chang, “Novel Loss Reduction Pulsewidth Modulation Technique for Brushless dc Motor Drives Fed by MOSFET Inverter,” vol. 19, no. 6, pp. 1646–1652, 2004.

LAMPIRAN

1. Pengujian Tanpa Beban

f (Hz)	V (V)	I (A)	P_{in} (W)	V_{LL} (V)	I_{out} (A)	P_{out} (W)	n rpm	η (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0%
206.2	11.67	0.28	3.2676	0.4751593	0.36	0.513172	1201	16%
537.6	11.66	0.47	5.4802	1.1777945	0.59	2.0846964	3724	38%
806.5	11.65	0.5	5.825	1.7534128	0.64	3.3665525	5830	58%
1010	11.65	0.6	6.99	2.1997045	0.66	4.355415	7607	62%
1111	11.65	0.68	7.922	2.3729096	0.72	5.1254847	8493	65%
1205	11.65	0.75	8.7375	2.6269437	0.69	5.4377735	8711	62%
1282	11.64	0.79	9.1956	2.7366403	0.69	5.6648454	9484	62%
1351	11.64	0.82	9.5448	2.8405633	0.68	5.7947492	10003	61%
1408	11.64	0.86	10.0104	2.9849009	0.73	6.536933	10574	65%
1493	11.64	0.88	10.2432	3.158106	0.79	7.4847112	11310	73%

2. Datasheet

- IR2104

Static Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS}) = 15V and T_A = 25°C unless otherwise specified. The V_{IN} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to COM. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" (HO) & Logic "0" (LO) input voltage	3	—	—	V	$V_{CC} = 10V$ to $20V$
V_{IL}	Logic "0" (HO) & Logic "1" (LO) input voltage	—	—	0.8		$V_{CC} = 10V$ to $20V$
$V_{SD,TH+}$	SD input positive going threshold	3	—	—		$V_{CC} = 10V$ to $20V$
$V_{SD,TH-}$	SD input negative going threshold	—	—	0.8		$V_{CC} = 10V$ to $20V$
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	—	—	100	mV	$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	—	—	100		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 600V$
I_{QBS}	Quiescent V_{BS} supply current	—	30	55		$V_{IN} = 0V$ or $5V$
I_{QCC}	Quiescent V_{CC} supply current	—	150	270		$V_{IN} = 0V$ or $5V$
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	—	3	10		$V_{IN} = 5V$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	—	—	1		$V_{IN} = 0V$
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	8	8.9	9.8	V	
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	7.4	8.2	9		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	130	210	—	mA	$V_O = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	270	360	—		$V_O = 15V$ $PW \leq 10 \mu s$

• IRF3205

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V _{(BR)DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	V _{GS} = 0V, I _D = 250μA
ΔV _{(BR)DSS} /ΔT _J	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.057	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D = 1mA
R _{DS(on)}	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	8.0	mΩ	V _{GS} = 10V, I _D = 62A ④
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} = V _{GS} , I _D = 250μA
g _{fs}	Forward Transconductance	44	—	—	S	V _{DS} = 25V, I _D = 62A④
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V _{DS} = 55V, V _{GS} = 0V
		—	—	250		V _{DS} = 44V, V _{GS} = 0V, T _J = 150°C
I _{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V _{GS} = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V _{GS} = -20V
Q _g	Total Gate Charge	—	—	146	nC	I _D = 62A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	35		V _{DS} = 44V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	54		V _{GS} = 10V, See Fig. 6 and 13
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	14	—	ns	V _{DD} = 28V
t _r	Rise Time	—	101	—		I _D = 62A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	50	—		R _θ = 4.5Ω
t _f	Fall Time	—	65	—		V _{GS} = 10V, See Fig. 10 ④
L _D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L _S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C _{iss}	Input Capacitance	—	3247	—	pF	V _{GS} = 0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	781	—		V _{DS} = 25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	211	—		f = 1.0MHz, See Fig. 5
E _{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	—	1050⑥	264⑦		I _{AS} = 62A, L = 138μH

• 1N4148

LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V _{RRM}	repetitive peak reverse voltage		—	75	V
V _R	continuous reverse voltage		—	75	V
I _F	continuous forward current	see Fig.2; note 1	—	200	mA
I _{FRM}	repetitive peak forward current		—	450	mA
I _{FSM}	non-repetitive peak forward current	square wave; T _J = 25 °C prior to surge; see Fig.4			
		t = 1 μs	—	4	A
		t = 1 ms	—	1	A
		t = 1 s	—	0.5	A
P _{tot}	total power dissipation	T _{amb} = 25 °C; note 1	—	500	mW
T _{stg}	storage temperature		-65	+200	°C
T _j	junction temperature		—	200	°C

