



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGENDALIAN MOTOR BRUSHLESS DC
DENGAN METODE PWM SINUSOIDAL
MENGUNAKAN ATMEGA16**

SKRIPSI

**ABE DHARMAWAN
04 05 03 001X**

**FAKULTAS TEKNIK
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGENDALIAN MOTOR BRUSHLESS DC
DENGAN METODE PWM SINUSOIDAL
MENGUNAKAN ATMEGA16**

SKRIPSI

Diajukan Untuk Melengkapi Sebagian Persyaratan Menjadi Sarjana Teknik

**ABE DHARMAWAN
04 05 03 001X**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

Nama : Abe Dharmawan

NPM : 040503001X

Tanda Tangan :



Tanggal : 4 Januari 2010

LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh:

Nama : Abe Dharmawan
NPM : 040503001X
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Pengendalian Motor BLDC dengan Metode PWM Sinusoidal
Menggunakan Atmega 16

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Abdul Muis ST, M.Sc
Penguji : Ir. Wahidin Wahab, M.SC, Ph.D
Penguji : Prof. Drs. Benyamin Kusumoputro, M.Eng., Dr.Eng.



Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 4 Januari 2010

iii

Universitas Indonesia

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan penulisan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Abdul Muis, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Orang tua dan keluarga saya, yang telah banyak memberikan bantuan dukungan material dan moral;
- (3) Nur Hidayat, D.Ari Wicaksono, dan sahabat-sahabat yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini; dan

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, Januari 2010

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Abe Dharmawan
NPM : 040503001X
Departemen : Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Pengendalian Motor Brushless DC Menggunakan Metode PWM Sinusoidal
Menggunakan Atmega16

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 4 Januari 2010

Yang menyatakan



(Abe Dharmawan)

ABSTRAK

Nama : Abe Dharmawan
Program studi : Teknik Elektro
Judul : Pengendalian Motor Brushless DC dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan Atmega16

Seiring dengan perkembangan jaman, kebutuhan akan sistem penggerak listrik yang efisien, kecepatan dan torsi yang tinggi, dan perawatan yang murah semakin meningkat. Akan tetapi motor yang sering digunakan saat ini yakni motor induksi dan motor DC belum mampu memenuhi kebutuhan akan hal tersebut. Oleh karena itu digunakan motor BLDC untuk memenuhi kebutuhan tersebut.

Motor BLDC merupakan suatu motor synchronous 3 fasa. Motor ini disebut dengan BLDC karena pada dasarnya BLDC menggunakan tegangan DC sebagai sumbernya. Hanya saja tegangan ini dikonversi menjadi tegangan AC 3 fasa dengan menggunakan *inverter* atau *driver* 3 fasa. Terdapat 2 metode untuk mengendalikan *inverter* atau *driver* yakni metode six-step dan metode PWM sinusoidal. Pada motor BLDC komersial, metode six-step sering banyak digunakan karena sederhana dan mudah diimplementasikan. Akan tetapi metode six-step memiliki arus rms yang lebih tinggi dan cenderung lebih bising dibandingkan dengan metode sinusoidal. Untuk menanggulangi kelemahan metode six-step digunakan metode PWM sinusoidal. Untuk menunjang proses komutasi elektrik pada pengendalian motor BLDC sehingga diperoleh kecepatan dan torsi yang konstan, digunakan sensor *hall*.

Fokus skripsi ini adalah membahas implementasi pengendalian BLDC motor dengan PWM sinusoidal dengan menggunakan AVR ATmega16 dan sensor hall sebagai alat deteksi untuk mengubah komutasi dari pengendali. Dalam skripsi ini pengendali akan dikhususkan untuk mengendalikan frekuensi PWM sinusoidal guna mengendalikan kecepatan baik dalam kondisi tanpa beban dan dengan beban.

Kata kunci :
BLDC, ATmega16, PWM sinusoidal, sensor *hall*

ABSTRACT

Name : Abe Dharmawan
Study Program: Electrical Engineering
Title : Brushless DC Motor Control using Sinusoid PWM Method
using ATmega16

Along with industry development, the needs of electric motor that have high efficiency, speed, and torque, and inexpensive treatment is increasing. However, the motor that now is often used, such as induction motor and DC motor, failed to meet the needs. Therefore, BLDC motor is used to overcome the needs of efficiency, speed, torque, and the treatment cost.

BLDC motor is a 3 phase synchronous motor. It's called BLDC because BLDC uses DC source but it's inverted to 3 phase AC using 3 phase motor drive or inverter. There are two methods in controlling BLDC motor. They are six-step method and PWM sinusoidal method. Six-step method is a method that is used widely in commercial BLDC motor. It's because it easy to be implemented and the algorithm is simple. However this method produce rms current higher and more noisy than PWM sinusoidal method. So to overcome this weakness, the PWM sinusoidal method is used. To support the commutation process in BLDC motor so the constant speed and torque can be obtained, sensor hall is used

The focus in this final project is to implement PWM sinusoidal method to control BLDC motor using microcontroller ATmega16 and hall sensor as detection device in changing commutation mode. In this final project the control will be made for controlling speed using frequency of sinusoid PWM with and without load.

Key Words:

BLDC, ATmega16, Sinusoidal PWM, hall sensor

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penulisan.....	3
1.3 Pembatasan Masalah.....	4
1.4 Sistematika Penulisan.....	4
BAB 2 DASAR TEORI.....	5
2.1 Brushless DC Motor.....	5
2.1.1 Operasi Pada BLDC.....	7
2.1.2 Driver Tiga Fasa.....	10
2.2 Pengendalian BLDC.....	11
2.2.1 Metode Six-Step.....	11
2.2.2 Metode PWM Sinusoidal.....	14
2.2.3 Perbandingan Metode Six-Step Dengan PWM Sinusoidal.....	16
2.3 Metode Pendeteksian Perubahan Komutasi.....	17
2.3.1 Back EMF dan Zero Crossing.....	18
2.3.2 Encoder.....	19
2.3.3 Sensor Hall.....	20
BAB3 PERANCANGAN SISTEM.....	23
3.1 Desain Perangkat Keras.....	23
3.1.1 Mikrokontroler ATmega16.....	24
3.1.2 Sensor Hall.....	25
3.1.3 Motor BLDC.....	26
3.1.4 Driver 3 Fasa.....	27
3.2 Algoritma Pengendalian.....	28
BAB4 ANALISA.....	30
4.1 Implementasi Algoritma.....	30
4.2 Analisa Data.....	33
4.2.1 Analisa Data Kecepatan Dengan Frekuensi Pada Kondisi Tanpa Beban dan Dengan Beban yang Berupa Baling – Baling.....	33
4.2.2 Analisa Data Kecepatan dengan Berbagai Beban Pada Dua Frekuensi yang Berbeda.....	39
BAB 5 KESIMPULAN.....	42
DAFTAR ACUAN.....	43
DAFTAR REFERENSI.....	44
LAMPIRAN.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Strategi Pengendalian Driver	11
Tabel 4.1	Data Kecepatan Percobaan Frekuensi Kerja Dengan Beban Dibandingkand dengan Kecepatan yang Didapat Dari Rumus Linearisasi	38
Tabel 4.2	Data Kecepatan Percobaan Frekuensi Kerja Tanpa Beban Dibandingkand dengan Kecepatan yang Didapat Dari Rumus Linearisasi	38



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Penampang Motor BLDC	6
Gambar 2.2	Sensor Hall dan Encoder Pada Motor BLDC	6
Gambar 2.3	Medan Magnet Putar Stator dan Perputaran Rotor.....	8
Gambar 2.4	Tegangan Stator BLDC	9
Gambar 2.5	Skema Umum Driver 3 fasa.....	10
Gambar 2.6	Algoritma PWM Six-Step	12
Gambar 2.7	Algoritma PWM Six-Step 3 Fasa.....	13
Gambar 2.8	Implementasi Algoritma Six-Step.....	13
Gambar 2.9	Pembentukan Sinyal PWM Sinusoidal	14
Gambar 2.10	Implementasi PWM Sinusoidal	15
Gambar 2.11	BEMF dan Zero Crossing pada Fasa Floating	19
Gambar 2.12	BLDC Motor Dengan Encoder	20
Gambar 2.13	Encoder Untuk (a) Motor 2 Pole dan (b) Motor 4 Pole	20
Gambar 2.14	Sensor Hall dan Perubahan Sinyal PWM	21
Gambar 2.15	Kombinasi Nilai Sensor Hall pada Motor 2 Pole.....	22
Gambar 3.1	Sistem Pengendali Secara Umum	23
Gambar 3.2	Desain Perangkat Keras	24
Gambar 3.3	Sinyal PWM yang Digunakan (Dalam Simulator)	24
Gambar 3.4	Konstruksi Sensor Hall Dan Motor.....	26
Gambar 3.5	Motor BLDC Tower PRO 2408-21T-3 Δ	26
Gambar 3.6	Implementasi Perangkat Keras.....	27
Gambar 3.7	Flowchart dari Algoritma Pengendali	29
Gambar 4.1	Implementasi Algoritma PWM Sinusoidal (a) PWM sinusoidal (b) sinyal kotak.....	30
Gambar 4.2	Gelombang Sinusoidal Antar Fasa.....	31
Gambar 4.3	Hasil Tracing Gelombang Sinusoidal	32
Gambar 4.4	Kecepatan Motor VS Frekuensi PWM (a)tanpa beban (b) dengan beban.....	34
Gambar 4.5	Hasil Linearisasi Pada Daerah Frekuensi Kerja Motor.....	37
Gambar 4.6	Grafik Kecepatan Motor dengan Beban Pada Frekuensi PWM 25 Hz dan 60 Hz.....	41

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan zaman, kebutuhan akan motor yang memiliki efisiensi tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi dan dapat divariasikan, dan biaya perawatan yang rendah semakin meningkat. Hanya saja motor yang digunakan secara umum saat ini, yakni motor DC dan motor induksi, belum dapat memenuhi kebutuhan tersebut. Motor DC memiliki efisiensi yang tinggi karena penggunaan tegangan DC pada rotor untuk menggerakkan motor tersebut. Hanya saja motor DC memiliki biaya perawatan yang tinggi. Biaya perawatan yang tinggi ini muncul akibat digunakannya *brush* dalam komutasi motor DC. *Brush* pada motor DC ini cepat mengalami kerusakan. Hal ini terjadi karena pada saat motor berputar, pada *brush*, akan timbul *arching* akibat proses komutasi. Motor induksi memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan motor DC. Hal ini terjadi karena motor induksi tidak menggunakan *brush* untuk menunjang komutasi. Namun motor induksi memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan motor DC dan cepat panas. Hal ini terjadi akibat rotor yang terbuat dari kumparan diinduksi dengan medan magnet putar stator sehingga timbul arus pada rotor. Arus pada kumparan rotor ini menyebabkan rotor menjadi panas karena terdapat disipasi daya. Selain itu karena motor ini hanya dapat bekerja pada saat kumparan rotor dialiri arus dan menjadi magnet, kecepatan putaran rotor akan jauh lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan putar medan magnet stator. Hal inilah yang menyebabkan efisiensi

motor induksi cenderung lebih rendah dibandingkan dengan motor DC. Oleh karena itu untuk memenuhi kebutuhan akan efisiensi tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi dan dapat divariasikan, dan biaya perawatan yang rendah maka digunakan motor brushless DC motor (BLDC) atau brushless AC motor (BLAC).

BLDC maupun BLAC sebenarnya memiliki komponen yang sama yakni stator yang terbuat dari kumparan dan rotor yang terbuat dari magnet permanen. Perbedaan mendasar dari BLDC dengan BLAC adalah BEMF yang diberikan yakni BLDC memiliki BEMF *trapezoidal* dan BLAC memiliki BEMF sinusoidal. Walaupun demikian pada prakteknya, keduanya sama dan sering disebut dengan BLDC. Hal ini terjadi karena kedua jenis motor ini menggunakan pengendali yang sama, sumber tegangan utama yang sama yakni DC dan memiliki komponen penyusun yang sama. Agar motor BLDC dapat bekerja, diperlukan adanya medan putar magnet stator. Untuk mendapatkan medan magnet putar stator diperlukan sumber tegangan AC 3 fasa pada stator motor. Oleh karena itu digunakan *inverter* 3 fasa untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC 3 fasa. Berdasarkan bentuk tegangan AC 3 fasa yang dihasilkan oleh *inverter* terdapat 2 metode yang digunakan dalam pengendalian *inverter* motor BLDC yakni dengan menggunakan metode PWM sinusoidal dan metode six-step.

