



**DESAIN SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR BLDC BERBASIS  
*PROGRAMMABLE ARRAY LOGIC* DENGAN METODE *SIX STEP*  
*COMMUTATION***

**SKRIPSI**

Oleh

**Mahadian Dewangga  
NIM 101910201002**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2015**



**DESAIN SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR BLDC BERBASIS  
*PROGRAMMABLE ARRAY LOGIC* DENGAN METODE *SIX STEP*  
*COMMUTATION***

**SKRIPSI**

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat  
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)  
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Mahadian Dewangga  
NIM 101910201002**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS JEMBER  
2015**

## PERSEMBAHAN

Dengan naungan rahmat Allah S.W.T. yang telah memberikan segala nikmat serta anugerah-Nya sehingga dapat kupersembahkan skripsi ini kepada :

1. Kedua orang tuaku, Djoko Hartoyo dan Sri Agustin yang selalu memberiku cinta dan kasih sayang yang begitu berarti hingga akhirnya saya dapat memperoleh gelar sarjana teknik (ST).
2. Dosen Pembimbing Bapak Bambang Sujanarko dan Bapak Satryo, terima kasih banyak atas bimbingan, ilmu, dan nasehatnya.
3. Para bapak dan ibu guru mulai dari TK sampai SMA, terima kasih telah memberikan segala ilmunya.
4. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember

**MOTTO**

*“Apabila di dalam diri seseorang masih ada rasa malu dan takut untuk berbuat suatu kebaikan, maka jaminan bagi orang tersebut adalah tidak akan bertemunya ia dengan kemajuan selangkah pun”.*

*(Bung Karno)*

*“Bacalah, dan Tuhanmulah Yang Maha Pemurah. Yang mengajar manusia dengan perantara kalam. Dia mengajarkan kepada manusia apa yang tidak diketahuinya”.*

*(Terjemahan Surat Al-Alaq (96) ayat 3-4).*

**PERNYATAAN**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Mahadian Dewangga

NIM : 101910201002

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya tulis yang berjudul “Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC Berbasis *Programmable Array Logic* Dengan Metode *Six Step Commutation*” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 20 September 2014

Yang menyatakan,

Mahadian Dewangga

NIM. 101910201002

**SKRIPSI**

**DESAIN SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR BLDC BERBASIS  
*PROGRAMMABLE ARRAY LOGIC* DENGAN METODE *SIX STEP  
COMMUTATION***

Oleh

**Mahadian Dewangga  
NIM 101910201002**

Pembimbing

Dosen pembimbing Utama : Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.

Dosen Pembimbing Anggota : Satryo Budi Utomo, S.T.,M.T.

**PENGESAHAN**

Skripsi berjudul “Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC Berbasis *Programmable Array Logic* Dengan Metode *Six Step Commutation*” telah diuji dan disahkan pada :

hari, tanggal : Jumat, 6 Maret 2015

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.  
NIP 19631201 199402 1 002

Satryo Budi Utomo, S.T.,M.T.  
NIP 19850126 200801 1 002

Penguji I,

Penguji II,

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.  
NIP 19700826 199702 1 001

Ir. Widyono Hadi, M.T.  
NIP 19610414 198902 1 001

Mengesahkan  
Dekan Fakultas Teknik,

Ir. Widyono Hadi, M.T.  
NIP 19610414 198902 1 001

## Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor Bldc Berbasis *Programmable Array Logic* dengan Metode *Six Step Commutation*

**Mahadian Dewangga**

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember

### ABSTRAK

Kemajuan teknologi pada sebagian besar peralatan tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Terdapat berbagai jenis motor yang ada saat ini, salah satunya adalah motor Brushless Direct Current (BLDC) yang memiliki banyak kelebihan dibanding jenis motor lainnya. Salah satu kelebihan motor brushless DC yaitu menggunakan komutasi elektrik sehingga memiliki efisiensi yang tinggi dan waktu operasi yang lama. Pada penelitian ini akan dibuat Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor Bldc Berbasis *Programmable Array Logic* dengan Metode *Six Step Commutation*. Sehingga nantinya didapat sinyal tegangan tiga fasa berbentuk trapezoid untuk memutar motor. Verifikasi sistem kendali menggunakan aki 12 V, IC PAL sebagai kontrol logika, IC Op-amp sebagai pembangkit gelombang segitiga untuk pengaturan kecepatan, dan motor BLDC 500 W. Dari hasil pengujian tanpa beban, dapat diketahui saat nilai dutycycle PWM maksimum yaitu 100%, didapat kecepatan maksimum sebesar 116,8 rpm. Sedangkan pada pengujian berbeban semakin kecil nilai pada beban, didapat nilai arus yang meningkat dan tegangan yang turun.

**Kata kunci :** Motor BLDC, *Programmable Array Logic*, *Six Step Commutation*.



*Design of BLDC Motor Speed Control System Based Programmable Logic Array  
with Six Step Commutation Method*

**Mahadian Dewangga**

*Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,  
Universitas Jember*

**ABSTRACT**

*Advances in technology in most of the equipment would not be separated with the use of motors. There are various types of motors available today, one of which is a motor Brushless Direct Current (BLDC) which has many advantages over other types of motors. One of the advantages of brushless DC motors that use electric commutation so that it has a high efficiency and a long operating time. In this research will be made Design BLDC Motor Speed Control System Based Programmable Logic Array with Six Step Commutation method. So later obtained a three-phase voltage signal to rotate the motor trapezoidal shape. Verification of control systems using a 12 V battery, IC PAL as control logic, IC op-amp as a triangular wave generator for setting the speed, and the BLDC motor 1 kW. From the test results, it can be seen when the PWM dutycycle maximum value of 100%, obtained a maximum speed of 116.8 rpm.*

*Keyword : BLDC motor, Programmable Array Logic, Six Step Commutation.*

## RINGKASAN

**Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor Bldc Berbasis *Programmable Array Logic* dengan Metode *Six Step Commutation***; Mahadian Dewangga; 101910201002, 2014; 97 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Kemajuan teknologi pada sebagian besar peralatan tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Terdapat berbagai jenis motor yang ada saat ini, salah satunya adalah motor Brushless Direct Current (BLDC) yang memiliki banyak kelebihan dibanding jenis motor lainnya.

Motor BLDC adalah motor sinkron. Hal ini berarti bahwa medan magnet yang dihasilkan stator dan medan magnet yang dihasilkan rotor berputar pada frekuensi yang sama. Putaran pada rotor disebabkan oleh medan magnet pada stator yang pada setiap saatnya hanya aktif dua fasa (hanya dua fasa yang tersupply pada setiap saat sementara satu fasa lainnya tak tersupply).

Alat yang digunakan dalam komutasi elektrik sebagai pengganti sikat adalah inverter 3 fasa. Sedangkan metode pengendalian *inverter* motor BLDC yakni dengan menggunakan metode *Six-Step*. Gelombang yang dihasilkan dari metode ini berbentuk *square* atau *trapezoid*. Dan agar motor mampu bekerja dengan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan *timing* perubahan komutasi yang tepat dalam pengendalian BLDC dengan metode *six-step*. Oleh karena itu, pada motor BLDC telah terpasang 3 buah sensor *hall* untuk menentukan *timing* perubahan komutasi pada pengendalian BLDC.

Pada penelitian ini dibuat sebuah Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor Bldc Berbasis *Programmable Array Logic* dengan Metode *Six Step Commutation* dengan tujuan mendapatkan kontrol kecepatan motor yang sederhana dan efisien. Oleh karena itu, digunakan metode *Six Step Commutation*. Sehingga diperlukan beberapa perpaduan dari gerbang-gerbang logika yang disusun berdasarkan data logika dari hall sensor yang kemudian disederhanakan menggunakan metode karnaugh map. Beberapa alat dan rangkaian yang digunakan pada penelitian ini

antara lain IC PAL, IC OP-AMP, rangkaian driver mosfet, inverter 3 fasa, motor BLDC 1 kW dan baterai 12 volt.



## PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, yang telah memberikan kemudahan, kesempatan dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Desain Sistem Kontrol Kecepatan Motor BLDC Berbasis *Programmable Array Logic* Dengan Metode *Six Step Commutation*”. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan Program Studi Strata Satu (S1) Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu tersusunnya skripsi ini, khususnya kepada:

1. Bapak Ir. Widyono Hadi, MT. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.
3. Bapak Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Satryo Budi Utomo, S.T.,M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran dan perhatiannya guna memberikan pengarahan dan bimbingan demi terselesaikannya penulisan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. dan Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku Tim Penguji Skripsi yang telah meluangkan waktu dan pikiran serta perhatiannya guna memberikan pengarahan dan koreksi demi terselesaikannya penulisan skripsi ini.
5. Ayahanda Djoko Hartoyo dan Ibunda Sri Agutin tercinta, yang telah membantu baik moril dan materiil, mendoakan, mendidik, dan memberi kasih sayang serta pengorbanan yang tidak terhingga selama ini.

6. Om Heri dan tante Candra, terima kasih banyak atas bantuan selama di jember.
7. Seluruh asisten laboratorium Sistem Kendali terima kasih banyak atas ilmu dari pengalaman kerja yang telah dibagikan kepada saya.
8. Arek-arek “OJAN”, terima kasih
9. Keluarga Besar Teknik Elektro Angkatan 2010, aku bangga menjadi angkatan 2010. Terimakasih atas dukungan dan motivasi yang kalian berikan
10. Mas Nopek, Mas Uyab, mas Zipo, mas Bagas, Takul, Yusqi, Terry, dan yang lainnya, terima kasih banyak sudah meluangkan waktu memberikan pengalamannya.
11. Keluarga besar Elektro UNEJ dari angkatan 2008, 2009, 2011 dan 2012, Team BB Corp, Laboratorium Sistem Kendali, bersama kalian semua merupakan kenangan dan pengalaman yang tak akan pernah terlupakan.
12. Dan rekan-rekan seperjuangan PATEK UJ 2010 yang telah banyak membantu selama saya kuliah disini.

Dalam penyusunan skripsi ini penulis menyadari masih banyak kekurangan, kritik dan saran tetap diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat. Aamiin

Jember, Februari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iii
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	vi
<b>ABSTRAK</b> .....	vii
<b>ABSTRACT</b> .....	viii
<b>RINGKASAN</b> .....	ix
<b>PRAKATA</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR TABEL</b>	
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	
<b>BAB 1. PENDAHULUAN</b> .....	1
<b>1.1 Latar Belakang</b> .....	1
<b>1.2 Rumusan Masalah</b> .....	2
<b>1.3 Tujuan</b> .....	2
<b>1.4 Manfaat</b> .....	2
<b>1.5 Batasan Penelitian</b> .....	3
<b>1.6 Sistematika Penulisan</b> .....	3
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSATAKA</b> .....	4
<b>2.1 Motor Brushless Direct Current (BLDC)</b> .....	4
2.1.1 Motor BLDC .....	4
2.1.2 Prinsip Kerja .....	4
<b>2.2 Inverter 3 fasa</b> .....	6
<b>2.3 Six xtep Commutation</b> .....	9

2.4 Sensor Hall.....	10
2.5 Penyederhanaan dengan Peta Karnaugh .....	12
2.6 Logika pensaklaran motor BLDC.....	13
2.7 Programmable array logic (PAL).....	13
<b>BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>17</b>
3.1 Tempat dan waktu pelaksanaan .....	17
3.2 Diagram Alir Penelitian .....	17
3.3 Blok Diagram Sistem .....	19
3.3.1 Konfigurasi Sistem .....	20
3.3.2 Baterai .....	20
3.3.3 Power Supply .....	20
3.3.4 Rangkaian PAL.....	21
3.3.5 Pemrograman PAL .....	22
3.3.6 Rangkaian Pembangkit PWM.....	24
3.3.7 Rangkaian Driver Mosfet.....	25
3.3.8 Inverter 3 fasa .....	25
3.3.9 Motor BLDC.....	27
<b>BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>28</b>
4.1 Tujuan dan Metode Pengujian .....	28
4.2 Pengujian dan Analisa Rangkaian PWM .....	28
4.3 Analisa Pemrograman PAL .....	32
4.4 Pengujian Rangkaian PAL .....	34
4.5 Pengujian Rangkaian Driver .....	36
4.6 Pengujian dan Analisa Kecepatan Motor Tanpa Beban .....	37
4.7 Pengujian dan Analisa Kecepatan Motor Berbeban .....	41
<b>BAB 5. PENUTUP.....</b>	<b>45</b>
5.1 Kesimpulan.....	45