3. Program Arduino

```
#define SPEED_UP      A0
#define SPEED_DOWN   A1
#define PWM_MAX_DUTY 255
#define PWM_MIN_DUTY 0
#define PWM_START_DUTY 50
byte bldc_step = 0, motor_speed;
unsigned int i;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  DDRD |= 0x38;
  PORTD = 0x00;
  DDRB |= 0x0E;
  PORTB = 0x31;
  TCCR1A = 0;
  TCCR1B = 0x01;
  TCCR2A = 0;
  TCCR2B = 0x01;
  ACSR = 0x10;
  pinMode(SPEED_UP, INPUT_PULLUP);
  pinMode(SPEED_DOWN, INPUT_PULLUP);
}
```

```

ISR (ANALOG_COMP_vect) {
    for(i = 0; i < 10; i++) {
        if(blde_step & 1){
            if(!(ACSR & 0x20)) i -= 1;
        }
        else {
            if((ACSR & 0x20)) i -= 1;
        }
    }
    blde_move();
    blde_step++;
    blde_step %= 6;
}

void blde_move(){
    switch(blde_step){
        case 0:
            AH_BL();
            BEMF_C_RISING();
            break;
        case 1:
            AH_CL();
            BEMF_B_FALLING();
    }
}

```

```

    break;
case 2:
    BH_CL();
    BEMF_A_RISING();
    break;
case 3:
    BH_AL();
    BEMF_C_FALLING();
    break;
case 4:
    CH_AL();
    BEMF_B_RISING();
    break;
case 5:
    CH_BL();
    BEMF_A_FALLING();
    break;
}
}
void loop() {
    SET_PWM_DUTY(PWM_START_DUTY);
    with duty cycle = PWM_START_DUTY

```

```

i = 5000;
while(i > 100) {
    delayMicroseconds(i);
    bldc_move();
    bldc_step++;
    bldc_step %= 6;
    i = i - 20;
    Serial.print("BEMF= ");
    Serial.println(bldc_step);
}
motor_speed = PWM_START_DUTY;
ACSR |= 0x08;
while(1) {
    while(!(digitalRead(SPEED_UP)) && motor_speed <
PWM_MAX_DUTY){
        motor_speed++;
        SET_PWM_DUTY(motor_speed);
        delay(100);
    }
    while(!(digitalRead(SPEED_DOWN)) && motor_speed >
PWM_MIN_DUTY){
        motor_speed--;
        SET_PWM_DUTY(motor_speed);
    }
}

```

```

    delay(100);
}
Serial.println("PWM= ");
Serial.print(motor_speed);
}
}
void BEMF_A_RISING(){
    ADCSRB = (0 << ACME);
    ACSR |= 0x03;
}
void BEMF_A_FALLING(){
    ADCSRB = (0 << ACME);
    ACSR &= ~0x01;
}
void BEMF_B_RISING(){
    ADCSRA = (0 << ADEN);
    ADCSRB = (1 << ACME);
    ADMUX = 2;
    ACSR |= 0x03;
}
void BEMF_B_FALLING(){
    ADCSRA = (0 << ADEN);

```

```

ADCSRB = (1 << ACME);
ADMUX = 2;
ACSR &= ~0x01;
}
void BEMF_C_RISING(){
    ADCSRA = (0 << ADEN);
    ADCSRB = (1 << ACME);
    ADMUX = 3;
    ACSR |= 0x03;
}
void BEMF_C_FALLING(){
    ADCSRA = (0 << ADEN);
    ADCSRB = (1 << ACME);
    ADMUX = 3;
    ACSR &= ~0x01;
}
void AH_BL(){
    PORTB = 0x04;
    PORTD &= ~0x18;
    PORTD |= 0x20;
    TCCR1A = 0;
    TCCR2A = 0x81;
}

```

```

}
void AH_CL(){
    PORTB = 0x02;
    PORTD &= ~0x18;
    PORTD |= 0x20;
    TCCR1A = 0;
    TCCR2A = 0x81;
}
void BH_CL(){
    PORTB = 0x02;
    PORTD &= ~0x28;
    PORTD |= 0x10;
    TCCR2A = 0;
    TCCR1A = 0x21;
}
void BH_AL(){
    PORTB = 0x08;
    PORTD &= ~0x28;
    PORTD |= 0x10;
    TCCR2A = 0;
    TCCR1A = 0x21;
}

```



```

void CH_AL(){
    PORTB = 0x08;
    PORTD &= ~0x30;
    PORTD |= 0x08;
    TCCR2A = 0;
    TCCR1A = 0x81;
}

void CH_BL(){
    PORTB = 0x04;
    PORTD &= ~0x30;
    PORTD |= 0x08;
    TCCR2A = 0;
    TCCR1A = 0x81;
}

void SET_PWM_DUTY(byte duty){
    if(duty < PWM_MIN_DUTY)
        duty = PWM_MIN_DUTY;
    if(duty > PWM_MAX_DUTY)
        duty = PWM_MAX_DUTY;
    OCR1A = duty;
    OCR1B = duty;
    OCR2A = duty; }