Metode six-step merupakan metode yang sering digunakan dalam pengendalian motor BLDC. Hal ini terjadi karena metode ini mudah diimplementasikan dan memiliki algoritma yang sederhana. Gelombang yang dihasilkan dari metode ini berbentuk *square* atau *trapezoid*. Kelemahan dari metode ini memiliki rugi – rugi daya yang besar, bising, dan arus yang besar.

Untuk mengatasi kelemahan dari pengendali dengan menggunakan metode six-step digunakan metode PWM sinusoidal. Tujuan dari metode PWM sinusoidal adalah menciptakan tegangan AC sinusoidal sebagai masukan ke motor.

Agar motor mampu bekerja dengan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan *timing* perubahan komutasi yang tepat dalam pengendalian BLDC baik untuk metode six-step maupun metode PWM sinusoidal. Oleh karena itu pada motor BLDC, akibat tidak memiliki *brush*, digunakanlah *encoder* atau 3 buah sensor *hall* untuk menentukan *timing* perubahan komutasi pada pengendalian BLDC. Pada umumnya, *encoder* digunakan untuk menentukan perubahan *timing* komutasi. Namun karena *encoder* bersifat tetap (tidak dapat diubah), suatu *encoder* belum tentu dapat diterapkan pada motor lain. Hal ini terjadi karena apabila motor memiliki jumlah pole yang berbeda, *encoder* yang digunakan pun harus berbeda. Hal ini berbeda dengan sensor *hall* yakni apabila jumlah pole dari motor berubah, letak dari sensor *hall* pun dapat dengan mudah diubah.

1.2 Tujuan Penulisan

Tujuan dari skripsi ini adalah mengimplementasikan metode PWM sinusoidal untuk mengendalikan kecepatan BLDC berdasarkan perubahan frekuensi PWM sinusoidal dengan menggunakan mikrokontroler AVR ATmega16 dan sensor *Hall* sebagai *feedback* dalam menentukan *timing* perubahan komutasi.

1.3 Pembatasan Masalah

Masalah yang dibahas dalam skripsi ini adalah:

1. Pembahasan pengendali berbasis PWM sinusoidal.
2. Perancangan algoritma pengendali motor BLDC dengan menggunakan metode PWM sinusoidal yang diterapkan dengan menggunakan AVR Atmega16 dan perangkat keras.
3. Hubungan kecepatan dengan frekuensi PWM sinusoidal yang digunakan pada kondisi dengan beban dan tanpa beban.

1.4 Sistematika Penulisan

Laporan skripsi ini dibagi menjadi 5 bab, yakni:

1. Bab I Pendahuluan, bagian ini berisi latar belakang, tujuan penulisan, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan.
2. Bab II Dasar Teori, bagian ini berisi teori – teori yang mendukung dalam penyusunan skripsi.
3. Bab III Perancangan Sistem, bagian berisi perancangan sistem BLDC berikut algoritma yang digunakan untuk mengendalikan BLDC.
4. Bab IV Analisa, bagian ini berisi analisa dari implementasi algoritma metode sinusoidal untuk pengendalian BLDC.
5. Bab V Kesimpulan, bagian ini berisi kesimpulan dari skripsi ini.

BAB II

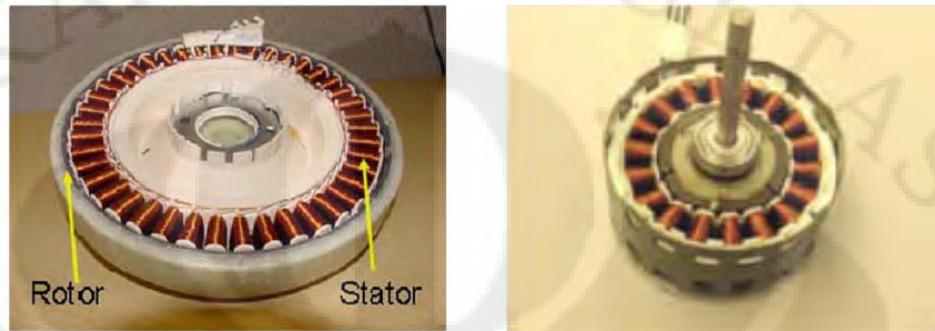
DASAR TEORI

2.1 Brushless DC Motor (BLDC)

BLDC motor atau dapat disebut juga dengan BLAC motor merupakan motor listrik *synchronous* AC 3 fasa. Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena BLDC memiliki BEMF berbentuk *trapezoid* sedangkan BLAC memiliki BEMF berbentuk sinusoidal. Walaupun demikian keduanya memiliki struktur yang sama dan dapat dikendalikan dengan metode six-step maupun metode PWM sinusoidal. Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya *brush*. Dibandingkan dengan motor induksi, BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi karena rotor terbuat dari magnet permanen. Walaupun memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor DC dan induksi, pengendalian BLDC jauh lebih rumit untuk kecepatan dan torsi yang konstan karena tidak adanya *brush* yang menunjang proses komutasi dan harga BLDC jauh lebih mahal.

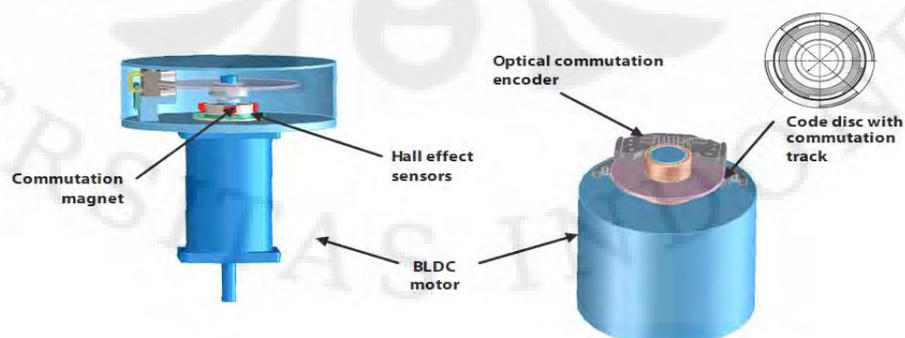
Secara umum motor BLDC terdiri dari dua bagian, yakni, *rotor*, bagian yang bergerak, yang terbuat dari permanen magnet dan *stator*, bagian yang tidak bergerak, yang terbuat dari kumparan 3 fasa. Walaupun merupakan motor listrik *synchronous* AC 3 fasa, motor ini tetap disebut dengan BLDC karena pada implementasinya BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan *inverter* 3

fasa. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada stator BLDC adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor.



Gambar 2.1 Penampang Motor BLDC

Oleh karena tidak adanya *brush* pada motor BLDC, untuk menentukan *timing* komutasi yang tepat pada motor ini sehingga didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan 3 buah sensor *Hall* dan atau *encoder*. Pada sensor *Hall*, *timing* komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet *rotor* dengan menggunakan 3 buah sensor *hall* untuk mendapatkan 6 kombinasi *timing* yang berbeda, sedangkan pada *encoder*, *timing* komutasi ditentukan dengan cara menghitung jumlah pola yang ada pada *encoder*.



Gambar 2.2 Sensor *Hall* dan *Encoder* pada Motor BLDC

Pada umumnya *encoder* lebih banyak digunakan pada motor BLDC komersial karena *encoder* cenderung mampu menentukan *timing* komutasi lebih presisi dibandingkan dengan menggunakan sensor *hall*. Hal ini terjadi karena pada *encoder*, kode komutasi telah ditetapkan secara *fixed* berdasarkan banyak *pole* dari motor dan kode inilah yang digunakan untuk menentukan *timing* komutasi. Namun karena kode komutasi *encoder* ditetapkan secara *fixed* berdasarkan banyak *pole* motor, suatu *encoder* untuk suatu motor tidak dapat digunakan untuk motor dengan jumlah *pole* yang berbeda. Hal ini berbeda dengan sensor *hall*. Apabila terjadi perubahan *pole* rotor pada motor, posisi sensor *hall* dapat diubah dengan mudah. Hanya saja kelemahan dari sensor *hall* adalah apabila posisi sensor *hall* tidak tepat akan terjadi kesalahan dalam penentuan *timing* komutasi atau bahkan tidak didapatkan 6 kombinasi *timing* komutasi yang berbeda.

2.1.1 Cara Kerja BLDC

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul medan magnet (B):

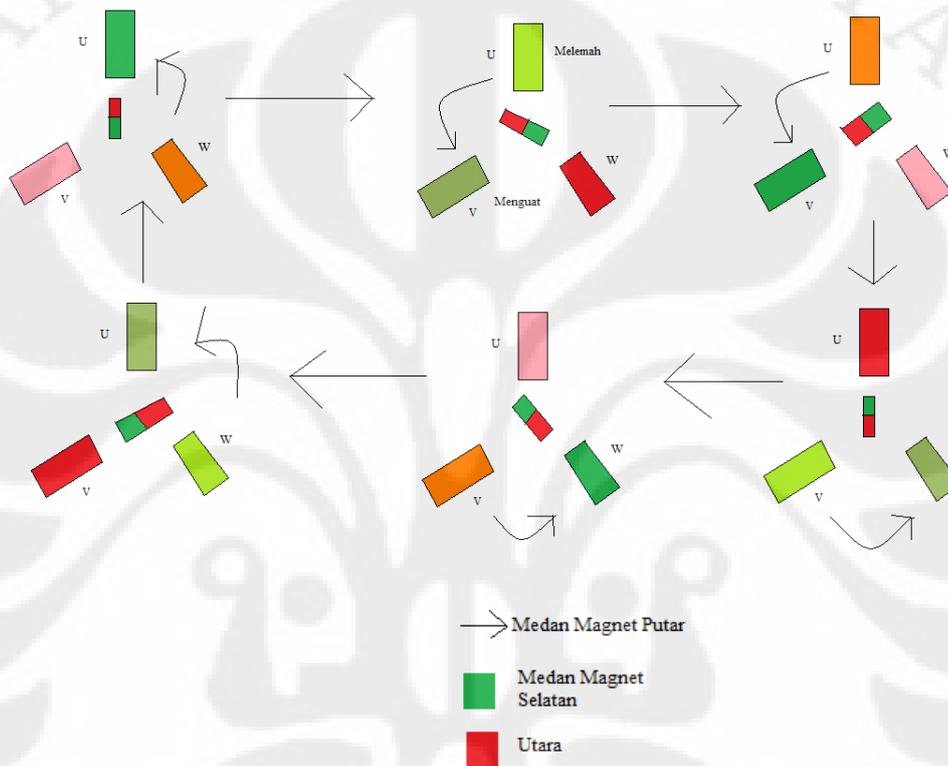
$$B = \frac{\mu NI}{2l} \quad (2.1)$$

Di mana N merupakan jumlah lilitan, i merupakan arus, l merupakan panjang lilitan dan μ merupakan permeabilitas bahan.

Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa sinusoidal, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah – ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan ω_s :

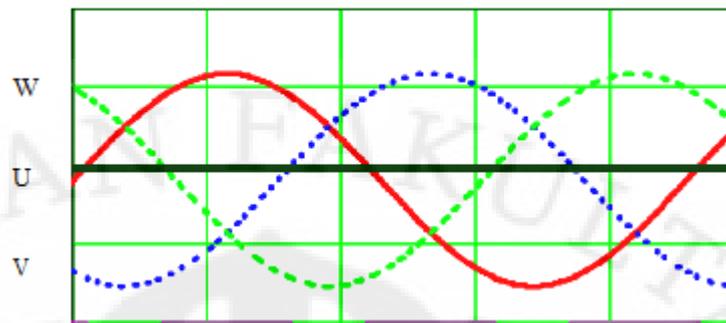
$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad (2.2)$$

Di mana f merupakan frekuensi arus input dan p merupakan jumlah pole rotor.



Gambar 2.3 Medan Magnet Putar Stator dan Perputaran Rotor

Berdasarkan gambar 2.3, medan putar magnet stator timbul akibat adanya perubahan polaritas pada stator U, V, dan W. Perubahan polaritas ini terjadi akibat adanya arus yang mengalir pada stator berupa arus AC yang memiliki polaritas yang berubah - ubah.