5.2 Saran .....46

**DAFTAR PUSTAKA**





**DAFTAR TABEL**

	Halaman
Tabel 2.1 Tabel kebenaran sensor hall .....	11
Tabel 2.2 Penyederhanaan menggunakan <i>Peta Karnaugh</i> .....	12
Tabel 2.3 Hubungan hall sensor dengan sistem <i>switching</i> pada inverter.....	13
Tabel 4.1 Bentuk Perubahan Sinyal PWM .....	30
Tabel 4.2 Pengujian tegangan logic input dan output .....	34
Tabel 4.3 Pengujian pada masing-masing driver .....	35
Tabel 4.4 Pengujian pada fasa motor .....	37
Tabel 4.5 Pengujian motor berbeban pada dutycycle 30% .....	40
Tabel 4.5 Pengujian motor berbeban pada dutycycle 60% .....	40
Tabel 4.5 Pengujian motor berbeban pada dutycycle 90% .....	40

**DAFTAR GAMBAR**

	Halaman
2.1 Tegangan stator BLDC .....	5
2.2 Inverter 3 fasa.....	6
2.3 Mode konduksi 120° .....	7
2.4 Driver 3 fasa dan input sensor dengan tabel switch aktif.....	8
2.5 Urutan switch Q1-Q6 rotasi motor.....	8
2.8 Algoritma PWM six-step .....	9
2.9 Algoritma PWM Six-Step 3 Fasa.....	9
2.10 Penempatan sensor hall pada stator.....	10
2.11 Sensor Hall dan perubahan sinyal PWM .....	11
2.6 Arditektur <i>Programmable Logic Device</i> .....	15
3.1 Alur Penelitian .....	17
3.2 Diagram blok implementasi kontrol motor BLDC .....	19
3.3 Rangkain Power Supply .....	20
3.4 Fitur IC ATF16v8 .....	21
3.5 function blok diagram IC PAL16v8.....	22
3.6 Tampilan awal software WinCUPL.....	23
3.7 Tampilan awal Universal programmer G540.....	24
3.8 Skematik rangkaian pembangkit sinyal PWM.....	25
3.9 Skematik rangkaian driver mosfet .....	25

3.10 Rangkaian Inverter 3 Fasa.....	26
3.11 Motor BLDC.....	27



## BAB 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi pada peralatan baik industri maupun rumah tangga tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Motor merupakan alat yang dapat berputar jika dialiri dengan listrik. Jenis motor yang sering digunakan adalah motor DC karena mudah dalam pengendalian kecepatan yakni hanya mengatur nilai tegangan atau arus medan saja namun motor DC menggunakan komutator mekanik (sikat) sehingga memiliki keandalan rendah, karena terdapat rugi-rugi sikat dan memerlukan pemeliharaan atau penggantian secara berkala. Kelemahan tersebut dapat diatasi dengan menggunakan motor *brushless* DC yang menggunakan komutasi elektrik sehingga memiliki efisiensi yang tinggi dan waktu operasi yang lama.

Motor BLDC adalah motor sinkron. Hal ini berarti bahwa medan magnet yang dihasilkan stator dan medan magnet yang dihasilkan rotor berputar pada frekuensi yang sama (Asif Ali, Tanpa Tahun). Putaran pada rotor disebabkan oleh medan magnet pada stator yang pada setiap saatnya hanya aktif dua fasa (hanya dua fasa yang tersupply pada setiap saat sementara satu fasa lainnya tak tersupply).

Alat yang digunakan dalam komutasi elektrik sebagai pengganti sikat adalah inverter 3 fasa. Inverter ini digunakan sebagai kontrol kecepatan dari motor BLDC itu sendiri dengan mengatur *dutycycle* atau waktu *switching* pada masing-masing komponen saklar elektrik seperti *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET), dan *Insulated-Gate Bipolar Transistor* (IGBT). Metode yang umum dan sering digunakan dalam pengendalian *inverter* motor BLDC yakni dengan menggunakan 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*.

Agar motor mampu bekerja dengan torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan *timing* perubahan komutasi yang tepat dalam pengendalian BLDC dengan metode *six-step*. Oleh karena itu, pada motor BLDC telah terpasang 3 buah sensor *hall* untuk menentukan *timing* perubahan komutasi pada pengendalian BLDC.

Dari penelitian yang telah ada di bidang kontrol motor BLDC menggunakan rangkaian dengan IC gerbang logika, dimana rangkaian ini membutuhkan komponen dengan jumlah banyak, ukuran rangkaian yang relative besar dan kurang efisien dalam segi ukuran alat. Maka berangkat dari masalah ini, penulis akan membuat kontrol motor BLDC menggunakan rangkaian terintegrasi (IC) menggunakan *array logic*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang mendasari pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana desain *hardware* dan *software* kontrol kecepatan motor BLDC berbasis *Programmable Array Logic* dengan metode *six step commutation*?
2. Bagaimana kinerja kontrol kecepatan motor BLDC berbasis *Programmable Array Logic* dengan metode *six step commutation*?

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mendesain *hardware* dan *software* kontrol kecepatan motor BLDC berbasis *Programmable Array Logic* dengan metode *six step commutation*.
2. Mengetahui kinerja rangkaian kontrol kecepatan motor BLDC berbasis *Programmable Array Logic* dengan metode *six step commutation*.

## 1.4 Manfaat

Manfaat yang diharapkan setelah tujuan penelitian ini tercapai adalah dapat menghasilkan sistem kendali motor BLDC yang handal untuk diaplikasikan pada peralatan yang memanfaatkan putaran dengan kecepatan yang konstan.

### 1.5 Batasan Penelitian

Batasan masalah dalam penelitian ini antara lain :

1. Motor yang digunakan berdaya 500 Watt
2. Hanya menggunakan sumber tegangan baterai 12 volt.
3. Mosfet yang digunakan sebagai driver 3 fasa adalah IRF640A
4. Tidak membahas secara mendetail tentang konstruksi motor BLDC.
5. Tidak membahas secara detail tentang efisiensi daya motor.
6. Motor BLDC dibebani oleh generator dengan spesifikasi generator DC 200 Watt 48 Volt dan beban 4 resistor dengan spesifikasi 1,88  $\Omega/5w$ ; 1,41  $\Omega/5w$ ; 0,94  $\Omega/5w$  dan 0,47  $\Omega/5w$ .

### 1.6 Sistematika Penulisan

Secara garis besar penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

#### BAB 1. PENDAHULUAN

Latar belakang, tujuan pembahasan, rumusan masalah, batasan masalah, dan sistematika pembahasan.

#### BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Berisi tentang tinjauan pustaka yang menguraikan pendapat-pendapat atau hasil-hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan, landasan teori merupakan penjabaran dari tinjauan pustaka.

#### BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan tentang metode kajian yang digunakan untuk menyelesaikan skripsi.

#### BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi hasil pengujian dan analisa hasil pengujian.

#### BAB 5. PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari penulis

## BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Motor *Brushless* Direct Current (BLDC)

#### 2.1.1 Motor BLDC

Motor BLDC merupakan motor sinkron. Hal ini berarti bahwa medan magnet yang dihasilkan stator dan medan magnet yang dihasilkan rotor berputar pada frekuensi yang sama (Asif Aliet *al*, Tanpa Tahun). Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya brush dan komutator. Dan dibandingkan dengan motor induksi, BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi dan *noise* yang rendah karena rotor terbuat dari magnet permanen (Yen-Shin Lai, 2006).

Beberapa keuntungan *brushless* DC motor dengan motor DC dibandingkan dengan motor DC biasa, adalah:

1. Lebih tahan lama, karena tidak memerlukan perawatan terhadap sikatnya.
2. Memiliki tingkat efisiensi yang tinggi.
3. Torsi awal yang tinggi.
4. Kecepatan yang tinggi, tergantung pada kekuatan medan magnet yang dihasilkan oleh arus yang dibangkitkan dari kendali penggerakannya.

Walaupun *brushless* DC motor memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan motor DC biasa, pengendalian *brushless* DC motor lebih rumit untuk mengatur kecepatan dan torsi motor. Harga *brushless* DC motor juga cukup mahal jika dibandingkan dengan motor DC biasa.

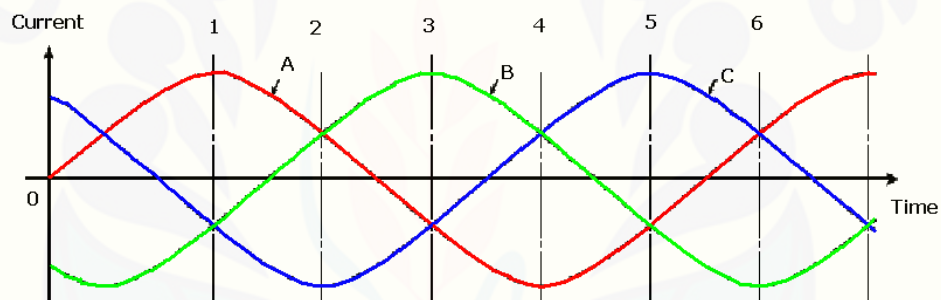
#### 2.1.2 Prinsip Kerja

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Karena arus yang diberikan berupa arus AC fasa, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah – ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi tersebut dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terjadinya medan putar magnet dengan kecepatan  $N_s$  :

$$N_s = \frac{120 f}{p} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana  $f$  merupakan frekuensi tegangan input dinyatakan dalam Hz per satuan detik,  $p$  merupakan jumlah kutub (*pole*) pada rotor dan 120 didapat dalam 1 putaran (360) per 3 fasa motor.

Motor BLDC berputar sebagai akibat dari interaksi magnet permanen pada rotor dengan medan magnet yang dihasilkan ketika tegangan DC terhubung pada satu kumparan stator. Untuk menjaga rotasi, orientasi dari medan magnet di stator harus diputar secara berurutan. Hal ini dilakukan dengan menghubungkan tegangan DC pada kumparan stator berikutnya agar rotor berputar (NEC Electronic Corporation, 2006).



Gambar 2.1 Tegangan stator BLDC

Ketika stator A diberikan tegangan negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negatif sedangkan B dan C 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 A, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet stator B dan C. Akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC sinusoidal, medan magnet stator A, B, dan C akan berubah – ubah polaritasnya dan besarnya mengikuti perubahan tegangan sinusoidal AC. Ketika A dan B memiliki medan magnet negatif akibat mendapatkan tegangan negatif dan C memiliki medan magnet positif akibat

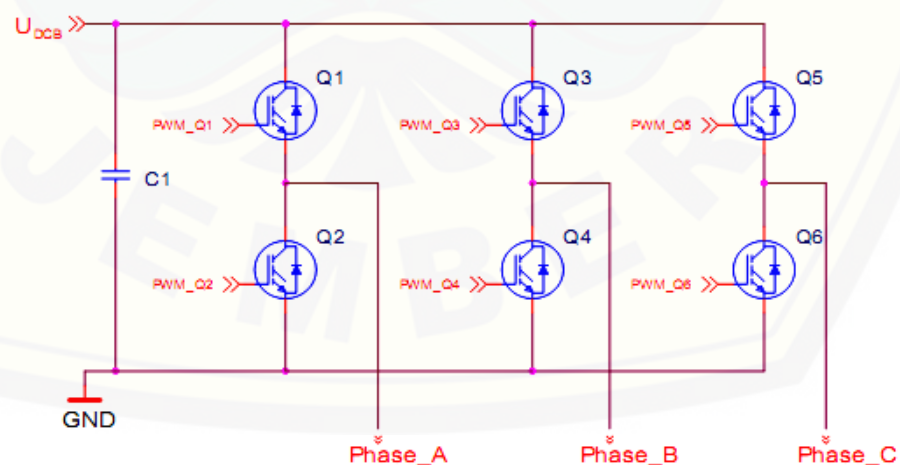


tegangan positif, magnet permanen rotor akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yakni bagian negatif akan berputar menuju medan magnet stator C dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet stator A dan B. Selanjutnya ketika B memiliki medan magnet negatif dan A serta C memiliki medan magnet positif, bagian positif magnet permanen akan berputar menuju B dan bagian negatif akan menuju A dari kumparan C. 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 (Dharmawan, Abe, 2009).

## 2.2 Inverter 3 fasa

Salah satu fitur kunci dari motor DC *brushless* adalah adanya inverter yang digunakan untuk menggantikan sikat dan komutator pada motor DC konvensional sehingga bebas perawatan.