```

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---

INDEKS

- arduino uno, 2, 3, 22, 28, 34,
35, 36, 37, 41
- back-emf*, v, vii, xiv, xv, xvi, 1,
2, 3, 4, 5, 8, 14, 15, 16, 17,
18, 21, 22, 26, 27, 28, 31,
34, 36, 37, 39, 40, 43, 44,
45, 46, 53
- Battery Li-Po*, 37
- drain*, 10, 11
- driver inverter, 22, 24, 26
- duty cycle*, 13, 18, 31, 33, 62
- floating*, v, vii, 1, 12, 13, 14,
15, 16, 18, 22, 26, 27, 43, 44
- Frekuensi, v, xv, xvi, 19, 42,
45, 47, 48, 49, 50
- gating signal*, 18, 19, 31, 33
- gelombang *square*, 16
- hall effect*, 1
- inverter tiga fasa, v, 1, 2, 3, 4,
12, 22, 24, 26, 33, 36, 46
- komutasi, 2, 6, 13, 14, 16, 17,
18, 22, 26, 31, 34, 44
- mikrokontroler, 2, 3, 12, 22,
27, 28, 31, 34, 35, 40, 41,
44, 46
- MOSFET, xii, xiv, 3, 9, 10, 11,
12, 13, 17, 18, 22, 23, 24,
31, 34, 36, 40, 56
- Mosfet driver, 23
- motor BLDC, v, 1, 2, 3, 4, 5, 6,
7, 8, 9, 13, 18, 21, 22, 23,
25, 26, 28, 31, 34, 35, 36,
39, 43, 44, 47, 48, 50, 53
- optocoupler*, 12
- oscilloscope*, 40
- osiloskop, 39, 41, 43, 46
- photodiode*, 12
- Propeller*, 37
- Proteus, 3, 4, 21
- push button*, 35, 41, 43, 50
- PWM, v, vii, xii, xiii, xiv, xv,
xvi, 1, 2, 3, 4, 13, 16, 18, 28,
30, 31, 34, 35, 39, 40, 41,
42, 43, 44, 45, 46, 47, 48,
49, 50, 51, 53, 60, 62, 63,
64, 67
- receiver*, 12
- reverse diode*, 24
- sensorless*, v, vii, 1, 4, 13, 14,
15, 26, 28, 34, 35, 39, 47,
48, 53
- six-step*, 15, 16, 34, 46
- source*, 10, 11, 25
- thrust test*, 39, 48
- transmitter*, 12
- trapezoidal*, 5, 6
- Virtual neutral point*, 15, 27
- zero crossing*, v, vii, xv, 14, 15,
26, 35, 43

--- halaman ini sengaja dikosongkan ---



BIODATA PENULIS

Penulis dilahirkan di Kota Ngawi, Jawa Timur. Namun sejak kecil tinggal di Kota Nganjuk hingga Sekolah Menengah Atas. Penulis merupakan anak ke-dua dari 2 bersaudara. Sejak kecil suka bermain olahraga. Pencapaiannya pernah jadi atlet sepak bola, bola voli, dan tenis meja. Penulis sekolah di SMAN 2 Nganjuk, sejak SMA penulis aktif berorganisasi. Salah satu organisasi yang diikuti adalah MT Nurul Iman.

Setelah lulus SMA, penulis berkuliah di Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Elektro ITS Angkatan 2015 (e55). Di masa perkuliahan penulis aktif dalam bidang sosial, penelitian dan organisasi. Dalam bidang sosial, penulis aktif di Paguyuban Mahasiswa Nganjuk-Surabaya (Argabayu). Di Argabayu, penulis pernah mendapatkan amanah menjadi Wakil Ketua Internal Argabayu. Selain itu, dalam ranah penelitian, penulis aktif membuat karya tulis ilmiah dan PKM sejak tahun pertama hingga tahun ke-empat. Karya-karya yang sudah dibuat telah mengantarkan penulis meraih belasan penghargaan selama berkuliah di ITS. Selain itu, penulis juga menjadi salah satu asisten Konversi Energi Listrik Teknik Elektro ITS. Di semester ke-8, penulis diberi kepercayaan menjadi koordinator asisten Lab. KE. Dalam bidang organisasi penulis aktif di tahun kedua dengan mendaftar sebagai staff Departemen Riset dan Teknologi HIMATEKTRO ITS. Tidak berhenti ditahun itu saja, penulis meneruskan pengembangan diri di bidang manajerial ditahun selanjutnya dengan diamanahi menjadi Kepala Departemen Riset dan Teknologi HIMATEKTRO ITS. Selanjutnya penulis mendaftar sebagai Trainer Keilmiah ITS Batch 7. Di Trainer Keilmiah ITS, penulis diamanahi menjadi Ketua Trainer Keilmiah ITS. Di tahun terakhir penulis di percaya oleh Presiden BEM ITS 2019 untuk menjadi Menteri Riset dan Teknologi BEM ITS. Dari sekian pengalaman penulis, ada motivasi kecil yang selalu di ingat yaitu “Menyesali nasib tidak akan mengubah keadaan, terus berkarya dan bekerjalah yang membuat kita BERHARGA”.