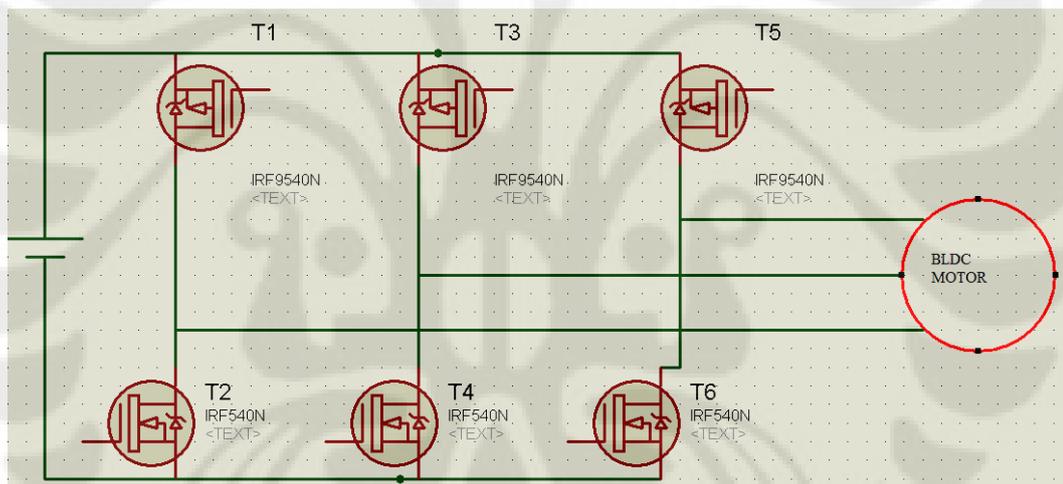
Gambar 2.4 Tegangan Stator BLDC

Berdasarkan gambar 2.4, ketika stator U diberikan tegangan negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negatif sedangkan V dan W yang diberikan tegangan positif akan memiliki polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet kumparan stator dan magnet rotor, sisi positif magnet rotor akan berputar mendekati medan magnet stator U, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet stator V dan W. Akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC sinusoidal, medan magnet stator U, V, dan W akan berubah – ubah polaritas dan besarnya mengikuti perubahan tegangan sinusoidal AC. Ketika U dan V memiliki medan magnet negatif akibat mendapatkan tegangan negatif dan W memiliki medan magnet positif akibat tegangan positif, magnet permanen rotor akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yakni bagian negatif akan berputar menuju medan magnet stator W dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet stator U dan V. Selanjutnya ketika V memiliki medan magnet negatif dan U serta W memiliki medan magnet positif, bagian positif magnet permanen akan berputar menuju V dan bagian negatif akan menuju U dari kumparan W. Karena tegangan AC sinusoidal yang digunakan berlangsung secara kontinu, proses perubahan polaritas

tegangan pada stator ini akan terjadi secara terus menerus sehingga menciptakan medan putar magnet stator dan magnet permanen rotor akan berputar mengikuti medan putar magnet stator ini. Hal inilah yang menyebabkan rotor pada BLDC dapat berputar.

2.1.2 Driver Tiga Fasa

Untuk membangkitkan daya/tegangan seperti pada gambar 2.5 dari sumber DC, maka digunakan driver 3 fasa seperti pada gambar 2.6



Gambar 2.5 Skema Umum Driver Tiga Fasa

Driver ini tersusun dari 3 pasang transistor PNP dan NPN. Agar dapat menghasilkan tegangan seperti pada gambar 2.4, masing – masing transistor harus diberi sinyal kendali mengikuti urutan pada tabel 2.1. Sinyal kendali yang diberikan berupa sinyal kendali periodik yang dibagi menjadi 6 keadaan.

Tabel 2.1 Strategi Pengendalian Driver

Step	T1 dan T2	T3 dan T4	T5 dan T6
1	T1	T4	T5
2	T1	T4	T6
3	T1	T3	T6
4	T2	T3	T6
5	T2	T3	T5
6	T2	T4	T5

Berdasarkan sinyal kendali yang dikenakan pada driver, terdapat dua metode pengendalian BLDC yakni metode six-step dan metode sinusoidal.

2.2 Pengendalian BLDC

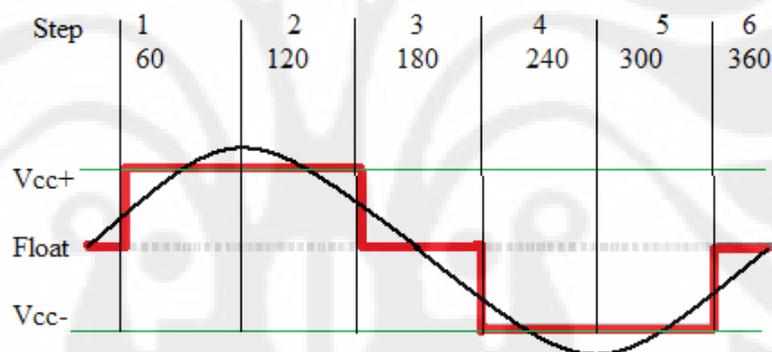
Terdapat dua metode dalam pengendalian BLDC yakni metode konvensional atau metode six-step dan metode sinusoidal.

2.2.1 Metode Six-Step

Metode six-step merupakan metode yang paling sering digunakan dalam pengendalian BLDC komersial. Hal ini terjadi karena metode ini sederhana sehingga mudah diimplementasikan. Hanya saja metode ini memiliki kelemahan yakni memiliki arus rms yang tinggi, rugi – rugi daya yang tinggi, dan bising. Hal ini terjadi karena PWM yang digunakan dalam metode ini merupakan PWM *square* dengan frekuensi tertentu sehingga menciptakan gelombang AC yang berbentuk *trapezoid* atau *square*. Akibat dari gelombang yang berbentuk *square*

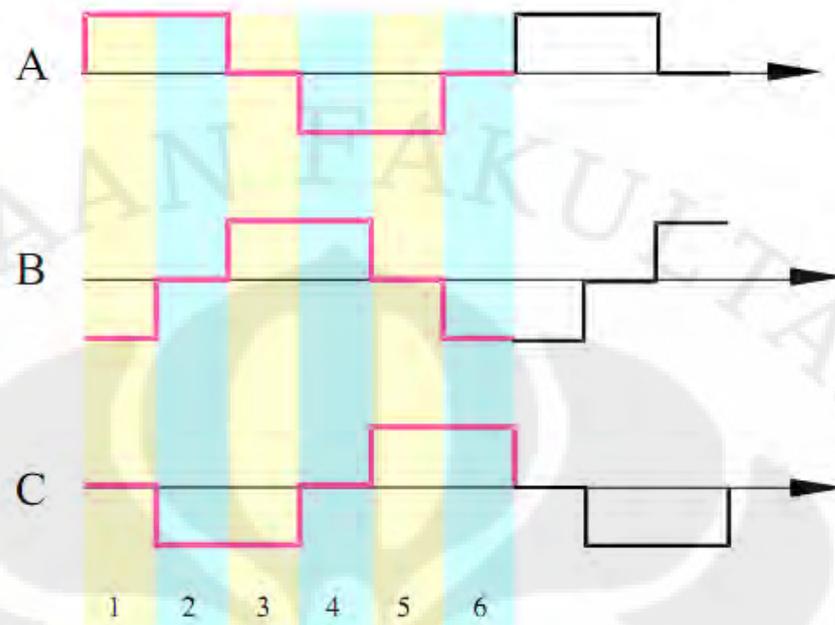
atau *trapezoid* timbul gelombang harmonik. Gelombang harmonik inilah yang menyebabkan motor “bising” ketika berputar.

Metode ini disebut metode six-step karena agar mampu menciptakan gelombang *trapezoid* atau *square* yang menyerupai gelombang sinusoidal, digunakan PWM *square* yang terdiri dari 6 bagian yakni 2 bagian positif, 2 bagian negatif, dan 2 bagian *floating*. Masing – masing bagian besarnya 60 derajat gelombang sinusoidal. Kondisi *floating* pada algoritma ini adalah kondisi ketika gelombang sinusoidal berpotongan pada titik 0.



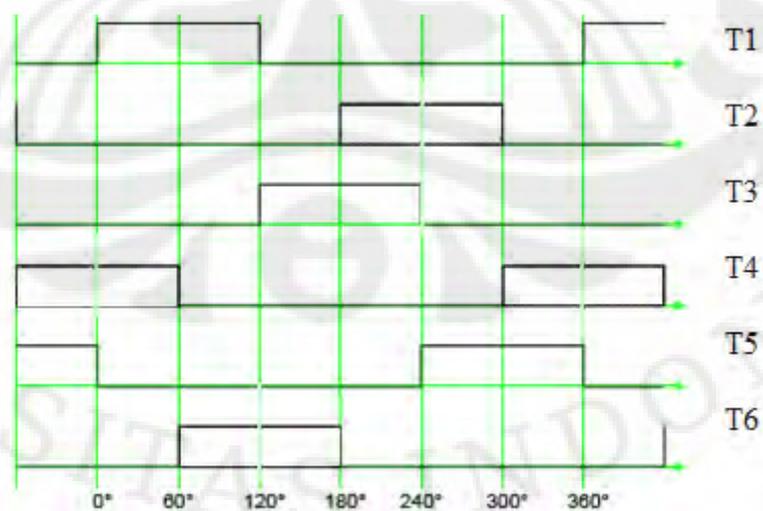
Gambar 2.6 Algoritma PWM Six-Step

Untuk membentuk gelombang *trapezoid* atau gelombang *square* 3 fasa, digunakan 3 buah algoritma six-step yang masing – masing berbeda 1 step (60 derajat) antara satu algoritma dengan algoritma lainnya.



Gambar 2.7 Algoritma PWM Six-Step 3 Fasa

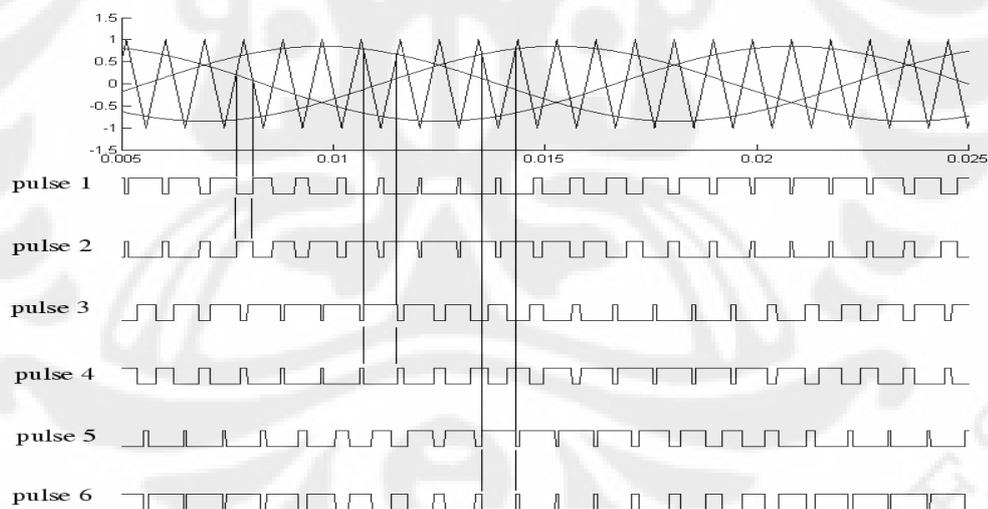
Dalam implementasi pada *driver* 3 fasa, maka algoritma PWM pada gambar 2.8 untuk masing – masing fasa dibagi menjadi 2 bagian yakni bagian positif untuk transistor T1, T3 dan T5(gambar 2.6) dan bagian negatif untuk transistor T2, T4, dan T6 (gambar 2.6).



Gambar 2.8 Implementasi Algoritma Six-Step

2.2.2 Metode PWM Sinusoidal

Pengendalian dengan metode PWM sinusoidal bertujuan untuk menciptakan gelombang sinusoidal sebagai masukan motor. Kelebihan dari pengendalian ini adalah memiliki arus rms yang lebih kecil dibanding metode six-step, rugi – rugi yang kecil, dan tidak bising karena pada gelombang sinusoidal tidak terdapat harmonik. Hanya saja metode ini jarang digunakan karena algoritma yang rumit dalam pembangkitan sinyal PWM sinusoidal. Proses pembangkitan PWM sinusoidal dilakukan dengan cara membandingkan sinyal sinusoidal dengan sinyal segitiga yang memiliki frekuensi lebih tinggi. Ketika sinyal segitiga dan sinyal sinusoidal ini berpotongan pada dua titik, sebuah sinyal PWM akan terbentuk. Berikut gambar pembentukan sinyal PWM sinusoidal.