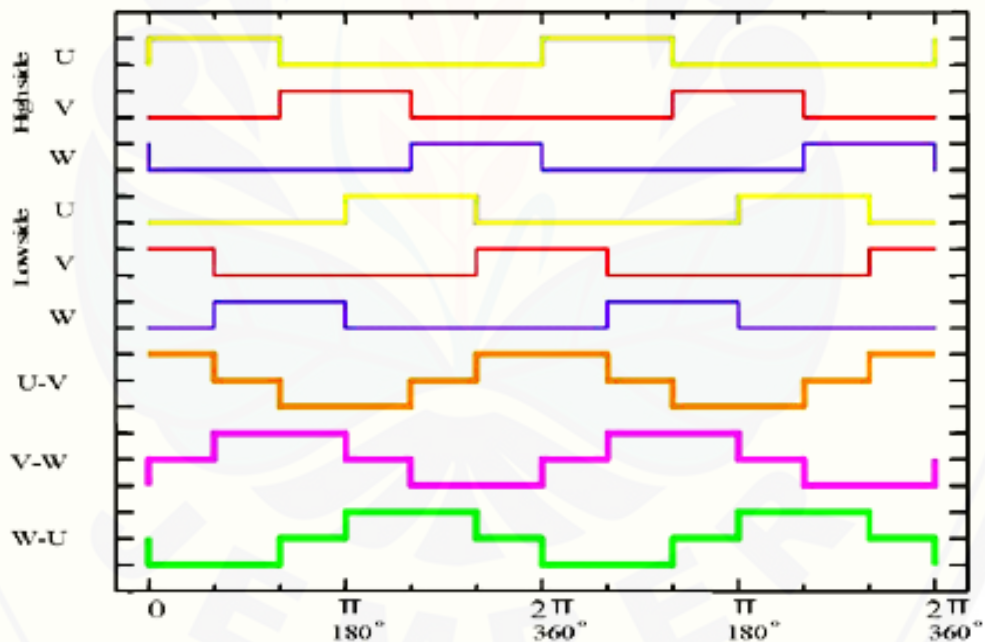
Definisi secara umum dari inverter adalah peralatan elektronika daya yang berfungsi mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC). Untuk BLDC diperlukan inverter 3 fasa yang terdiri dari 6 komponen *switching*. Berikut susunan dari keenam komponen *switching* inverter 3 fasa.



Gambar 2.2 Inverter 3 fasa

(freescale, 2005)

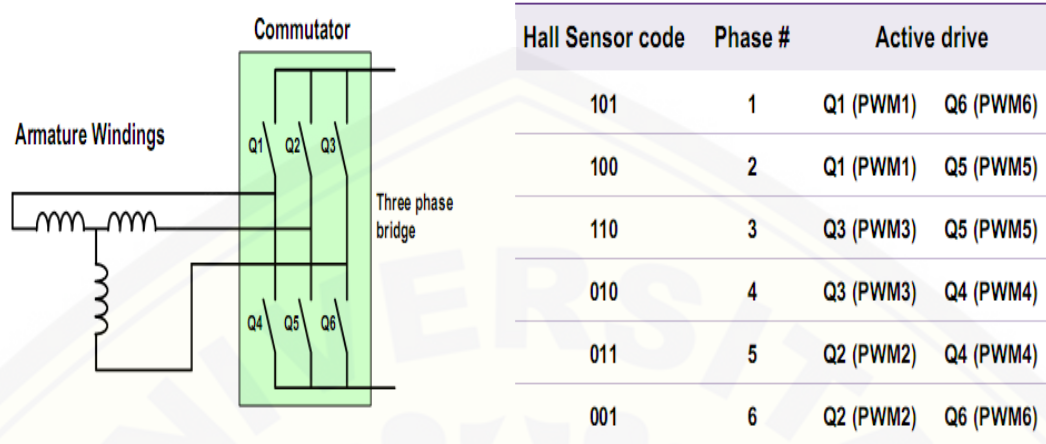
Terdapat 2 jenis mode operasi dari inverter jenis ini, yaitu mode konduksi  $120^\circ$  dan mode konduksi  $180^\circ$ . Agar dapat berputar, kumparan stator motor BLDC yang aktif tiap stepnya hanya dua buah dan satu buah kumparan lainnya *off* atau tidak teraliri listrik. Hal ini menyebabkan tiap stepnya hanya diperbolehkan dua buah *switch* saja yang aktif secara bergantian sehingga mode konduksi  $120^\circ$  yang digunakan. Inverter 3 fasa dengan mode konduksi  $120^\circ$  memungkinkan setiap komponen pensakelaran akan konduksi selama  $120^\circ$  dengan pasangan konduksi yang berbeda, seperti pada gambar 2.3,  $60^\circ$  pertama antara U- , dan  $60^\circ$  ke dua antara U- , kemudian V- , V- , W- , W- , U- dan siklus berulang kembali. Berikut adalah sinyal untuk tiap *switching* dan tegangan fase yang dihasilkan padamode konduksi  $120^\circ$ .



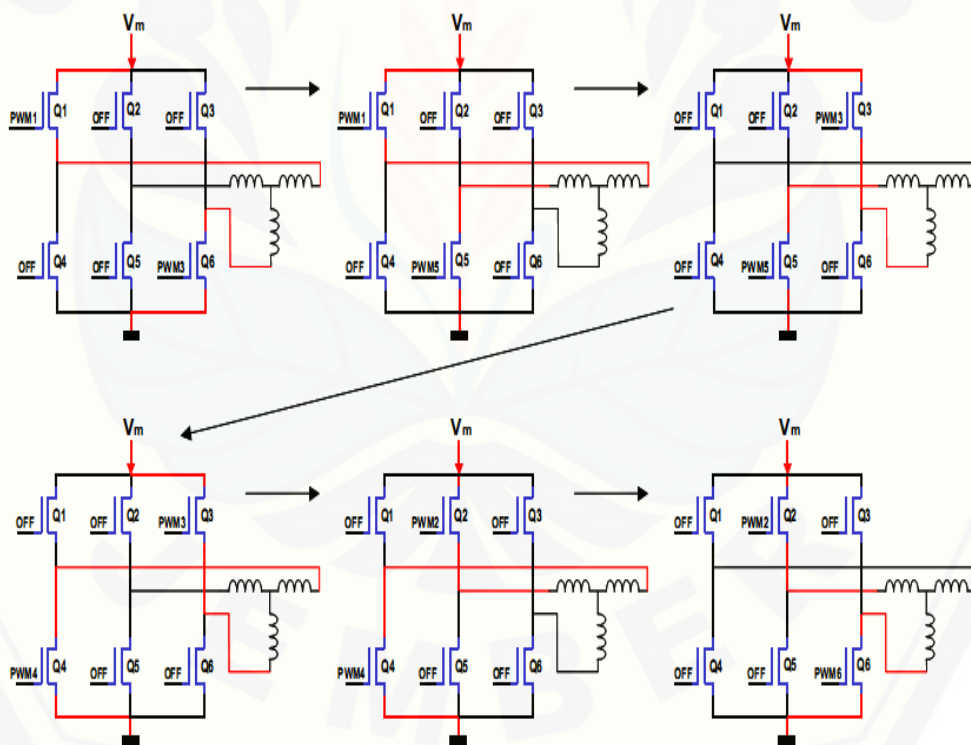
Gambar 2.3 Mode konduksi  $120^\circ$

Dan gambar berikut merupakan urutan *switch* dari inverter 3 fasa berdasarkan nilai kode dari sensor *hall* yang terdiri dari 6 komutasi berbeda untuk

membangkitkan medan magnet putar pada stator motor BLDC(NXP Semiconductor, 2007).



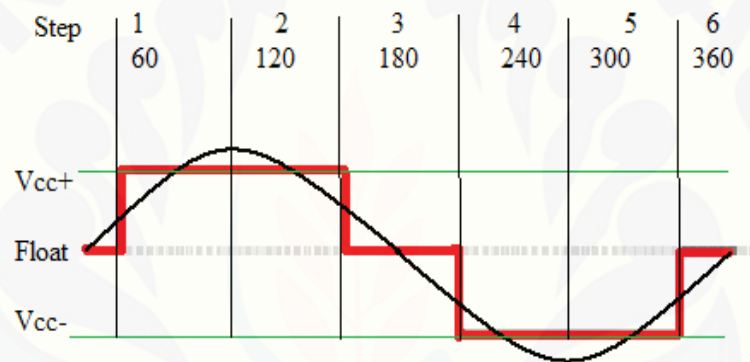
Gambar 2.4 Driver 3 fasa dan input sensor dengan tabel *switch* aktif



Gambar 2.5 Urutan *switch* Q1-Q6 rotasi motor  
(NXP Semiconductor, 2007)

### 2.3 Six Step Commutation

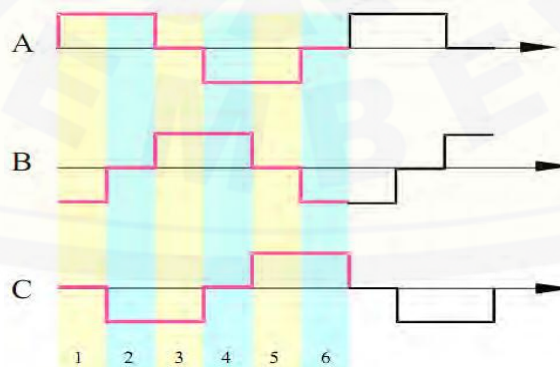
Metode *six-step* merupakan metode yang paling sering digunakan dalam pengendalian BLDC komersial. Hal ini terjadi karena metode ini sederhana sehingga mudah diimplementasikan. Metode ini disebut metode *six-step* karena agar mampu menciptakan gelombang *trapezoid* atau *square* yang menyerupai gelombang sinusoidal, digunakan PWM *square* yang terdiri dari 6 bagian yakni 2 bagian positif, 2 bagian negatif, dan 2 bagian floating. Masing – masing bagian besarnya  $60^\circ$  gelombang sinusoidal. Kondisi *floating* pada algoritma ini adalah kondisi ketika gelombang sinusoidal berpotongan pada titik 0. ( Dharmawan, Abe,2009)



Gambar 2.8 Algoritma PWM *six-step*

(Shao, 2003)

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 2.9 Algoritma PWM *Six-step* 3 Fasa

## 2.4 Sensor *Hall*

Sensor Efek *Hall* dirancang untuk merasakan adanya objek magnetis etika ada perubahan posisi. Perubahan medan magnet yang terus menerus menyebabkan timbulnya pulsa yang kemudian dapat ditentukan frekuensinya, sensor jenis ini biasa digunakan sebagai pengukur kecepatan (Varsani Anis, 2002). Sensor *Hall Effect* digunakan untuk mendeteksi kedekatan (*proximity*), kehadiran atau ketidakhadiran suatu objek magnetis pada jarak yang tertentu (elektronika Free web.com, 2011).

*Hall* sensor atau *hall-effect* sensor merupakan sensor yang digunakan untuk mendeteksi medan magnet. Dalam penggunaannya pada motor BLDC, kapanpun kutub magnetik rotor (*North* atau *South*) mendekati sensor *hall*, maka akan menghasilkan sinyal HIGH atau LOW, yang mana dapat digunakan untuk mendeteksi posisi rotor.

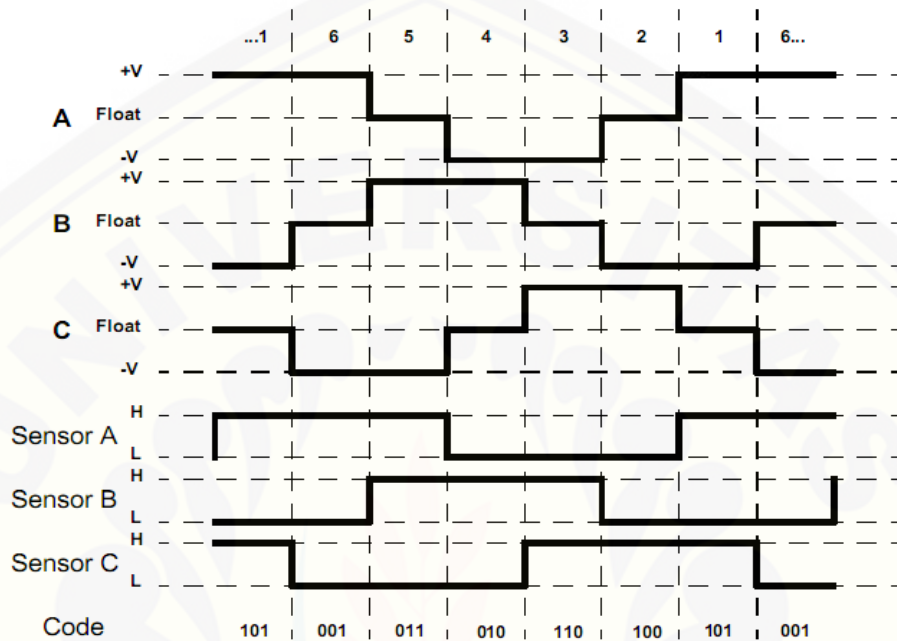
Pada umumnya sensor ketiga sensor *hall* terpisah sebesar 120 derajat satu dengan yang lainnya walaupun pada kondisi khusus tidak. Kondisi khusus pada motor BLDC yakni yang memiliki pole dalam jumlah banyak (diatas 6 pole). Dalam tugas akhir ini, penulis menggunakan motor BLDC dengan jumlah pole sebanyak 36 buah. Dan berikut gambar letak penempatan sensor *hall* pada stator.



Gambar 2.10 Penempatan sensor *hall* pada stator

(<http://electricisart.blogspot.com>)

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.