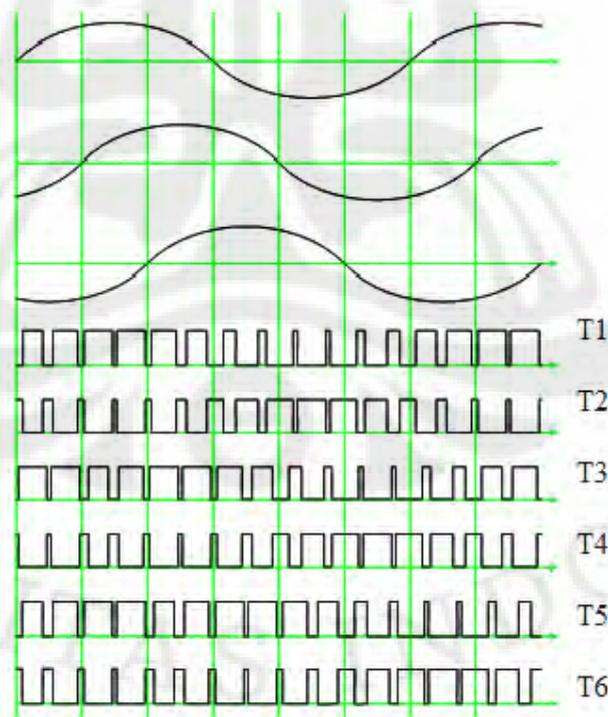


Gambar 2.9 Pembentukan Sinyal PWM Sinusoidal

Besar resolusi PWM yang dihasilkan sangat tergantung dari frekuensi sinyal segitiga yang digunakan. Semakin besar frekuensi sinyal segitiga yang digunakan, resolusi PWM yang dihasilkan semakin baik. Dan semakin tinggi resolusi PWM

yang digunakan semakin sempurna gelombang sinusoidal yang terbentuk. Karena rumitnya operasi yang digunakan dan banyaknya *resource* mikrokontroler untuk membentuk PWM sinusoidal maka digunakan *table-lookup*. Tabel ini berisi *timing* sinyal PWM sinusoidal yang telah terbentuk dari perbandingan kedua sinyal tersebut sehingga kerumitan operasi matematika dapat dihindari.

Dalam implementasi, agar dapat mengendalikan keenam transistor pada driver, sinyal PWM sinusoidal yang didapatkan dibagi menjadi 6 bagian atau *step*. Masing – masing bagian atau *step* besarnya 60 derajat. Hal ini terjadi karena perbedaan tiap fasa dari sinyal 3 fasa adalah 120 derajat dan tiap 60 derajat terdapat gelombang sinusoidal yang berpotongan dengan nilai 0. Oleh karena itu sinyal PWM tersebut harus dibagi menjadi 6 bagian untuk menunjang proses komutasi pada BLDC. Berikut implementasi dari algoritma PWM sinusoidal:



Gambar 2.10 Implementasi PWM Sinusoidal

2.2.3 Perbandingan Metode Six-Step dan Metode PWM Sinusoidal

Metode PWM sinusoidal memiliki arus rms lebih kecil dibandingkan metode six-step. Hal ini terjadi karena metode PWM sinusoidal akan menghasilkan gelombang sinusoidal yang besar arus yang berubah terhadap waktu sedangkan PWM six-step, sinyal yang terbentuk dari PWM ini merupakan sinyal *square* atau *trapezoid*, nilainya sebagian besar tetap setiap waktu. Besar arus yang dihasilkan oleh kedua metode tersebut pada kondisi daya output yang sama [1]:

- a. PWM six-step

$$\begin{aligned} I_{av} &= 2 \frac{I_d}{3} \\ I_{rms} &= \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.8165 I_d \end{aligned} \quad (2.3)$$

- b. PWM Sinusoidal

$$\begin{aligned} I_{av} &= \frac{2}{\pi} \left(\frac{\pi}{3}\right) I_d \\ I_{rms} &= \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}}\right) I_d = 0.74 I_d \end{aligned} \quad (2.4)$$

Di mana I_{av} merupakan arus rata – rata dan I_d merupakan arus DC *link*. Besar arus rata – rata adalah dua pertiga arus DC link karena setiap fasa hanya aktif selama 120 derajat bukan 180 derajat. Dengan membandingkan kedua I_{rms} dari masing – masing metode didapatkan:

$$I_{rms}(\sin) = 0.906 I_{rms}(\text{sixstep}) \quad (2.5)$$

Berdasarkan persamaan (2.5) dapat dilihat bahwa arus rms dengan menggunakan PWM sinusoidal lebih kecil dibandingkan dengan PWM six-step sehingga rugi – rugi daya yang ditimbulkan lebih kecil.

Pada pengendali six-step, ketika suara “bising” akan timbul ketika motor berputar. Hal ini terjadi karena adanya harmonik pada frekuensi ganjil pada gelombang *square* atau *trapezoid* yang terbentuk. Selain itu dengan adanya harmonik timbul pula *ripple* pada torsi motor [1]. Berdasarkan penurunan *fourier series* dari gelombang *square*:

$$X_{square}(t) = \frac{2A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin((2k-1)2\pi ft)}{(2k-1)} \quad (2.6)$$

$$X_{square}(t) = \frac{2A}{\pi} (\sin(2\pi ft) + \frac{1}{3}\sin(6\pi ft) + \dots)$$

Berdasarkan persamaan 2.6 dapat dilihat bahwa gelombang harmonik timbul pada saat frekuensi ganjil.

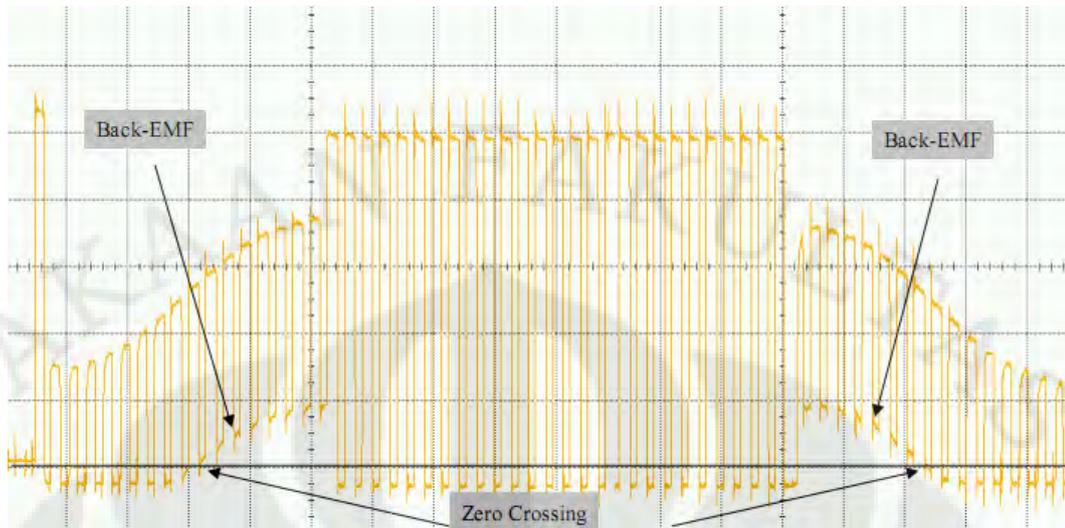
2.3 Metode Pendeteksian Perubahan Komutasi

Agar BLDC dapat dikendalikan dengan baik (kecepatan dan torsi konstan), diperlukan adanya *timing* perubahan komutasi yang tepat. Apabila *timing* perubahan komutasi tidak tepat, motor BLDC akan mengalami *slip*. Akibat adanya *slip* adalah kecepatan dan torsi motor 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 dua metode

yang digunakan yakni metode *sensorless* dan dengan menggunakan sensor. Metode *sensorless* dilakukan dengan cara mendeteksi BEMF dan *zero crossing* pada fasa motor yang mengalami kondisi *floating* (hanya terdapat pada metode *six-step*), sedangkan metode dengan menggunakan sensor adalah dengan menggunakan *encoder* dan sensor *hall*. Kedua metode ini memiliki kelebihan dan kelemahan. Pada metode *sensorless*, metode ini tidak dapat digunakan pada kecepatan yang rendah. Hal ini terjadi karena tenggangan 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*. Kelebihan dari metode ini adalah spesifikasi motor secara fisik tidak diperlukan dan cenderung lebih murah karena tidak menggunakan alat tambahan (sensor tambahan). Sedangkan penggunaan sensor memiliki kelebihan yakni motor dapat berputar pada kecepatan yang rendah dan dapat digunakan pada kedua metode pengendalian yang ada. Kelemahan dari penggunaan sensor adalah fisik motor diperlukan dalam menentukan posisi sensor dan cenderung lebih mahal.

2.3.1 Back EMF dan Zero Crossing

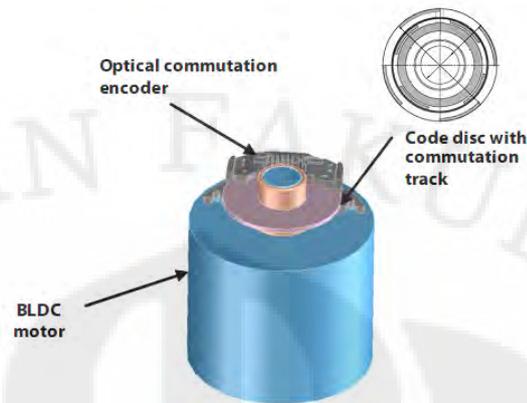
Pendeteksian dengan menggunakan Back EMF (BEMF) dan Zero Crossing dapat disebut dengan pendeteksian *sensorless* karena pendeteksian ini dilakukan dengan cara mendeteksi tegangan yang timbul akibat induksi magnet rotor pada salah satu kumparan stator yang mengalami kondisi *floating*. Kondisi *floating* merupakan kondisi di mana suatu fasa tidak terdapat arus yang mengalir (tidak aktif) dan terjadi tiap 60 derajat.



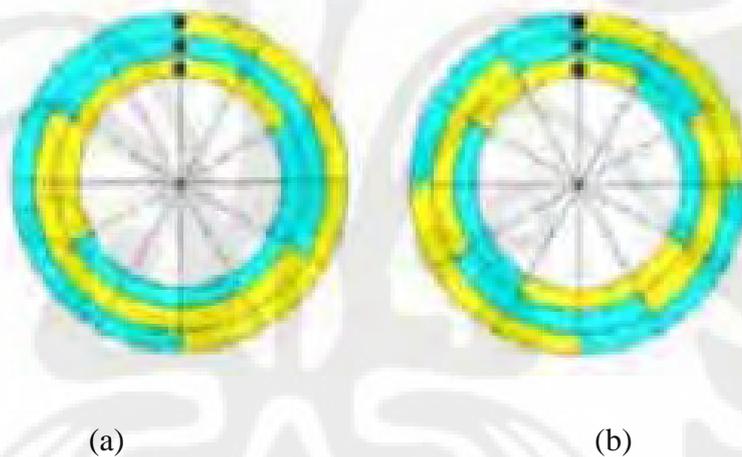
Gambar 2.11 BEMF dan Zero Crossing pada Fasa Floating

2.3.2 Encoder

Encoder sering dijumpai pada implementasi motor komersial. Hal ini terjadi karena *encoder* mampu memberikan *timing* komutasi yang lebih tepat dibandingkan dengan sensor *hall* dan lebih mudah diimplementasikan. Hanya saja *encoder* memiliki kelemahan yakni suatu *encoder* tidak dapat digunakan untuk motor dengan jumlah *pole* yang berbeda dan letak suatu kode komutasi pada *encoder* harus dipresisikan dengan letak *pole* motor. Hal ini terjadi karena kode komutasi suatu *encoder* hanya dikondisikan untuk satu jenis motor dengan jumlah *pole* tertentu dan apabila letak dari kode komutasi *encoder* tidak sesuai dengan *pole* motor, akan terjadi kesalahan dalam penentuan *timing* komutasi. Untuk menentukan *timing* perubahan komutasi dengan *encoder* dapat dilakukan dengan cara membaca kode komutasi pada *disk code* dengan menggunakan sensor optik.