(Microchip Corp. 2002)

Gambar 2.11 Sensor *Hall* dan perubahan sinyal PWM

Tabel 2.1 Tabel kebenaran sensor *hall* (Topaloglu. 2013)

True table of hall sensor					
ha	hb	hc	Emf-a	Emf-b	Emf-c
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	+1
0	1	0	-1	+1	0
0	1	1	-1	0	+1
1	0	0	+1	0	-1
1	0	1	+1	-1	0
1	1	0	0	+1	-1
1	1	1	0	0	0

Pada gambar dan tabel diatas, 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 atau off, kombinasi 001, PWM A dan C menyala sedangkan B floating atau off, dan seterusnya.

### 2.5 Penyederhanaan dengan Peta Karnaugh

Untuk mengimplementasikan fungsi logika pada Tabel 2.2, fungsi perlu disederhanakan terlebih dahulu. Penyederhanaan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan metode *Karnaugh Map*. Untuk itu fungsi logika pada tabel, terlebih dahulu dipetakan dalam peta *Karnaugh*. Hasil pemetaan diperlihatkan pada tabel 2.4.

Tabel 2.2 Penyederhanaan menggunakan *Peta Karnaugh*

<b>Q</b>	0	0	1	1
<b>1</b>	0	1	1	0
00	0	0	0	1
01	0	0	0	1
11	0	1	0	0
10	0	1	0	0

<b>Q</b>	0	0	1	1
<b>4</b>	0	1	1	0
00	0	1	0	0
01	0	1	0	0
11	0	0	0	1
10	0	0	0	1

<b>Q</b>	0	0	1	1
<b>2</b>	0	1	1	0
00	0	0	0	0
01	1	1	0	0
11	0	0	0	0
10	0	0	1	1

<b>Q</b>	0	0	1	1
<b>5</b>	0	1	1	0
00	0	0	1	1
01	0	0	0	0
11	1	1	0	0
10	0	0	0	0

<b>Q</b>	0	0	1	1
<b>3</b>	0	1	1	0
00	0	1	1	0
01	0	0	0	0
11	1	0	0	1
10	0	0	0	0

<b>Q</b>	0	0	1	1
<b>6</b>	0	1	1	0
00	0	0	0	0
01	1	0	0	1
11	0	0	0	0
10	0	1	1	0

Berdasarkan Tabel 2.2 diatas, maka didapatkan enam persamaan hasil penyederhanaan dengan *Peta Karnaugh* yaitu :

$$\begin{aligned}
 Q1 &= D' B A' + D B' A & Q4 &= D' B' A + D B A' \\
 Q2 &= D' C B' + D C' B & Q5 &= D' C' B + D C B' \\
 Q3 &= D' C' A + D C A' & Q6 &= D' C A' + D C' A \dots\dots\dots(2)
 \end{aligned}$$

(Bambang Sujanarko, 2012)

**2.6 Logika Pensaklaran Motor BLDC**

Pada tabel 2.2 disajikan logika untuk komutasi 180° pada sistem *switching driver* BLDC, pada saat *hall* sensor mendeteksi medan magnet maka dianalogikan 1 sedangkan apabila *hall* sensor tidak mendeteksi adanya medan magnet maka dianalogikan 0. Pada saat arah maju (CW Direction) maka dianalogikan 1 sedangkan untuk arah mundur (CCW Direction) dianalogikan menjadi 0. Q1-Q6 adalah masing-masing *switch* pada bagian inverter BLDC

Tabel 2.3 Hubungan *hall* sensor dengan sistem *switching* pada inverter (Bambang Sujanarko, 2012)

Direction	Hall C	Hall B	Hall A	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	
CW	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0
	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0
	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
	1	0	1	1	0	1	0	0	0	1
	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
CCW	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0
	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1
	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0

**2.7 Programmable Array Logic (PAL)**

*Programmable Array Logic* (PAL) adalah rangkaian terpadu (IC) digital yang dapat diprogram untuk dapat menghasilkan fungsi logika tertentu. Beberapa IC PAL ada yang mempunyai kemampuan untuk mengaplikasikan fungsi logika

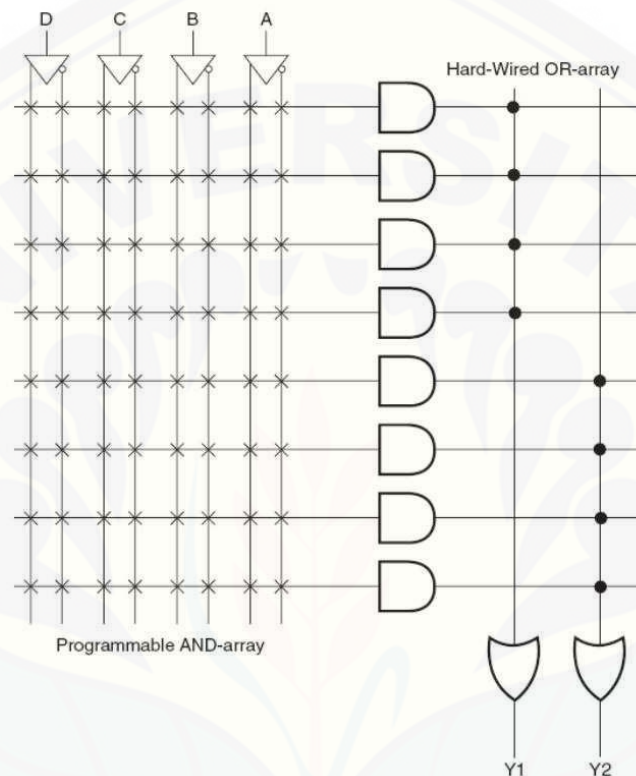


kombinasional dan ada juga yang dapat mengaplikasikan fungsi kombinasional serta *sequential*. PAL ini termasuk dalam jenis PLD, terdapat beberapa jenis PLD yang lain diantaranya *Programmable Random Memory Access (PROM)*, *Generic Array Logic (GAL)*, *Programmable Logic Array (PLA)*, ATF produk PLD keluaran dari ATMEL dan lain-lain. Berbagai jenis dan merek produksi IC PLD dapat menjadi pilihan bagi pengguna. Maka diperlukan adanya metode penyederhanaan persamaan logika dalam proses perancangan menggunakan IC PAL. Kemampuan dan performa yang didapatkan dari metode perancangan menjadi referensi agar rangkaian terpadu PAL tersebut dapat digunakan sesuai dengan fungsi yang dirancang. Dalam hal ini dapat digaris bawahi bahwa IC PAL yang berbeda mempunyai cara pemrograman yang berbeda pula. Perancangan menggunakan IC PAL memerlukan presentasi dari fungsi logika dan penyederhanaan persamaan logika. Metode yang dapat digunakan untuk penyederhanaan persamaan logika adalah *Sum of Product (SOP)*, *Product of Sum (POS)* dan peta *Karnaugh*. Penyederhanaan persamaan logika perlu dilakukan untuk memperkecil area desain. Pada Penelitian ini dilakukan penyederhanaan fungsi logika dengan menggunakan peta *Karnaugh*.

Rangkaian logika terpadu yang mempunyai beberapa fungsi dalam satu *device* tentunya menjadi keinginan bagi para *designer* elektronika. Adanya IC (*Integrated Circuit*) yang mempunyai fungsi logika sebagai multiplekser dan demultiplekser akan memberikan kontribusi bagi dunia elektronika digital. Penggunaan PAL yang di rancang dengan fungsi kombinasional akan menghasilkan beberapa fungsi logika di dalam 1 (satu) *device* IC (Sonny Prasetio, 2013).

Pada rangkaian elektronika digital dikenal dengan 2 jenis rangkaian terpadu yaitu rangkaian logika permanen (*fixed logic*) dan rangkaian logika yang dapat di program (*Programmable Array Logic*). Rangkaian logika permanen mempunyai konfigurasi fungsi tertentu dan bersifat tetap, sebagai contoh rangkaian terpadu *flip-flop*, multiplekser, demultiplekser, dan lain-lain. Sedangkan untuk rangkaian logika yang bersifat dapat diprogram (*programmable*) mempunyai struktur *array logic* yang memerlukan pemrograman untuk mengatur

pemutusan secara elektrik pada *array* tersebut. Pemutusan elektrik (*electric fuse*) dilakukan untuk memilih jalur yang akan digunakan dalam penerapan fungsi logika. Gambar rangkaian digital terpadu sederhana yang bersifat dapat diprogram (*programmable*) ditunjukkan dalam Gambar 1 .



Gambar 2.6 Arditektur *Programmable Logic Device*

(Sumber:Maini, 2007)

*Single PAL* terdiri dari gerbang logika dalam jumlah yang banyak termasuk device penghubung dimana semua *device* ini berada dalam satu IC. Dengan menggunakan PC, logika program dapat dibuat dengan HDL menggunakan *text editor* atau gambar sederhana dari logika rangkaian dengan menggunakan *schematic editor*. HDL atau schematic selanjutnya *decompile* dengan program untuk membuat *detail* dari rangkaian logika yang akan menghasilkan output dari rancangan yang telah dibuat pada HDL atau skematik. Operasi dari rangkaian ini selanjutnya dapat disimulasikan untuk

meyakinkan bahwa *output* sesuai dengan yang diinginkan. Jika simulasi rangkaian telah sesuai, maka desain selanjutnya didownload melalui *parallel port* ke PAL.

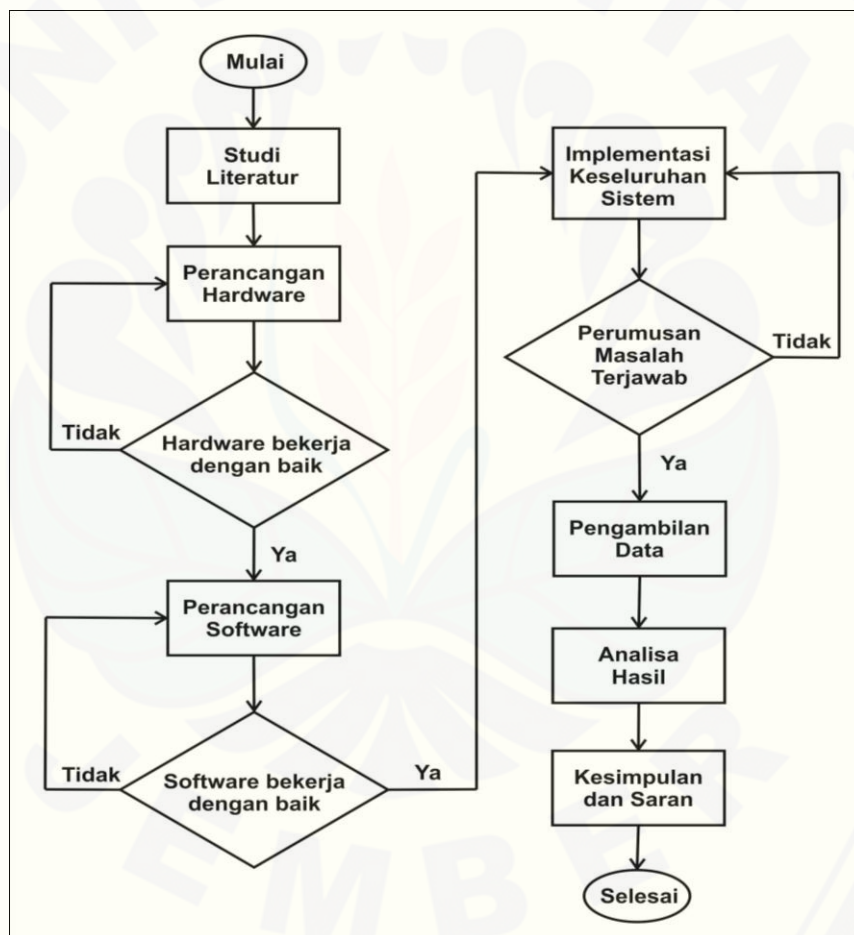


### BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian untuk desain dan analisis kontrol kecepatan motor BLDC berbasis *Programmable Array Logic* dilakukan di Laboratorium Sistem Kendali, Kampus Fakultas Teknik, Universitas Jember di Jl. Slamet Riyadi no.62 Patrang, Jember. Sedangkan waktu penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Maret 2014.

#### 3.2 Diagrama Alir Penelitian



Gambar 3.1 Alur Penelitian

Dalam pembuatan kontrol motor BLDC dibutuhkan langkah-langkah penelitian 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 dan Pembuatan *Hardware*

Dalam perancangan dan pembuatan alat pada penelitian ini terdiri dari :

#### a. Perancangan Skematik

Adalah tahap mendesain skema atau gambar layout rangkaian PCB rangkaian *power supply*, IC PAL, rangkaian pembangkit sinyal PWM, rangkaian driver mosfet, inverter 3 fasa.

#### b. Pembuatan *Hardware*

Tahap ini adalah penyablonan rangkaian hingga penyolderan komponen-komponen ke PCB dan kemudian dilakukan pengujian.