Gambar 2.12 BLDC Motor Dengan Encoder



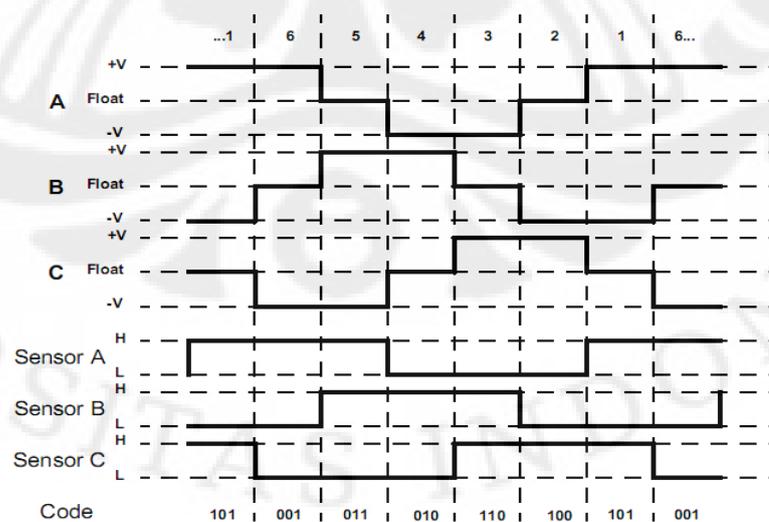
Gambar 2.13 Encoder untuk (a) Motor 2 Pole dan (b) Motor 4 Pole

2.3.3 Sensor Hall

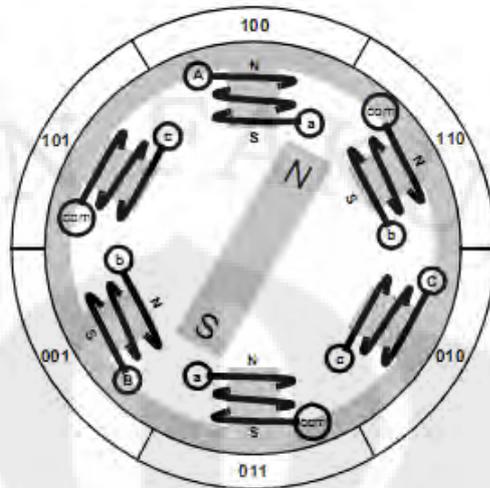
Salah satu cara untuk menentukan *timing* perubahan komutasi yang tepat adalah dengan menggunakan 3 buah sensor *hall*. Pada umumnya ketiga sensor *hall* terpisah 120 derajat satu dengan lainnya walaupun pada kondisi khusus tidak. Kondisi khusus adalah pada motor BLDC yang memiliki *pole* dalam jumlah

banyak (di atas 6 pole). Kelebihan dari penggunaan sensor *hall* ini adalah peletakan dari sensor *hall* awal tidak perlu terlalu presisi dengan rotor selain itu untuk motor dengan *pole* yang berbeda cukup dengan menggeser letak dari sensor *hall*. Kelemahan dari sensor *hall* adalah apabila letak sensor *hall* tidak tepat satu dengan lainnya, misalkan pada motor 2 pole tidak benar – benar 120 derajat satu dengan lainnya, kesalahan dalam penentuan *timing* perubahan komutasi dapat terjadi, bahkan ada kemungkinan tidak didapatkannya 6 kombinasi yang berbeda. Apabila posisi salah satu atau ketiga sensor *hall* tidak berbeda terlalu jauh dengan letak sensor *hall* yang seharusnya, misalkan seharusnya 120 derajat, posisi dalam implementasi 118 derajat, perbedaan itu dapat dikompensasi dalam algoritma pengendalian atau bahkan dapat diabaikan.

Dengan menggunakan tiga sensor *hall* akan didapatkan 6 kombinasi yang berbeda. Keenam kombinasi ini menunjukkan *timing* perubahan komutasi. Ketika dari ketiga sensor *hall* didapatkan kombinasi tertentu, sinyal PWM pada suatu *step* harus diubah sesuai dengan kombinasi yang didapatkan.



Gambar 2.14 Sensor Hall dan Perubahan Sinyal PWM



Gambar 2.15 Kombinasi Nilai Sensor Hall pada Motor 2 Pole

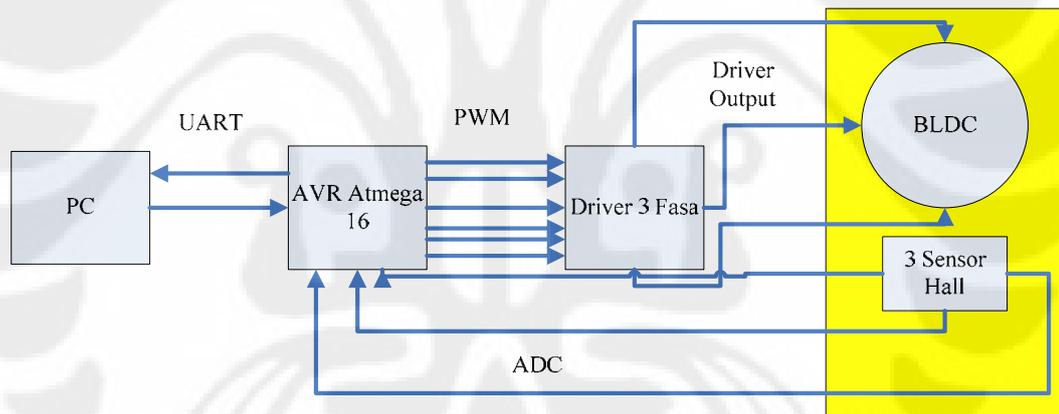
Berdasarkan gambar (2.14) dan (2.15) ketika hall sensor menunjukkan kombinasi tertentu maka sinyal PWM akan berubah mengikuti kombinasi yang telah ditentukan, misalkan kombinasi sensor hall menunjukkan 101, maka PWM A dan B akan menyala sedangkan C akan *floating*, kombinasi 001, PWM A dan C menyala sedangkan B *floating*, dan seterusnya. Kondisi *floating* hanya terdapat pada metode PWM *six-step*, sedangkan pada metode PWM sinusoidal, kondisi *floating* merupakan suatu kondisi di mana sinyal sinusoidal berubah dari positif ke negatif atau sebaliknya melewati nilai 0.

BAB III

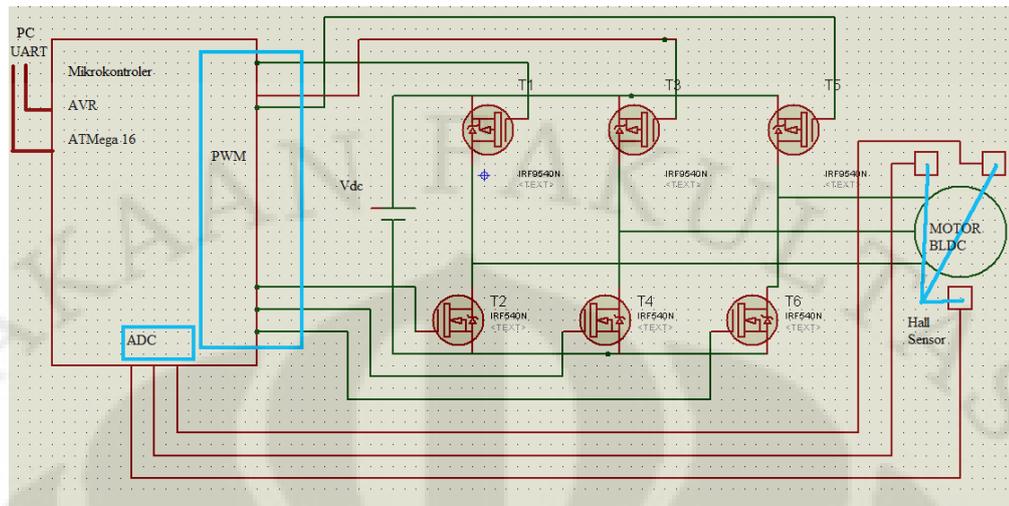
PERANCANGAN SISTEM

3.1 Desain Perangkat Keras

Perangkat keras yang digunakan dalam sistem pengendalian BLDC dengan metode sinusoidal terdiri dari mikrokontroler atmega16, sebuah *driver* 3 fasa, motor BLDC 12 pole-delta, dan 3 sensor hall. Berikut gambaran sistem secara lengkap:



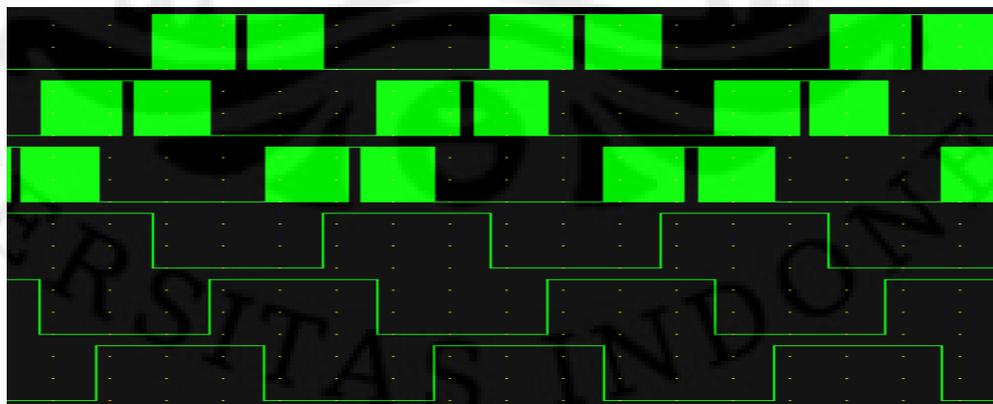
Gambar 3.1 Sistem Pengendali Secara Umum



Gambar 3.2 Desain Perangkat Keras

3.1.1 Mikrokontroler ATMega 16

Mikrokontroler ATMega16 berfungsi untuk mengendalikan motor dengan menghasilkan sinyal PWM sinusoidal menuju *gate* transistor T2, T4, dan T6, sinyal *square* untuk transistor T1, T3, dan T5, dan mengubah komutasi motor BLDC berdasarkan kombinasi dari keluaran tiga sensor hall yang dibaca dengan ADC. PWM hanya dikenakan pada sebagian transistor karena keterbatasan mikrokontroler yang hanya memiliki 3 port PWM *synchronous*.



Gambar 3.3 Sinyal PWM yang Digunakan (Dalam Simulator)

Selain itu mikrokontroler juga berfungsi mendapatkan data kecepatan motor dan menampilkan kepada *user* melalui komunikasi UART. Data kecepatan motor didapatkan melalui dengan mendeteksi perubahan medan magnet rotor yang ditangkap sensor *hall*. Tiap perubahan medan magnet yang dideteksi akan selalu dijumlahkan dan hasilnya ditampilkan kepada *user*. Karena motor terdiri dari 12 *pole*, setiap satu putaran mekanik terdapat 12 perubahan medan magnet pada tiap – tiap sensor *hall*. Sehingga untuk satu putaran mekanik terdapat 36 perubahan medan magnet yang didapatkan ketiga sensor. Oleh karena itu:

$$mechround(t) = \frac{\sum medanmagnet(t)}{36} \quad (3.1)$$

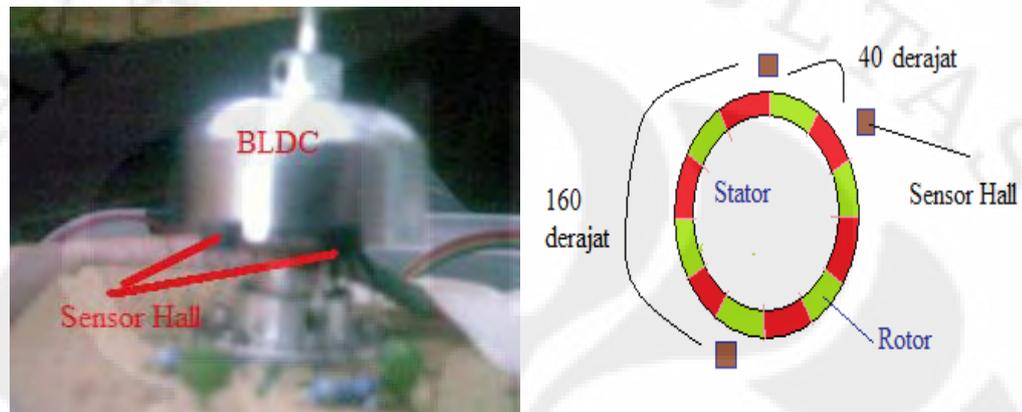
3.1.2 Sensor Hall

Sensor *hall* berfungsi untuk menentukan *timing* perubahan komutasi dan mengukur kecepatan dari motor. Untuk mendapatkan 6 kombinasi keluaran sensor hall seperti pada gambar 2.7, sensor hall harus dipisahkan masing – masing sebesar 20 derajat. Hal ini terjadi karena motor BLDC yang digunakan memiliki 12 pole. Dengan menggunakan rumus [2]:

$$LetakSensor = \frac{120}{jmlpasanganpole} \quad (3.2)$$

Maka didapatkan letak sensor satu dengan lainnya sebesar 20 derajat dan 40 derajat. Karena dimensi dari sensor hall itu sendiri, salah satu sensor hall yang berbeda 20 derajat dipindahkan 180 derajat menjadi 200 derajat.

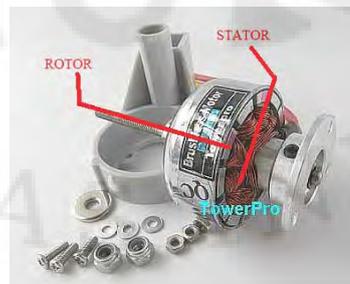
Pada implementasi perangkat keras pada skripsi ini, sensor hall dapat diletakkan di luar motor. Hal ini terjadi karena motor BLDC yang digunakan pada skripsi ini memiliki rotor di luar kumparan stator.