### 3. Perancangan *Software*

*Software* yang diperlukan berupa program dari rangkaian logika. Perancangan *Software* menggunakan aplikasi WinCUPL, aplikasi ini mudah dalam pengoperasiannya. Setelah inialisasi pin input output pada program rangkaian logika, sehingga menghasilkan output berupa urutan penyulutan ke masing-masing mosfet.

### 4. Implementasi Keseluruhan Sistem

Setelah *Hardware* dan *Software* yang telah diuji bekerja dengan baik maka selanjutnya adalah menggabungkan keduanya menjadi sebuah sistem untuk mengetahui kinerja alat apakah sesuai dengan rumusan masalah atau belum. Pengujian dilakukan pada masing-masing blok dan kemudian keseluruhan sistem.

### 5. Analisa dan pengambilan data

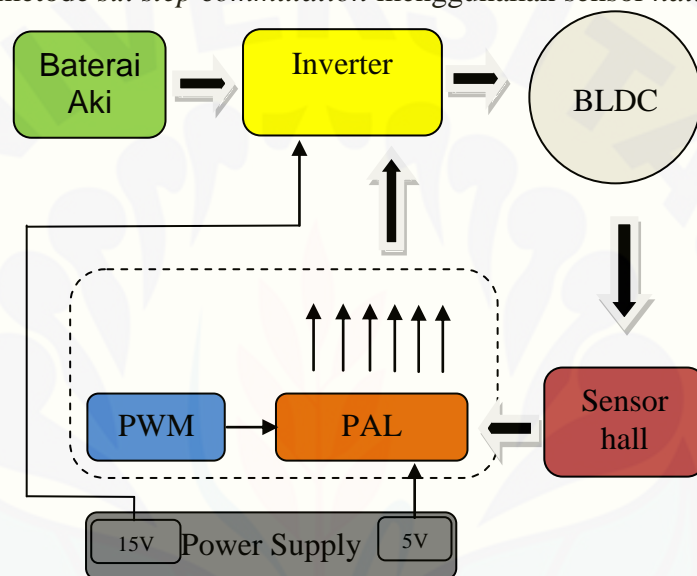
Setelah melakukan pengujian keseluruhan sistem bekerja dengan baik dan hasilnya memenuhi target, maka yang dilakukan selanjutnya adalah pengambilan data yang diperlukan dan kemudian dianalisa data yang telah didapatkan

## 6. Penyusunan laporan

Pada tahap akhir ini, hasil pengambilan data dan analisa dimasukkan ke pembahasan. Kemudian, dapat ditarik beberapa kesimpulan yang menyangkut kinerja dari alat yang dibuat dan memberikan saran yang dimaksudkan untuk memperbaiki kekurangan yang ada, kemungkinan pengembangan, serta penyempurnaan alat di masa mendatang.

### 3.3 Blok Diagram Sistem

Pada penelitian ini, konfigurasi dari kontrol kecepatan motor BLDC menggunakan metode *six step commutation* menggunakan sensor *hall*.



Gambar 3.2 Diagram blok implementasi kontrol motor BLDC

Keterangan :

- Blok warna hijau adalah baterai aki
- Blok warna kuning adalah inverter yang terdiri dari 6 switch mosfet
- Blok warna abu-abu adalah motor BLDC
- Blok warna biru adalah rangkaian pembangkit PWM sebagai pengatur kecepatan
- Blok warna orange adalah IC PAL16v8 sebagai pengatur komutasi driver
- Blok warna merah adalah sensor hall motor
- Blok warna abu-abu tua adalah *power supply*

Pada saat kita mengatur besar kecilnya PWM menggunakan potensio, maka membangkitkan gelombang listrik dengan mengubah-ubah lebar pulsa aktif

yaitu mengatur besarnya *dutycycle* menggunakan metode PWM. Untuk mendapatkan posisi fluks magnet dan kecepatan yang konstan maka perlu adanya feedback yakni dengan menggunakan sensor hall. Kode dari sensor hall akan diproses pada IC PLD.

### 3.3.1 Konfigurasi Sistem

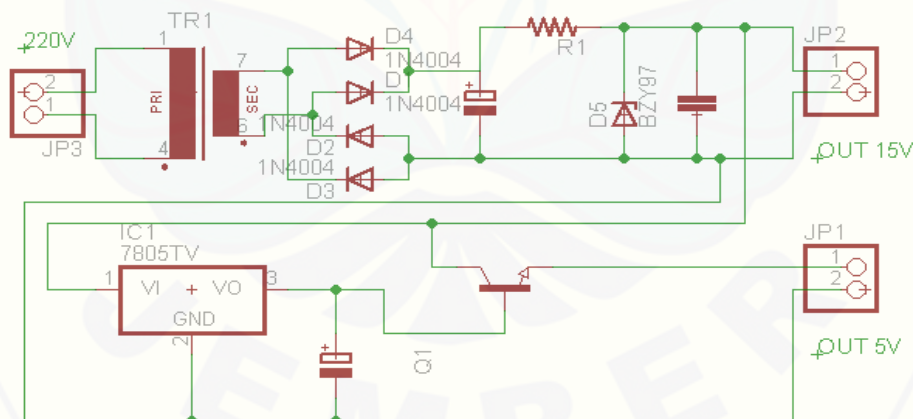
Konfigurasi system pada penelitian ini berdasarkan blok diagram yang ditunjukkan gambar 3.2

### 3.3.2 Baterai

Sumber tegangan berasal dari baterai accu kering 12 V berkapasitas 35 Ah.

### 3.3.3 Power Supply

Pada penelitian ini, *power supply* terdiri dari dua buah tegangan yaitu sebesar 5V untuk menyuplai IC PAL dan sebesar 18V untuk menyuplai rangkaian driver mosfet. Tetapi kedua tegangan ini menggunakan satu sumber tegangan dipisahkan dengan dioda agar ground masing-masing tidak menjadi satu sebagaiantisipasi jika terjadi arus balik atau short saat kesalahan komutasi pada rangkaian driver mosfet, maka tidak akan mengenai sistem kontrol yang sangat rentan dengan arus besar. Pada gambar 3.3 berikut skematik rangkaian *power supply* yang digunakan.

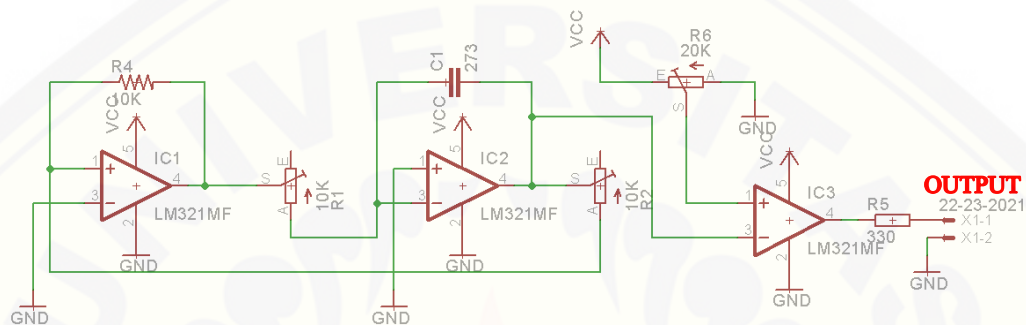


Gambar 3.3 Rangkain *Power Supply*

### 3.3.4 Rangkaian Pembangkit PWM

Rangkaian pembangkit sinyal PWM berfungsi sebagai pengatur kecepatan. Rangkaian tersebut terdiri dari 3 buah *op-amp* dengan menggunakan IC LM324, dimana Kedua *op-amp* digunakan sebagai pembangkit sinyal segitiga yang

kemudian dibandingkan/dikomparasikan pada *op-amp* yang ketiga dengan tegangan referensi untuk menghasilkan sinyal PWM. Kecepatan pada motor nantinya berpengaruh dari nilai *dutycycle*. Untuk merubah nilai *dutycycle* hanya dengan merubah nilai tegangan referensi dengan menggunakan *variable resistor* atau biasa disebut dengan potensiometer, antara 0 sampai 5 volt, dimana pada saat tegangan referensi 0 volt maka *dutycycle* akan 0% dan jika tegangan referensi 5 volt maka *dutycycle* berubah menjadi 100%.



Gambar 3.4 Skematik rangkaian pembangkit sinyal PWM

### 3.3.5 Rangkaian PAL16v8

Rangkaian terintegrasi (IC) yang digunakan untuk mengimplementasikan *array logic* yang telah dibuat adalah IC PAL16v8 dimana memiliki 8 pin input dan 8 pin output yang dianggap sudah memadai untuk maksud ini.

Spesifikasi ringkas dari IC ini adalah seperti terlihat dalam Gambar 3.4 Informasi ini lebih berupa fitur-fitur yang menunjukkan eksibelitas dan jaminan kompatibelitas dari *logic array* yang dimaksud.

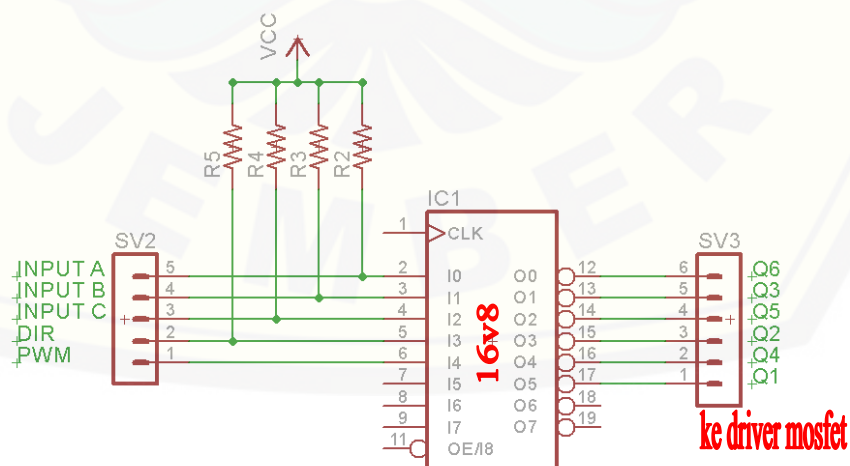


### Features

- **HIGH PERFORMANCE E<sup>2</sup>C<sup>2</sup>MOS<sup>®</sup> TECHNOLOGY**
  - 10 ns Maximum Propagation Delay
  - F<sub>max</sub> = 62.5 MHz
  - 7 ns Maximum from Clock Input to Data Output
  - TTL Compatible 12 mA Outputs
  - UltraMOS<sup>®</sup> Advanced CMOS Technology
- **50% REDUCTION IN POWER FROM BIPOLAR**
  - 75mA Typ I<sub>cc</sub> on Low Power Device
- **E<sup>2</sup> CELL TECHNOLOGY**
  - Reconfigurable Logic
  - Reprogrammable Cells
  - 100% Tested/100% Yields
  - High Speed Electrical Erasure (<100ms)
  - 20 Year Data Retention
- **EIGHT OUTPUT LOGIC MACROCELLS**
  - Maximum Flexibility for Complex Logic Designs
  - Programmable Output Polarity
  - Also Emulates 24-pin PAL<sup>®</sup> Devices with Full Function/ Fuse Map/Parametric Compatibility
- **PRELOAD AND POWER-ON RESET OF ALL REGISTERS**
  - 100% Functional Testability
- **APPLICATIONS INCLUDE:**
  - DMA Control
  - State Machine Control
  - High Speed Graphics Processing
  - Standard Logic Speed Upgrade

Gambar 3.5 Fitur IC PAL16v8

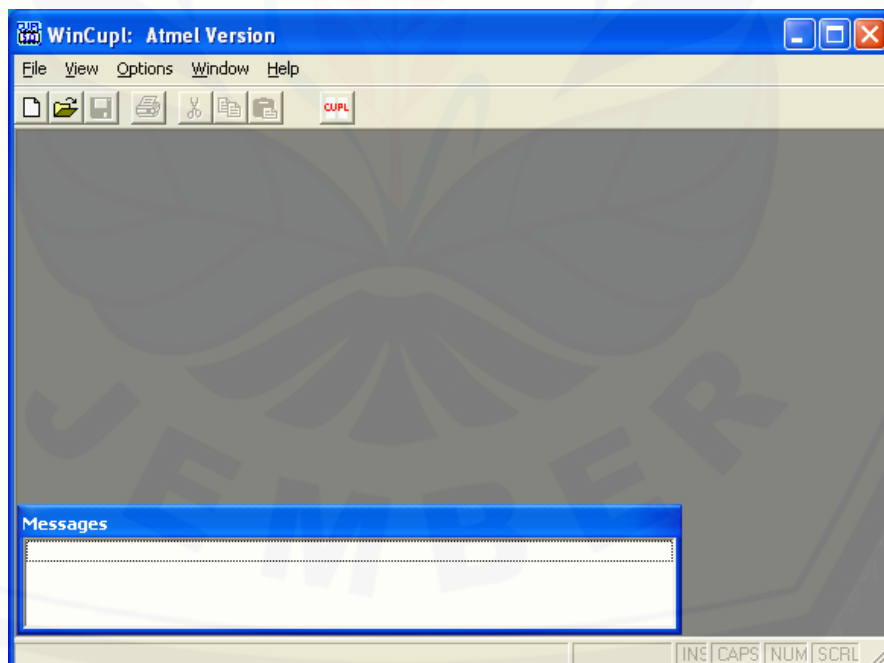
Gambar skematis IC ini yang ditunjukkan dalam skematik untuk menentukan menggunakan pin input dan output seperti terlihat dalam Gambar 3.5. Dari gambar ini terlihat kemudahan memindahkan skema rencana blok diagram *array* seperti terlihat dalam Gambar.



Gambar 3.6 Skematik IC PAL16v8

### 3.3.6 Pemrograman Rangkaian PAL16v8

Pemrograman dan uji coba data dilakukan menggunakan *Software* yang dijalankan pada sebuah komputer. Dengan menggunakan *Software* tersebut maka perancangan dapat memasukkan data pada komputer yang berisi tentang fungsi logika yang dikehendaki. Keluaran dari *Software* berupa *fuse map* dan hasil tes data yang dikirimkan pada memory PAL. Diagram alir pemrograman ditunjukkan dalam Gambar 6. Tahap awal dimulai dengan penyederhanaan persamaan fungsi logika. Setelah persamaan fungsi logika didapatkan maka dapat dilanjutkan dengan menjalankan *development Software*. Hasil dari *development Software* tersebut merupakan *fuse map* dan data *test* yang digunakan untuk pemrograman PAL. Kemudian dilanjutkan dengan tahap pengujian, apabila berhasil maka dapat dilakukan pengujian pada rangkaian yang sesungguhnya, akan tetapi apabila pengujian tidak berhasil maka harus dilakukan pengecekan persamaan logika dalam mengulangi tahapan pemrograman dari penyederhanaan persamaan logika. Pada tahap pengujian pada rangkaian apabila tidak berhasil maka harus dilakukan pengecekan *Hardware*. Dalam penelitian ini pemrograman dilakukan menggunakan *Compiler Universal for Programmable Logic (CUPL)*.

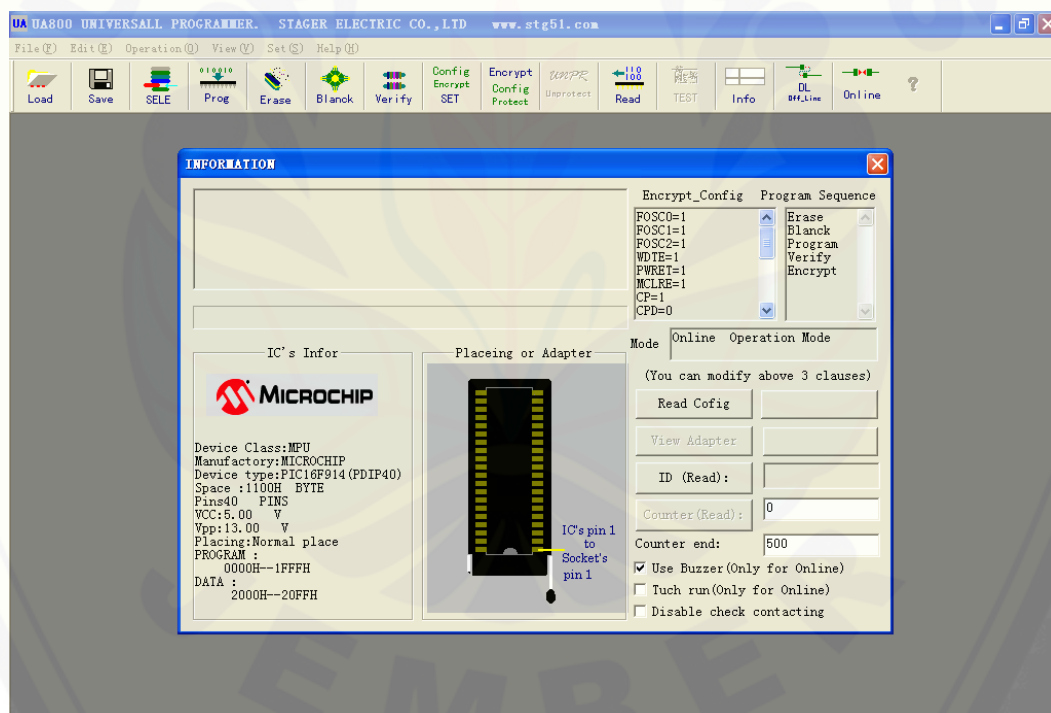


Gambar 3.7 Tampilan awal *Software* WinCUPL

Perancangan rangkaian logika yang sudah didapatkan dari penelitian sebelumnya, kemudian dituliskan pada *Software* CUPL yang kemudian nantinya

akan dicocokkan dengan menggunakan simulasi terlebih dahulu. Apabila pada simulasi telah cocok dengan tabel kebenaran, maka dapat dilakukan proses *compile*. Bila proses *compile* berhasil maka akan menghasilkan file jedec (.jed) dan file jedec inilah yang nantinya diprogram pada IC PAL16v8.

Setelah file program (.jed) telah didapatkan kemudian dilakukan implementasi *Software* ke hardware, yaitu pada IC ATF16v8. Cara untuk mengimplementasikan hal tersebut yaitu dengan menggunakan *Universal Downloader*. *Universal Downloader* ini sangat banyak kegunaannya selain untuk pemrograman PLD, juga untuk memprogram EPROM, EEPROM, MPU, dan lain-lain. Pada penelitian ini menggunakan GENIUS G540 *universal programmer*.

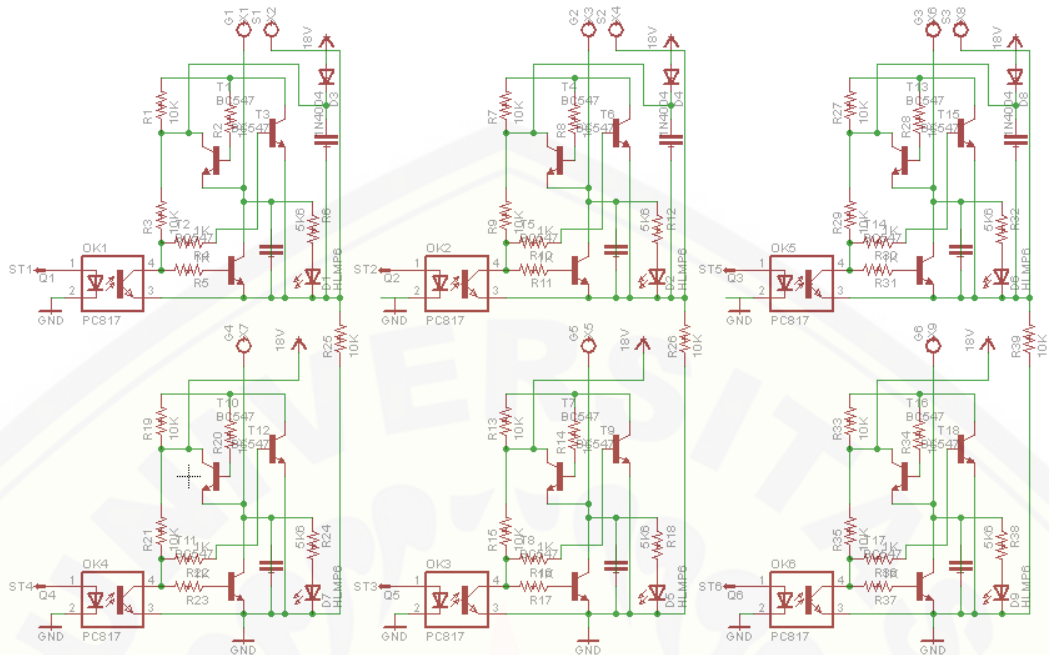


Gambar 3.8 Tampilan awal *Universal programmer G540*

### 3.3.7 Rangkaian driver mosfet

Fungsi utama rangkaian driver mosfet adalah sebagai pemisah antara rangkaian power dengan rangkaian kontrol atau isolator dari rangkaian tegangan

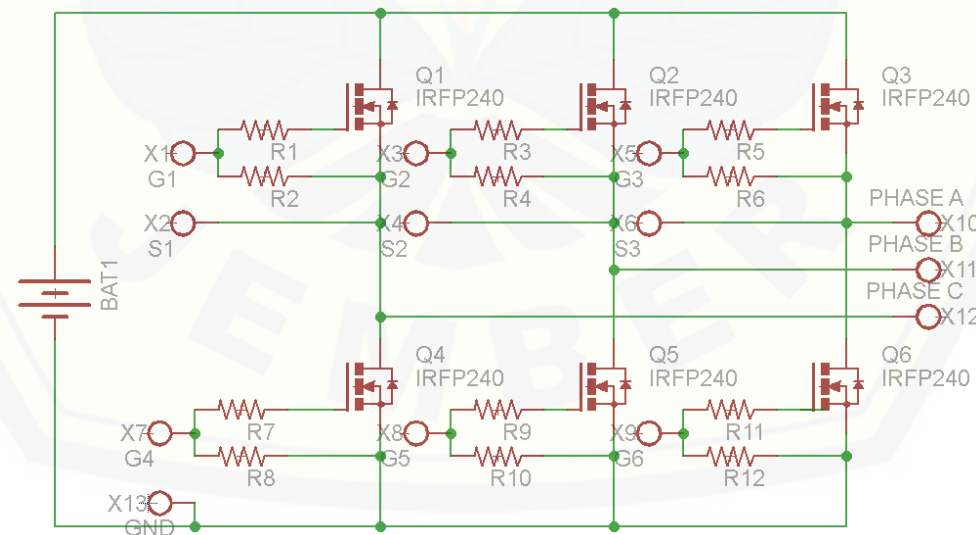
rendah ke rangkaian tegangan tinggi karena terdapat optocoupler. Konfigurasi dari optocoupler dapat dilihat pada gambar 3.11 berikut ini.



Gambar 3.9 Skematik rangkaian driver mosfet

### 3.3.8 Inverter Tiga Fasa

Inverter tiga fasa dirancang menggunakan enam buah saklar semikonduktor berupa MOSFET dengan tipe IRFP640A, dimana masing-masing fasa menggunakan satu buah MOSFET yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3.10 Rangkaian Inverter 3 Fasa

Inverter tersebut akan memberikan tegangan ke kumparan motor sesuai dengan data yang di terima dari sistem pentrigernya. Karena outputnya berupa sinyal tiga fasa maka daya input ke motor dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$P_{3\phi} = 3 \times V_L \times I_L \times \cos\phi \quad (13)$$

Dimana :

$P_{3\phi}$  = daya tiga fasa (watt)

$V_L$  = tegangan fasa (volt)

$I_L$  = arus fasa

$\cos\phi$  = faktor daya

### 3.3.9 Motor BLDC

Pada skripsi kali ini, spesifikasi motor BLDC yang digunakan adalah sebagai berikut.



Gambar 3.11 Motor BLDC

- Merk Motor : Trekko
- Tegangan : 48 V
- Daya : 500 watt
- Putaran : 500 rpm

### 3.3.10 Generator DC

Agar dapat dilakukan pembebanan, maka motor BLDC harus dikopel dengan sebuah generator. Dan generator yang digunakan adalah jenis motor DC

yang difungsikan sebagai generator DC. Pada generator DC berlaku hubungan sebagai berikut.

$$Ea = \frac{\phi z N P}{60 a} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana,  $Ea$  adalah gaya gerak listrik (EMF) yang dibangkitkan pada jangkar,  $\phi$  merupakan fluks per kutub,  $z$  merupakan jumlah penghantar total,  $N$  merupakan kecepatan putar (rpm),  $P$  merupakan jumlah kutub dan  $a$  merupakan jumlah hubungan paralel. Generator DC yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.15 beserta spesifikasinya.



- Daya : 200 watt
- Tegangan : 48 volt

**Gambar 3.12** Generator DC

### 3.3.11 Beban

Untuk menguji kestabilan dari sistem kontrol kecepatan maka perlu diberi gangguan yakni berupa beban resistif yang dihubungkan ke output generator DC. Beban yang digunakan berupa resistor keramik 5 watt yang terdiri dari 4 buah resistor  $0,47\Omega$ .