Gambar 3.4 Konstruksi Sensor Hall Dan Motor

3.1.3 Motor BLDC

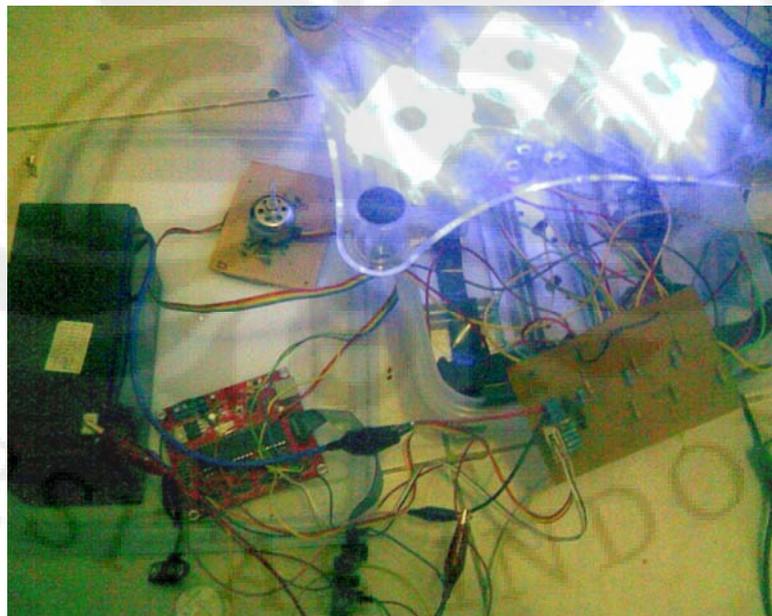
Motor BLDC yang digunakan adalah motor BLDC merek Tower PRO 2408-21T-3 Δ . Motor ini memiliki 12 *pole* dengan kumparan stator 3 fasa berbentuk delta. Motor BLDC ini memiliki konstruksi rotor di luar kumparan stator. Konstruksi ini memudahkan dalam peletakan sensor *Hall* karena motor tidak perlu dibongkar namun hanya perlu diletakkan di sekeliling rotor.



Gambar 3.5 Motor BLDC Tower Pro 2408-21T-3 Δ

3.1.4 Driver 3 Fasa

Drive 3 fasa pada skripsi ini terbuat dari 3 pasangan transistor NPN dan PNP. Transistor yang digunakan adalah transistor tipe IRF 9540 N dan IRF 540 N. Transistor IRF 9540 N merupakan transistor tipe PNP yang mampu bekerja hingga 23 A, sedangkan IRF 540 N mampu bekerja hingga 33 A. Karena spesifikasi IRF 540 N lebih tinggi, pada skripsi ini, transistor IRF 540 N dikenakan sinyal PWM sinusoidal (*modulated PWM*) sedangkan pada IRF 9540 N dikenakan sinyal *square (non-modulated)*. Akibat pemakaian *modulated PWM* pada suatu transistor akan meningkatkan *stress* pada transistor yang digunakan [3]. Hal ini diakibatkan karena adanya *switching loss* pada transistor yang dikenakan *modulated PWM* dan *switching loss* inilah yang membuat transistor menjadi panas [1].

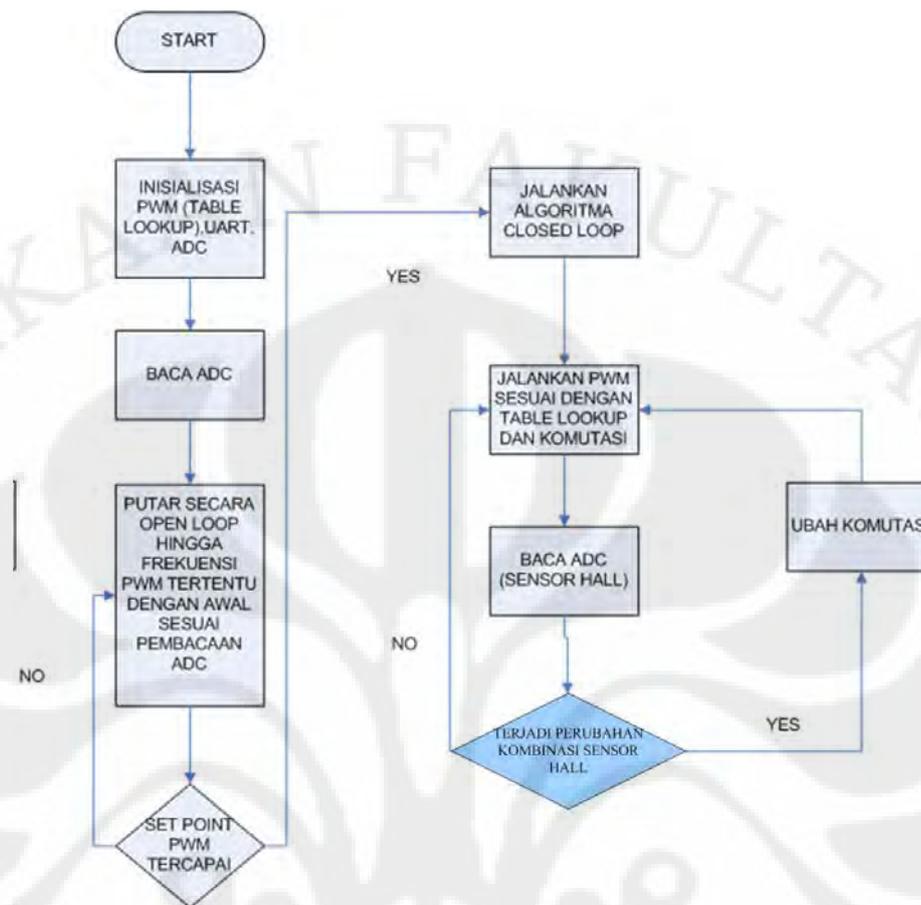


Gambar 3.6 Implementasi Perangkat Keras

3.2 Algoritma Pengendalian

Algoritma pendendali dan fungsi – fungsi komunikasi diimplementasikan ke dalam mikrokontroler dengan menggunakan fungsi – fungsi interrupt. Implementasi dari perangkat lunak tersebut adalah sebagai berikut:

1. Inisialisasi modul komunikasi, ADC, PWM, dan port I/O
2. Baca sensor hall dan putar motor secara *open loop* dengan PWM awal yang sesuai dengan kombinasi sensor hall. Pada kondisi *open loop* tetap terjadi pembacaan sensor hall dan frekuensi PWM terus bertambah hingga yang di-*set*.
3. Setelah motor berputar beberapa saat, jalankan algoritma *closed-loop*:
 - a. Baca sensor hall menggunakan ADC.
 - b. Apabila terjadi perubahan kombinasi sensor hall yang dibaca oleh ADC ubah *step* komutasi dan jalankan PWM sesuai dengan *step* komutasi baru dan *table lookup*.
 - c. Berikan *output* berupa kecepatan motor kepada *user* setiap 15 detik.
 - d. Apabila motor slip, matikan seluruh proses. Untuk mengulang kembali diperlukan hard reset dari *user*.



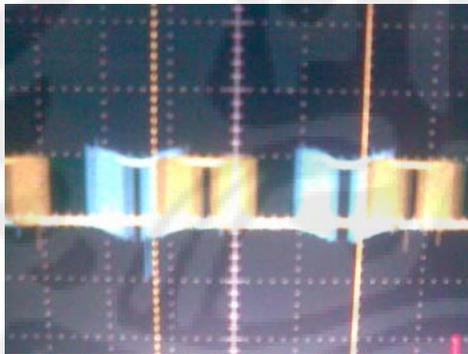
Gambar 3.7 Flowchart dari Algoritma Pengendali

BAB IV

ANALISA

4.1 Implementasi Algoritma

PWM sinusoidal yang digunakan untuk mengendalikan motor BLDC bertujuan untuk membentuk gelombang sinusoidal AC sebagai masukan motor BLDC. Sempurna tidaknya gelombang sinusoidal yang dihasilkan sangat bergantung pada resolusi *table lookup* yang digunakan. Akibat terbatasnya PWM port pada mikrokontroler AVR ATmega16, hanya transistor IRF 540 saja yang menggunakan PWM sinusoidal sedangkan transistor IRF 9540 menggunakan sinyal kotak biasa. Berikut implementasi algoritma tersebut:



(a)



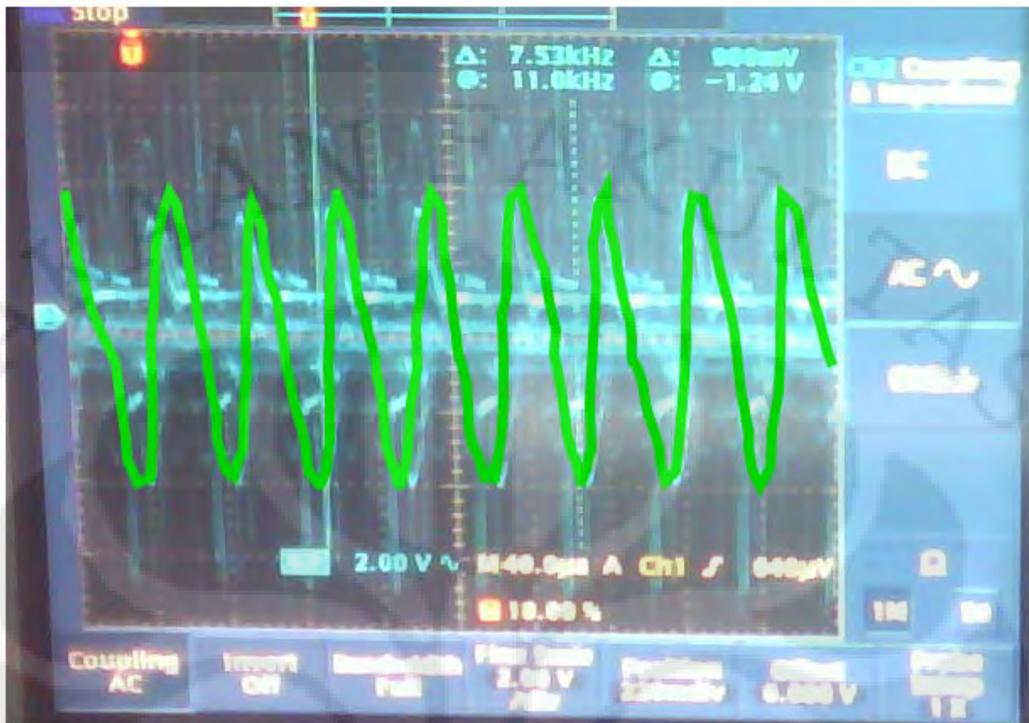
(b)

Gambar 4.1 Implementasi Algoritma PWM Sinusoidal (a) PWM sinusoidal
(b) sinyal kotak

Gambar 4.1 menunjukkan implementasi sinyal PWM sinusoidal dan sinyal kotak yang digunakan dalam mengendalikan motor BLDC pada 2 fasa. Terlihat berdasarkan gambar 4.1 bahwa PWM yang dihasilkan sesuai dengan simulasi. Sinyal PWM tersebut kemudian digunakan untuk mengatur timing switching dari transistor yang digunakan untuk mendapatkan gelombang sinusoidal. Berikut adalah gelombang sinusoidal yang terbentuk:



Gambar 4.2 Gelombang Sinusoidal Antar Fasa



Gambar 4.3 Hasil *Tracing* Gelombang Sinusoidal

Berdasarkan gambar 4.2 dan 4.3, gelombang sinusoidal yang terbentuk mendekati sempurna. Ketidaktepatan yang tercipta pada sinyal sinusoidal terjadi karena resolusi yang digunakan untuk membentuk PWM sinusoidal tidak terlalu tinggi. Berdasarkan gambar 4.2 dan 4.3, dapat dibuktikan bahwa PWM yang digunakan berhasil membentuk gelombang sinusoidal yang digunakan untuk input motor.

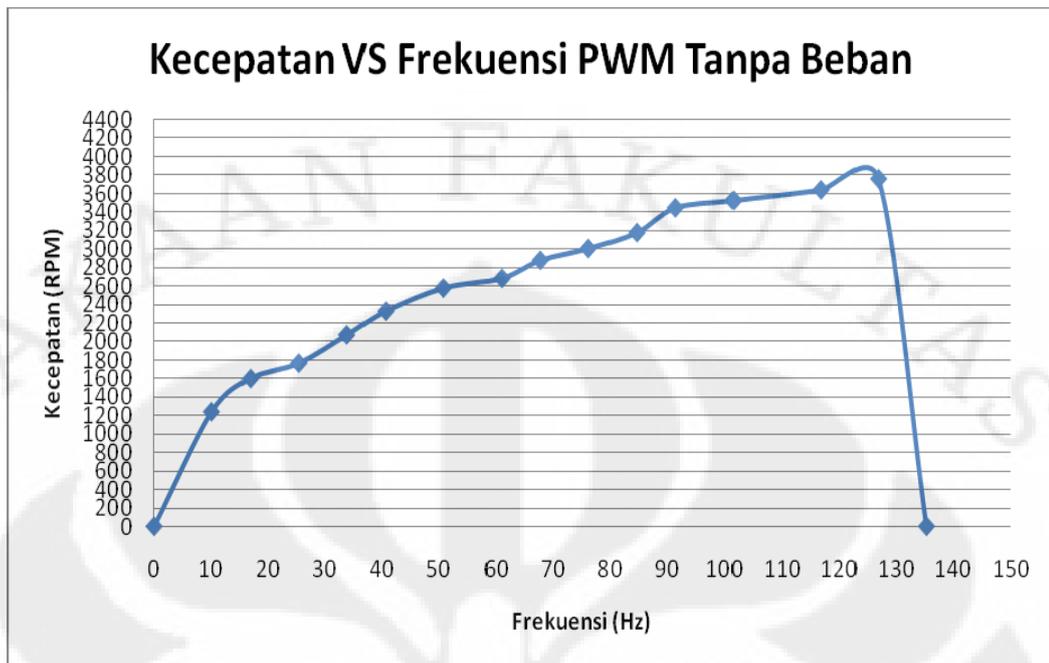
4.2 Analisa Data

4.2.1 Analisa Data Kecepatan Dengan Frekuensi Pada Kondisi Tanpa Beban dan Dengan Beban yang Berupa Baling – Baling

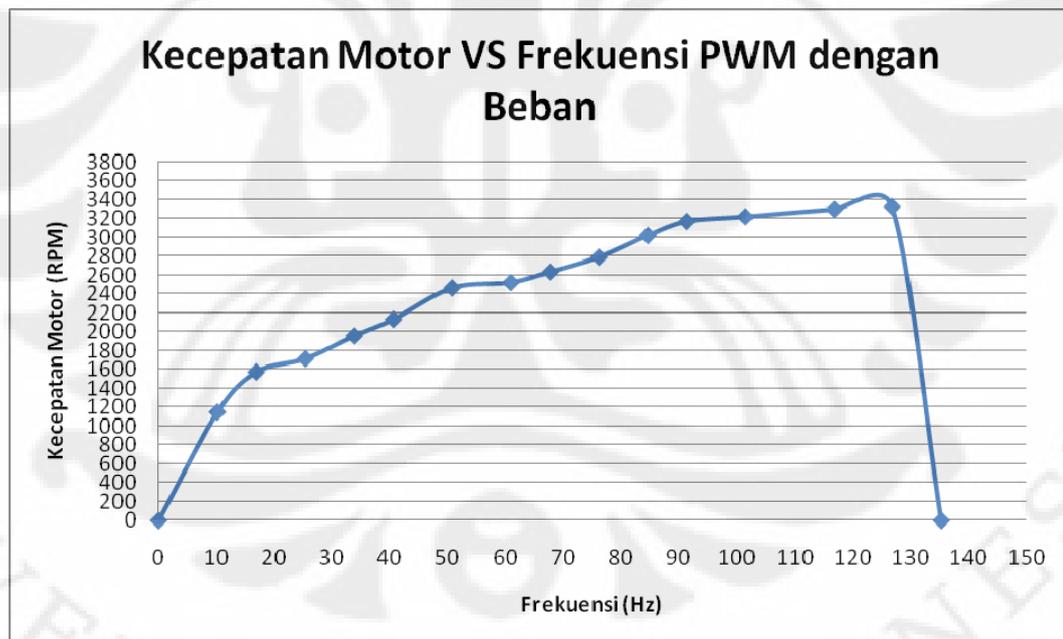
Pengambilan data berupa kecepatan diambil setiap 15 detik. Hasil yang diberikan tiap 15 detik merupakan banyak putaran elektrik. Oleh karena itu data diolah dengan rumus:

$$\begin{aligned}
 tbh &= \frac{15}{bykputaramekanik * 36} * 6 \\
 ehz &= \frac{1}{tbh} \\
 mhz &= \frac{ehz}{6} \\
 rpm &= mhz * 60
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Di mana *tbh* merupakan periode elektrik, *ehz* merupakan frekuensi elektrik, *mhz* merupakan frekuensi mekanik, dan *rpm* merupakan kecepatan motor. Agar tidak membebani kinerja dari mikrokontroler, pengolahan data dilakukan secara *offline* dengan menggunakan *microsoft excel*. Data kecepatan motor diambil dengan dua perlakuan yakni pada kondisi tanpa beban dan kondisi dengan beban. Beban yang digunakan adalah berupa sebuah baling – baling.



(a)



(b)

Gambar 4.4 Kecepatan Motor VS Frekuensi PWM (a) tanpa beban (b) dengan beban

Berdasarkan gambar 4.4 yang merupakan hasil pengamatan, kecepatan motor, baik dengan beban maupun tanpa beban, cenderung meningkat seiring dengan peningkatan frekuensi PWM. Hal ini menunjukkan semakin tinggi frekuensi PWM yang digunakan untuk membangkitkan gelombang sinusoidal, semakin tinggi pula kecepatan medan magnet putar stator. Karena kecepatan medan magnet putar stator semakin tinggi, kecepatan perputaran rotor pun akan mengikuti peningkatan kecepatan medan magnet putar stator.

Berdasarkan hasil pengamatan (gambar 4.4) pada kondisi motor dengan beban maupun tanpa beban, terdapat penurunan kecepatan pada frekuensi di atas 120 Hz bahkan pada frekuensi 135 Hz, motor cenderung berhenti. Hal ini terjadi karena pada kondisi ini motor mengalami *slip*. Kondisi *slip* ini terjadi karena perubahan komutasi yang terlambat atau terdapat perubahan komutasi yang tidak sesuai dengan kondisi saat itu. Hal ini terjadi karena kecepatan pembacaan sensor *hall* oleh ADC tidak lagi dapat mengikuti kecepatan perubahan medan magnet pada rotor yang berarti kecepatan pembacaan sensor *hall* di bawah kecepatan medan magnet putar stator. Akibat yang ditimbulkan adalah *timing* tiap komutasi menjadi terlambat atau tidak sesuai sehingga pada akhirnya terjadi *slip*. Pada frekuensi 135 hz, motor berhenti karena selain akibat adanya *slip* yang makin besar seiring dengan peningkatan frekuensi PWM sinusoidal.

Berdasarkan pengamatan (gambar 4.4), kecepatan motor tanpa beban cenderung lebih besar dibandingkan dengan beban. Hal ini terjadi karena beban, yang berupa baling – baling, cenderung menghambat motor. Selain itu torsi yang harus dibangkitkan oleh motor saat terbebani cenderung lebih besar dibandingkan saat tidak terbebani. Karena torsi berbanding terbalik dengan kecepatan motor,

kecepatan yang dihasilkan oleh motor saat diberi beban lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan motor saat tanpa diberi beban. Walaupun demikian, penambahan beban pada motor BLDC tidak menyebabkan terjadinya perubahan daerah frekuensi kerja antara saat motor diberi beban maupun tanpa beban yakni antara 20 Hz sampai dengan 120 Hz. Dengan menggunakan metode *least-square* dan linearisasi pada daerah frekuensi kerja didapatkan:

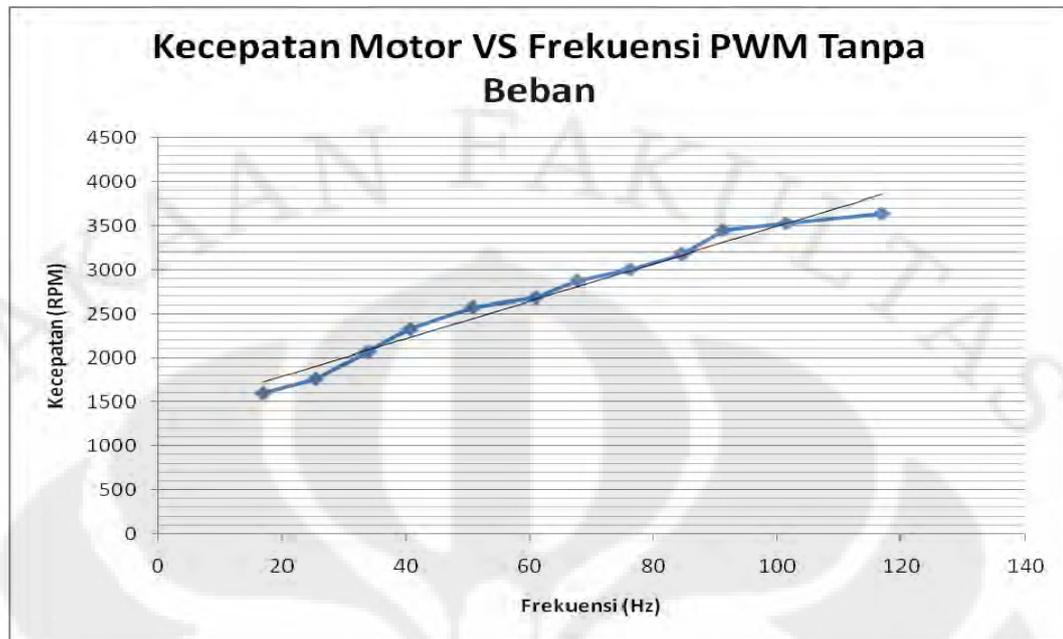
a. Tanpa beban

$$w(rpm) = 21,35 f_{pwm} + 1359 \quad (4.2)$$

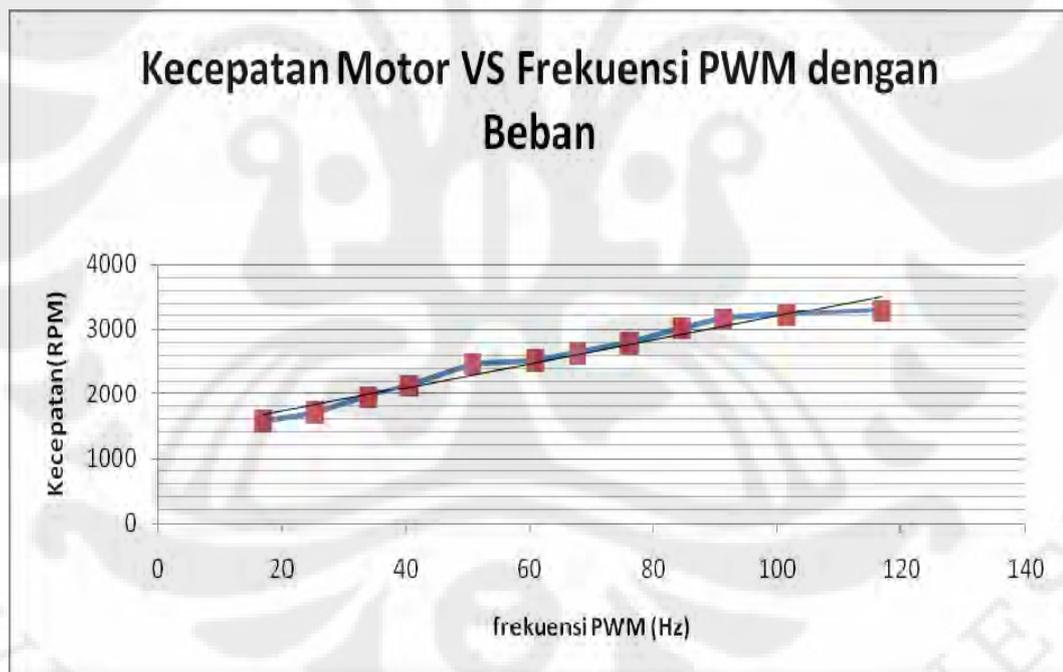
b. Dengan menggunakan beban

$$w(rpm) = 18,51 f_{pwm} + 1358 \quad (4.3)$$

Berdasarkan hasil linearisasi dapat dilihat bahwa penambahan beban pada motor BLDC hanya mengurangi *gain* yakni pada kondisi tanpa beban 21,35 sedangkan kondisi dengan menggunakan beban 18,51. Persamaan hasil linearisasi 4.2 dan 4.3 dapat digunakan untuk menentukan kecepatan motor berdasarkan frekuensi PWM yang digunakan dengan kesalahan rata – rata 7 %.