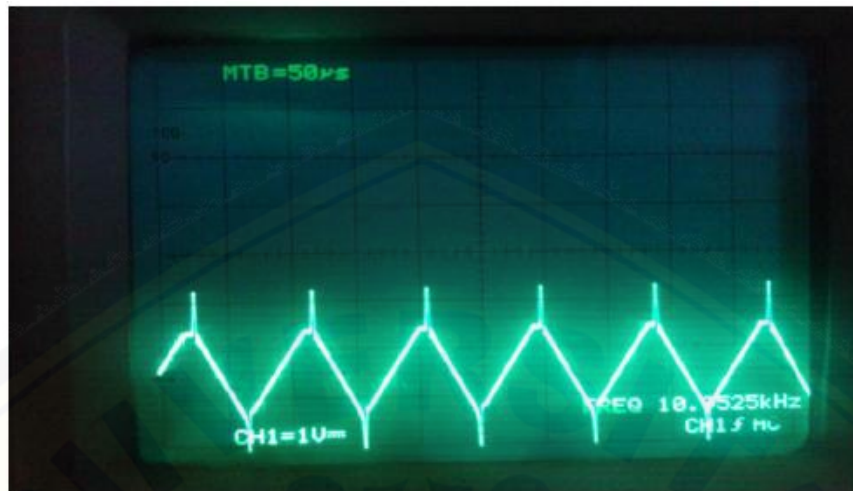
## **BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **4.1 Tujuan dan Metode Pengujian**

Pengujian merupakan suatu proses membandingkan suatu besaran yang belum diketahui dengan suatu besaran standar yang baku. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan data dari alat yang dibuat, sehingga data dijadikan dasar untuk menganalisa serta menentukan kesalahan jika suatu saat terjadi ketidakcocokan antara data percobaan dengan data pembanding. Terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan pada saat melakukan pengujian diantaranya besaran yang diukur, alat ukur yang digunakan, dan ketelitian dalam membaca data. Sedangkan metode pengujian yang digunakan adalah dengan cara mengukur tiap bagian yang telah direalisasikan, selanjutnya mengamati dari hasil pengukuran, kemudian menganalisanya dan menetapkan apakah proses pengujian telah berhasil atau sebaliknya.

### **4.2 Pengujian dan Analisa Rangkaian PWM**

Rangkaian PWM terdiri dari pembangkit gelombang segitiga, pembagi tegangan DC dan sebuah komparator. Pembangkit segitiga diuji dengan mengamati bentuk gelombang menggunakan osiloskop dan dengan membandingkan keluaran frekuensi yang terukur dengan hasil perhitungan frekuensi berdasarkan rumus frekuensi yang ada pada teori. Untuk pembagi tegangan pengamatan akan dijadikan satu dengan pengamatan komparator. Untuk pengujian komparator dilakukan dengan mengamati bentuk tegangan dengan osiloskop.



Gambar 4.1 Bentuk gelombang segitiga

Pada Gambar 4.1 diperlihatkan salah satu hasil pengamatan bentuk gelombang pembangkit segitiga. Dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa bentuk gelombang yang dihasilkan telah sesuai dengan yang diharapkan, yaitu berbentuk segitiga dengan titik bawah berada pada titik 0 V. Sedangkan frekuensi yang dihasilkan juga sudah sesuai dengan yang diharapkan, karena memiliki frekuensi di atas 7 KHz. Frekuensi tersebut dihasilkan oleh kombinasi komponen yang berupa:

$$C = 27 \text{ nF}$$

$$R1 = 20 \text{ K}$$

$$R2 = 100 \text{ K}$$

$$R3 = 10 \text{ K}$$

Jika dihitung dengan rumus frekuensi pembangkit segitiga, maka komponen komponen tersebut akan menghasilkan frekuensi sebesar:

$$f = \frac{1}{4CR1} \left( \frac{R2}{R3} \right) \dots\dots\dots (4)$$

$$f = \frac{1}{4 * 27 * 10^{-9} * 20 * 10^3} \left( \frac{100}{10} \right)$$



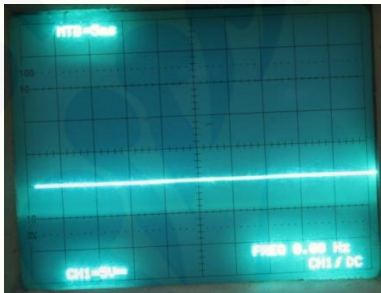
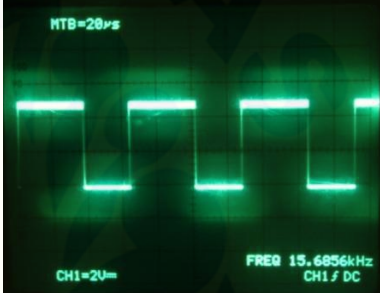
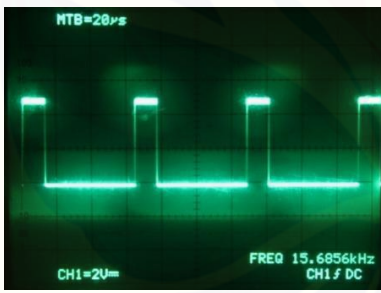
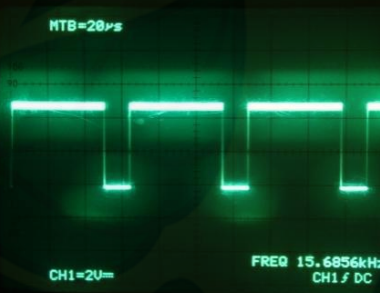
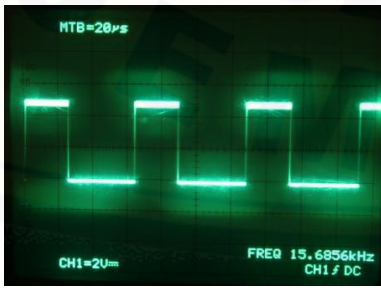
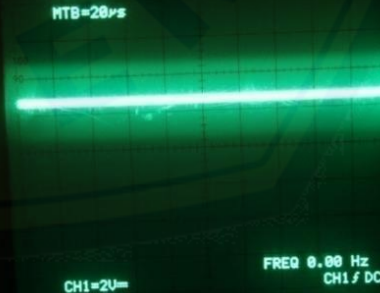
$$f = \frac{10}{2160 * 10^{-6}}$$

$$f = 4,6 * 10^3$$

$$f = 4,6Khz$$

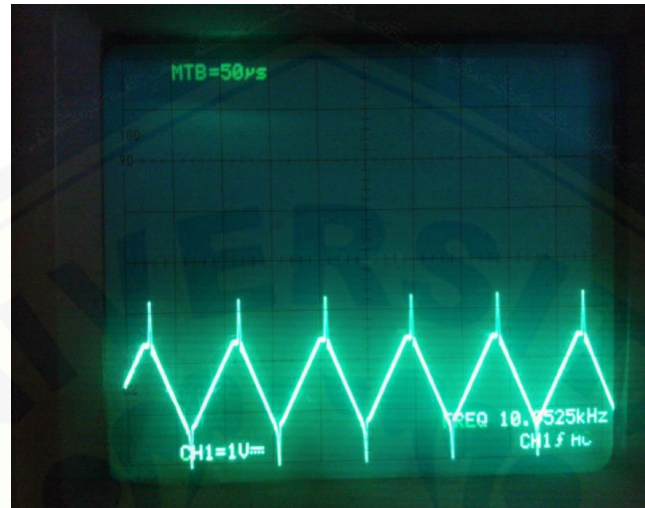
Dengan demikian besara frekuensi hasil pengamatan dengan hasil perhitungan memiliki selisih. Selisih tersebut wajar terjadi akibat adanya toleransi pada nilai komponen.

Tabel 4.1 Bentuk Perubahan Sinyal PWM

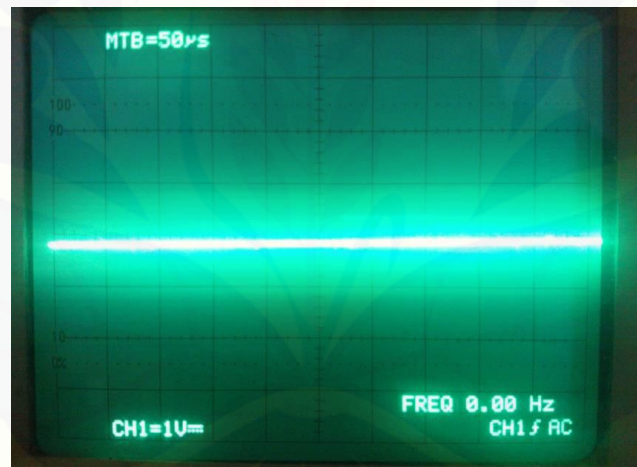
D(%)	Bentuk Sinyal	D(%)	Bentuk Sinyal
0		60,775	
20,43 6		80,481	
40,39 7		100	

Pengujian pembagi tegangan dan komparator dilakukan dengan mengamati bentuk gelombang masukan dan keluaran pada komparator. Gambar

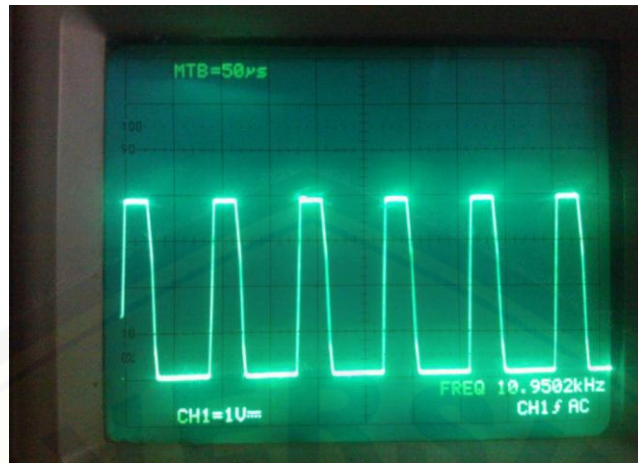
4.2.(a) adalah bentuk gelombang pada kaki non inverting komparator, gambar 4.2.(b) adalah bentuk gelombang pada kaki inverting komparator, sedangkan pada gambar 4.2.(c) adalah bentuk gelombang keluaran komparator.



a. Bentuk gelombang pada kaki non inverting komparator



b. Bentuk gelombang pada kaki inverting komparator



c. Bentuk gelombang pada keluaran komparator

Gambar 4.2 Bentuk gelombang pada kaki komparator

Berdasarkan hasil pengamatan terhadap bentuk gelombang pada komparator dapat disimpulkan bahwa Rangkaian *Pulse Width Modulation* telah benar dan sesuai dengan yang diharapkan.

### 4.3 Analisa Pemrograman PAL16v8

Pada penelitian ini dibutuhkan *software* dan *hardware* untuk implementasi ke rangkaian yang sebenarnya. Pembuatan program rangkaian logika berdasarkan penelitian sebelumnya, dengan menggunakan aplikasi WinCUPL. Aplikasi ini dipilih karena penggunaannya yang lebih mudah dari aplikasi lainnya, seperti Warp, PALSM dan lain-lain. Aplikasi ini menggunakan bahasa C namun lebih sederhana. Program yang dibuat pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 4.3.

```

Name      PAL ;
PartNo    00 ;
Date      8/22/2014 ;
Revision  01 ;
Designer  Engineer ;
Company   unej ;
Assembly  None ;
Location  ;
Device    virtual ;

/* ***** INPUT PINS ***** */
PIN 2 = A; /* Input Sensor Hall A */
PIN 3 = B; /* Input Sensor Hall B */
PIN 4 = C; /* Input Sensor Hall C */
PIN 5 = D; /* Input Direction */
PIN 6 = P; /* Input PWM */

/* ***** OUTPUT PINS ***** */
PIN 12 = Q6; /* Output switch 1 */
PIN 13 = Q3; /* Output switch 2 */
PIN 14 = Q5; /* Output switch 3 */
PIN 15 = Q2; /* Output switch 4 */
PIN 16 = Q4; /* Output switch 5 */
PIN 17 = Q1; /* Output switch 6 */

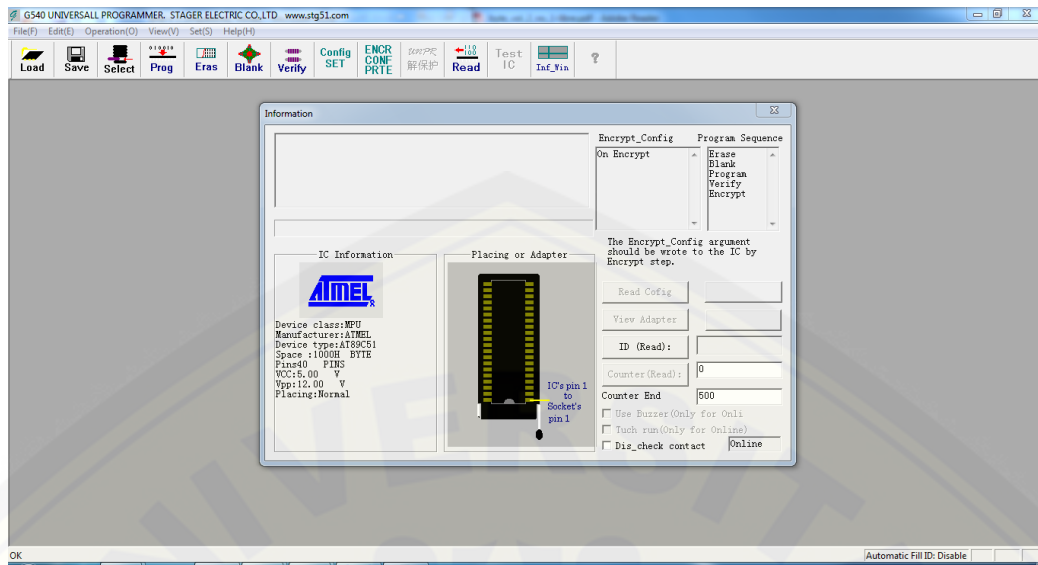
/* ***** FUNGSI SIX STEP ***** */

Q1=(!D & B & !A # D & !B & A);
Q2=(!D & C & !B # D & !C & B);
Q3=(!D & !C & A # D & C & !A);
Q4=(!D & !B & A # D & B & !A & P);
Q5=(!D & !C & B # D & C & !B & P);
Q6=(!D & C & !A # D & !C & A & P);

```

Gambar 4.3 Program rangkaian logika

Setelah didapat kan program tersebut kemudian program di-*compile* sehingga membentuk file jedec (.jed), file inilah yang nantinya akan dimasukkan kedalam IC. Apabila tidak ada *error* pada program dapat dilanjutkan pada pengujian secara simulasi, jika pada simulasi program sudah sesuai dengan rangkaian logika, maka selanjutnya dapat diimplementasikan ke hardware dengan menggunakan *Universal downloader*. Pada penelitian ini menggunakan Genius G540 Universal programmer sebagai downloader IC PAL16v10. Berikut tampilan pada Software Universal Downloader pada gambar 4.4.