(a)



(b)

Gambar 4.5 Hasil Linearisasi Pada Daerah Frekuensi Kerja Motor (a) Tanpa Beban (b) Dengan Beban

Tabel 4.1 Data Kecepatan Percobaan Frekuensi Kerja Dengan Beban

Dibandingkan dengan Kecepatan yang Didapat Dari Rumus Linearisasi

frekuensi(hz)	Kecepatan linearisasi (rpm)	Kecepatan data 1 (rpm)	Kecepatan data 2 (rpm)	Kecepatan data 3 (rpm)	Kecepatan data 4 (rpm)	error rata – rata %
25,38071066	1827,796954	1720	1720	1704	1712	6,225908
33,84094755	1984,395939	1968	1968	1936	1952	1,430961
40,60913706	2109,675127	2112	2128	2144	2144	-1,05821
50,76142132	2297,593909	2456	2456	2464	2480	-7,24262
60,91369322	2485,512461	2520	2528	2528	2512	-1,46801
67,68189509	2610,791878	2616	2632	2640	2648	-0,88893
76,14215131	2767,391221	2768	2792	2792	2808	-0,81697
84,60236887	2923,989848	3032	3008	3024	3016	-3,28353
91,37059548	3049,269722	3160	3208	3168	3144	-3,95932
101,5228426	3237,187817	3224	3216	3216	3224	0,530949
116,9199953	3522,189112	3320	3288	3288	3288	6,421833

Tabel 4.2 Data Kecepatan Percobaan Frekuensi Kerja Tanpa Beban

Dibandingkan dengan Kecepatan yang Didapat Dari Rumus Linearisasi

frekuensi(hz)	Kecepatan linearisasi (rpm)	Kecepatan data 1 (rpm)	Kecepatan data 2 (rpm)	Kecepatan data 3 (rpm)	Kecepatan data 4 (rpm)	error rata – rata %
25,38071066	1900,878173	1776	1736	1784	1760	7,200786171
33,84094755	2081,50423	2072	2056	2072	2080	0,552688289
40,60913706	2226,005076	2256	2352	2368	2328	-4,4921247
50,76142132	2442,756345	2568	2592	2560	2584	-5,454643689
60,91369322	2659,50735	2696	2672	2672	2688	-0,845744978
67,68189509	2804,00846	2896	2848	2880	2880	-2,567450876
76,14215131	2984,63493	2992	3000	3016	3008	-0,648825404
84,60236887	3165,260575	3184	3184	3176	3160	-0,339290382
91,37059548	3309,762214	3432	3440	3456	3448	-4,055813615
101,5228426	3526,51269	3536	3520	3512	3528	0,07125142
116,9199953	3855,241899	3608	3640	3640	3664	5,634974529

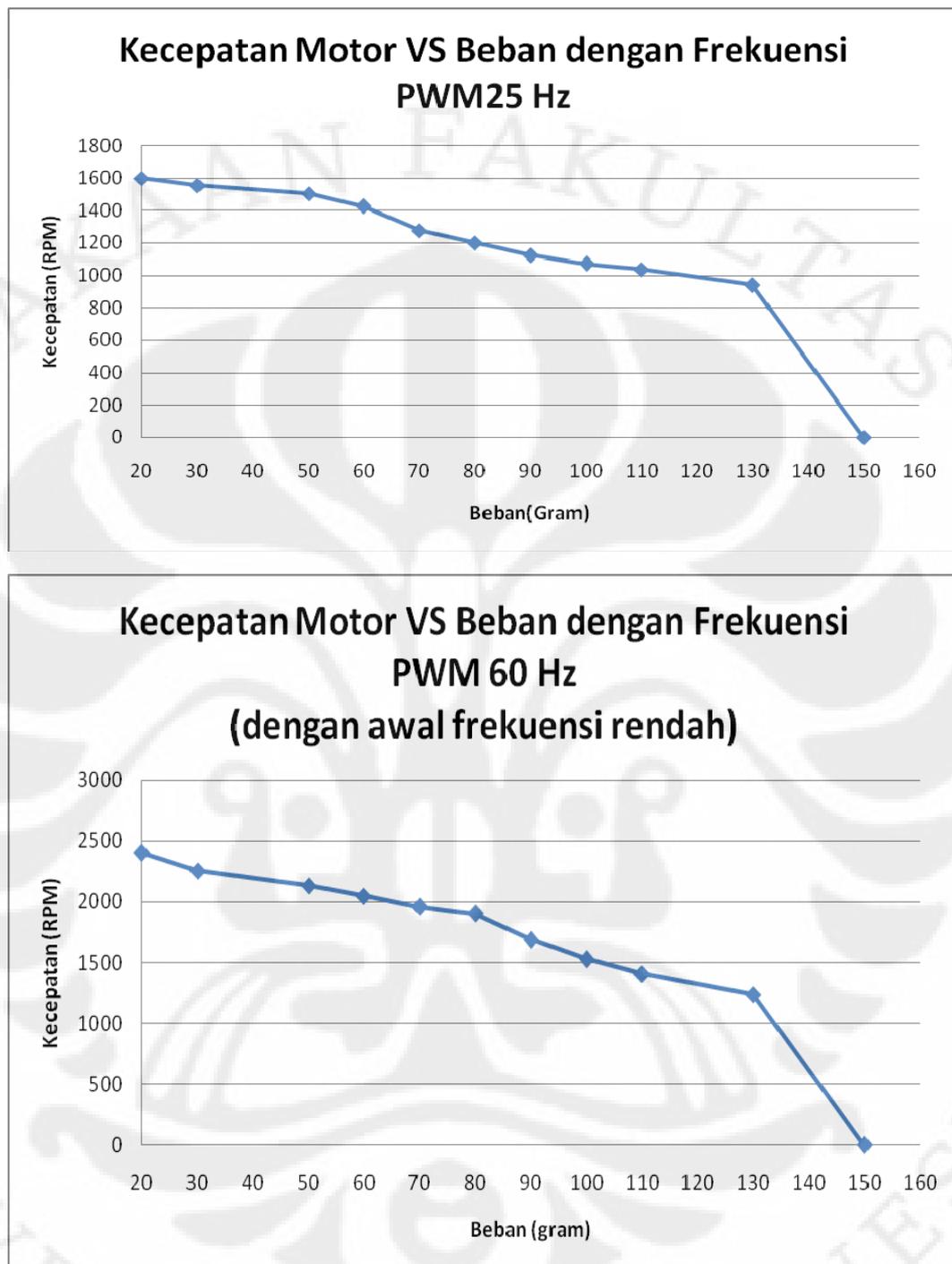
4.2.2 Analisa Data Kecepatan dengan Berbagai Beban pada Dua frekuensi yang Berbeda

Beban yang digunakan dalam pengambilan data adalah berupa lilin mainan dengan berat tertentu. Percobaan dilakukan dalam dua frekuensi kerja yakni frekuensi 20 Hz dan frekuensi 60 Hz.

Pada percobaan dengan frekuensi 20 Hz, ketika diberi beban, motor dapat langsung berputar. Namun kondisi ini tidak terjadi untuk semua beban. Pada saat beban mencapai 110 gram hingga di bawah 150 gram, motor tidak dapat langsung berputar melainkan perlu gaya dari luar untuk membuat motor dapat berputar, sedangkan pada beban 150 gram, motor tidak dapat berputar sama sekali walaupun sudah diberikan gaya dari luar untuk memaksa motor berputar. Berdasarkan percobaan pada frekuensi, beban maksimum yang dapat diberikan motor agar dapat berputar tanpa bantuan gaya dari luar adalah 100 gram, sedangkan beban maksimum yang membuat motor tidak dapat berputar sama sekali adalah 150 gram.

Pada percobaan dengan frekuensi 60 Hz, terdapat dua perlakuan yang digunakan, yakni percobaan pertama dilakukan dengan langsung mengeset motor agar bekerja secara langsung pada frekuensi 60 hz, dan percobaan kedua dilakukan dengan cara menaikkan frekuensi dari frekuensi rendah (25 Hz) hingga frekuensi 60 Hz. Pada percobaan pertama, motor hanya dapat berputar hingga beban 50 gram tanpa diberi gaya dari luar, sedangkan pada beban di atas 50 gram motor tidak dapat berputar walaupun sudah diberi gaya dari luar. Selain itu kecepatan motor yang didapatkan pada percobaan pertama hanya mencapai 1000 rpm pada beban 20 gram. Sedangkan pada percobaan kedua, yakni frekuensi

motor dinaikkan dari frekuensi 25 Hz hingga 60 Hz, didapatkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan percobaan pertama yang langsung mengeset frekuensi 60 Hz pada motor. Pada percobaan kedua didapatkan hasil yang sama seperti pada percobaan dengan frekuensi 25 Hz. Hal ini terjadi karena motor menggunakan frekuensi 25 Hz sebagai frekuensi awal. Pada percobaan kedua ini diperoleh adanya peningkatan kecepatan ketika frekuensi dinaikkan. Hal ini berarti walaupun beban diberikan kepada motor, kecepatan motor dapat dinaikkan dengan menaikkan frekuensi PWM dari frekuensi PWM 25 Hz. Selain itu berdasarkan percobaan pertama dan kedua pada frekuensi PWM 60 Hz dapat ditarik kesimpulan bahwa frekuensi rendah memiliki torsi awal yang jauh lebih tinggi dibandingkan pada saat motor diberikan PWM dengan frekuensi tinggi.



Gambar 4.6 Grafik Kecepatan Motor dengan Beban
Pada Frekuensi PWM 25 Hz dan 60 Hz

BAB V

KESIMPULAN

1. Motor BLDC dapat dikendalikan dengan menggunakan metode sinusoidal.
2. PWM sinusoidal yang digunakan terbukti mampu membentuk gelombang sinusoidal sebagai masukan ke motor.
3. Kecepatan motor BLDC berbanding lurus dengan frekuensi PWM yang digunakan.
4. Pengendali BLDC dengan metode sinusoidal mampu meningkatkan kecepatan motor secara linear dengan frekuensi kerja 20 Hz - 120 Hz baik pada kondisi tanpa beban maupun kondisi dengan beban.
5. Daerah frekuensi kerja pada motor dalam kondisi tanpa beban maupun dalam kondisi dengan beban adalah sama. Yang terpengaruh dengan adanya beban adalah *gain*.
6. Motor BLDC memiliki torsi awal yang lebih tinggi pada frekuensi PWM rendah (25 Hz) dibandingkan dengan frekuensi tinggi (60 Hz).
7. Beban maksimum yang dapat diberikan pada motor tanpa mengganggu kinerja dari motor adalah 100 gram.

DAFTAR ACUAN

- [1] ST Microelectronics. 2006. *Low Cost Sinusoidal Control of BLDC Motors with Hall Sensors Using ST7FMC*.
- [2] Mavilor Infranor Group Company. November 2004. *Geometry on Hall Sensor*.
- [3] Jani, Yashvant. *Implementing Embedded Speed Control for Brushless DC Motor*. San Jose: Renesas Technology America, Inc.

DAFTAR REFERENSI

ATMEL. *ATmega16/ATmega16L datasheet: 8-bit Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash.*

Berringer, Ken, Bill Lucas, Leos Chalupa, dan Libor Prokop. *Sensorless Brushless dc Motor Using the MC68HC908MR32 Embedded Motion Control Development System.* Texas: Freescale.

Brown, Ward. *Brushless DC Motor Control Made Easy.* Microchip Technology Inc.

Jani, Yashvant. *Implementing Embedded Speed Control for Brushless DC Motor.* San Jose: Renesas Technology America, Inc.

M.S. Kennedy Corp. *Three Phase Bridge Mosfet Power Module.* New York: M.S. Kennedy Corp.

Mavilor Infranor Group Company. November 2004. *Geometry on Hall Sensor.*

Palaniappan, Sithambaram. 6 Juni 2007. *Commutation of a BLDC Motor with Various Pole-Pairs Can be Simplified By Using Absolute Encoder Feedback.*

Salam, Zainal, dan Khosru Mohammad Salim. Juni 2001. *Generation of Pulse Width Modulation (PWM) Signals For Three-Phase Inverter Using A Single-Chip Microcontroller.* Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia.

Shao, Jianwen. September 2003. *Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives.* Virginia: Virgini Polytechnic Instiute and the State University

ST Microelectronics. 2006. *Low Cost Sinusoidal Control of BLDC Motors with Hall Sensors Using ST7FMC.*



LAMPIRAN

Spesifikasi Motor BLDC Tower Pro 2408-21T-3△

Spesifikasi Motor yang digunakan:

Spesifikasi	Nilai
Tegangan	10 V
KV	1400 rpm/V
Arus Maximum (no-load)	13,8A
Kecepatan Maksimum (<i>rated</i>)	8200 RPM
Arus Maximum (load)	16,2 A
Daya Maksimum	113,4 A