Gambar 4.4 Tampilan Utama *Software Universal Programmer*

Kemudian pada software downloader tersebut ada beberapa pilihan IC yang akan digunakan. Setelah memilih tipe IC yang sesuai yaitu IC PAL16v8, kemudian *load file* program dengan ekstensi jedec yang telah dibuat sebelumnya, kemudian IC diprogram. Untuk IC PAL hanya dapat diprogram dengan file yang berekstensi (.jed).

#### 4.4 Pengujian Rangkaian PAL16v8

Rangkaian terintegrasi (IC) yang digunakan untuk mengimplementasikan rangkaian gerbang logic yang telah dibuat adalah menggunakan IC PAL16V10 yang telah diprogram. Diperlihatkan bahwa terdapat lima pin masukan yang digunakan yaitu, sensor *hall A*, sensor *hall B*, sensor *hall C*, *direction*, dan PWM. Sedangkan keluaran yang digunakan sebanyak enam pin, yaitu masing-masing keluaran Q1-Q6. Pada pengujian ini akan dicari hubungan input dan output dari IC tersebut dan besar tegangan pada input dan output pada saat high dan low.

Hasil pengujian input dan output pada IC yang telah diprogram dapat dilihat pada table. Dimana data pengujian harus sama dengan data hasil proses rangkaian digital pada penelitian sebelumnya oleh Bayu Sovan P. (Bayu, 2014) .

Tabel 4.2 Pengujian tegangan logic input dan output

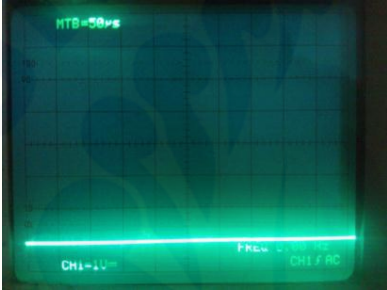

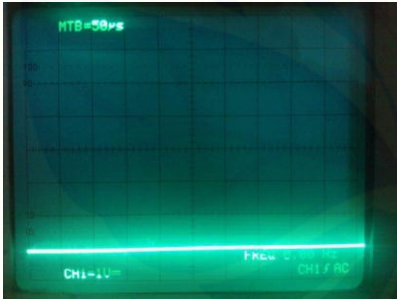

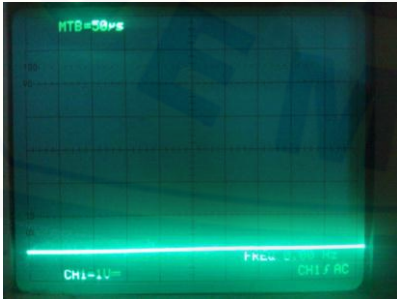

Direction	Hall C	Hall B	Hall A	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	
	4,42V	4,41V	10,04mV	4,42V	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,4mV	2,796V	1,4mV
	4,41V	4,42V	10,04mV	10,04mV	1,3mV	1,5mV	2,796V	1,4mV	2,796V	1,3mV
C	4,42V	4,41V	4,42V	10,04mV	1,4mV	1,4mV	2,796V	2,796V	1,5mV	1,4mV
W	4,43V	10,04mV	4,41V	4,41V	1,4mV	2,796V	1,4mV	2,796V	1,4mV	1,4mV
	4,42V	10,04mV	4,42V	4,42V	1,4mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,3mV	2,796V
	4,42V	10,03mV	10,04mV	10,04mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,4mV	1,4mV	2,796V
	10,04mV	10,03mV	10,04mV	4,41V	1,4mV	1,4mV	2,796V	2,796V	1,5mV	1,3mV
C	10,04mV	10,04mV	4,42V	4,42V	1,5mV	1,34mV	2,796V	1,4mV	2,796V	1,5mV
C	10,04mV	10,04mV	4,42V	10,04mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,4mV	2,796V	1,4mV
W	10,04mV	4,41V	4,41V	10,04mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,3mV	1,4mV	2,796V
	10,04mV	4,41V	10,04mV	10,04mV	1,4mV	2,796V	1,4mV	1,4mV	1,5mV	2,796V
	10,04mV	4,41V	10,04mV	4,41V	1,4mV	2,796V	1,4mV	2,796V	1,4mV	1,4mV

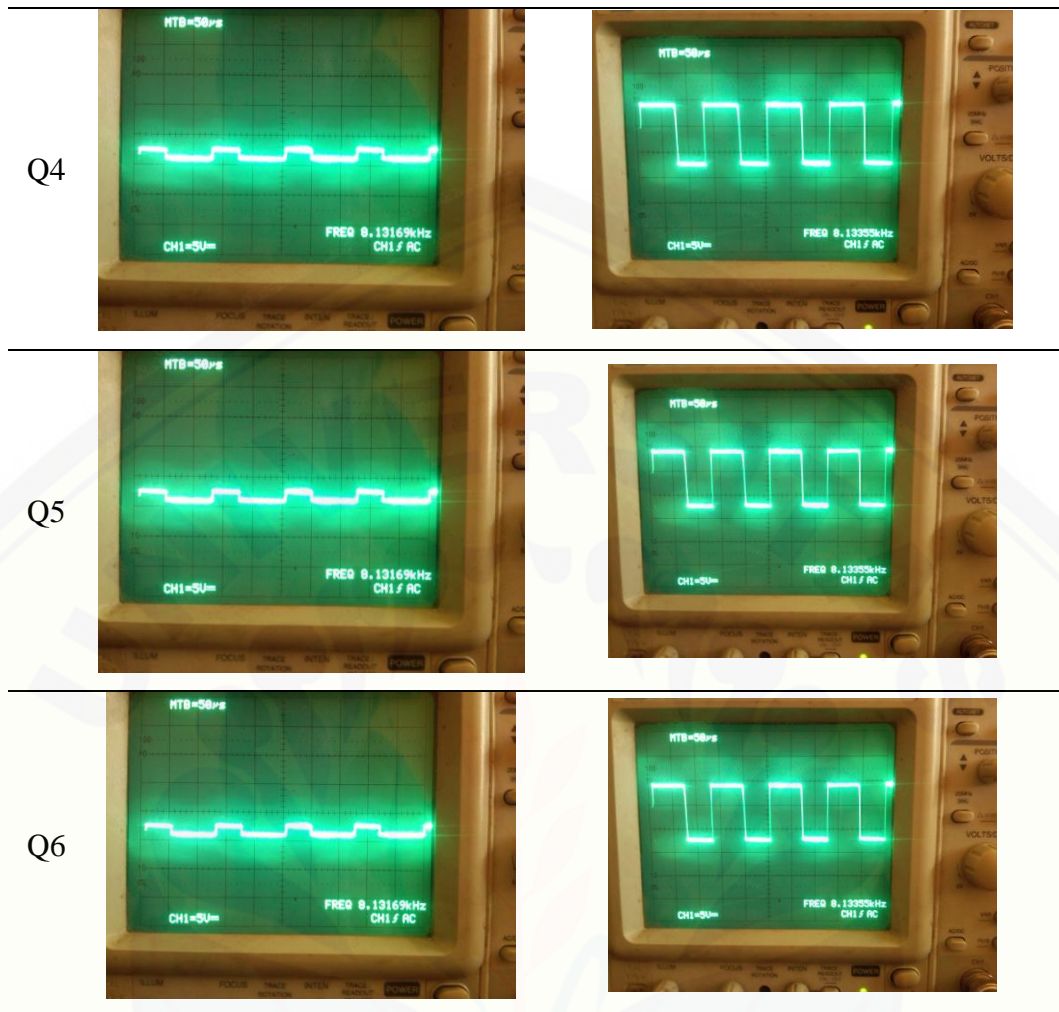
Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa pada saat input low  $V_{IL}$  tegangan sebesar 10,3 sampai 10,4mV sedangkan pada datasheet membutuhkan tegangan  $V_{IL}$  sebesar -0,5 sampai 0,8 V agar memberikan logic low(0) dan pada saat high  $V_{IH}$  tegangan sebesar 4,41-4,42Volt, ini dikarenakan pada pin input diberi resistor pullup untuk menghindari kondisi tegangan ambang, sedangkan pada datasheet membutuhkan tegangan  $V_{IH}$  sebesar 2.0 sampai  $V_{CC} + 0,75$  atau  $4.42+0,75=5,17V$  agar mampu memberikan logic high. Kemudian pada pin output ,  $V_{OL}$  sebesar 1,3 sampai 1.5 mV pada saat low dan  $V_{OH}$  sebesar 2,796V pada saat high. Dan nilai  $V_{OL}$  pada datasheet maksimum 0,5V dan  $V_{OH}$  minimal 2.4V Sehingga hanya akan didapat logika low dan high pada masing-masing input dan output. Dari hasil penujian diatas didapat data high(1) dan low(0) yang sesuai dengan rangkaian *logic* yang telah dibuat sebelumnya. Berdasarkan pengujian juga didapatkan, bahwa IC PAL16v8 ini mampu beroperasi pada tegangan minimum sebesar 2,4 Volt diaman tegangan normal adalah 5 Volt. Sehingga apabila diaplikasikan ke mobil listrik pada saat tegangan baterai turun masih ada toleransi tegangan sebesar 2,6 Volt dari tegangan normal, sehingga IC masih tetap bekerja hingga batas tegangan 2,4 Volt.

#### 4.5 Pengujian rangkaian driver

Permasalahan pada implementasi rangkaian kendali *logic* ini adalah sama dengan rangkaian kendali elektronik pada umumnya yaitu menjaga agar rangkaian beroperasi pada level parameter yang sesuai. Pengujian rangkaian driver ini dilakukan untuk memastikan bahwa rangkaian driver memiliki respon frekuensi yang sesuai. Dengan demikian pengujian dilakukan dengan mengamati bentuk gelombang menggunakan osiloskop.

Tabel 4.3 Pengujian pada masing-masing driver

	Pada Saat Kondisi Low	Pada Saat Kondisi High
Q1		
Q2		
Q3		



Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa, gambar yang ditunjukkan pada Q1,Q2, dan Q3 adalah sama. Begitupula pada Q4,Q5,dan Q6 yang memiliki gelombang yang sama.

Pada saat pengambilan data diatas frekuensi dari PWM sebesar 8,172 KHz. Dan pada Q4,Q5,dan Q6 driver yang mendapatkan sinyal PWM juga memiliki frekuensi sebesar 8,133 KHz. Dari data tersebut membuktikan bahwa rangkaian driver ini mampu menjaga agar rangkaian beroperasi pada level parameter yang sesuai.

#### 4.6 Pengujian dan Analisa Kecepatan Motor Tanpa Beban


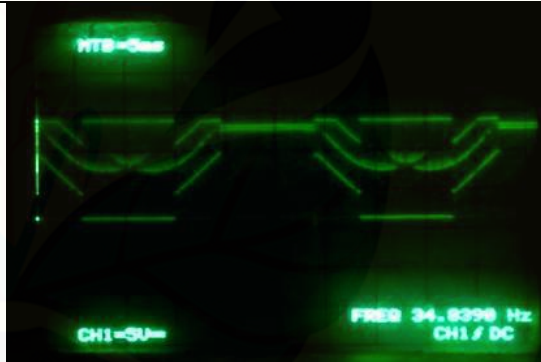

Pada pengujian ini Pada pengujian ini akan dicari hubungan nilai PWM terhadap kecepatan motor. Sehingga nantinya dapat diketahui karakteristik motor

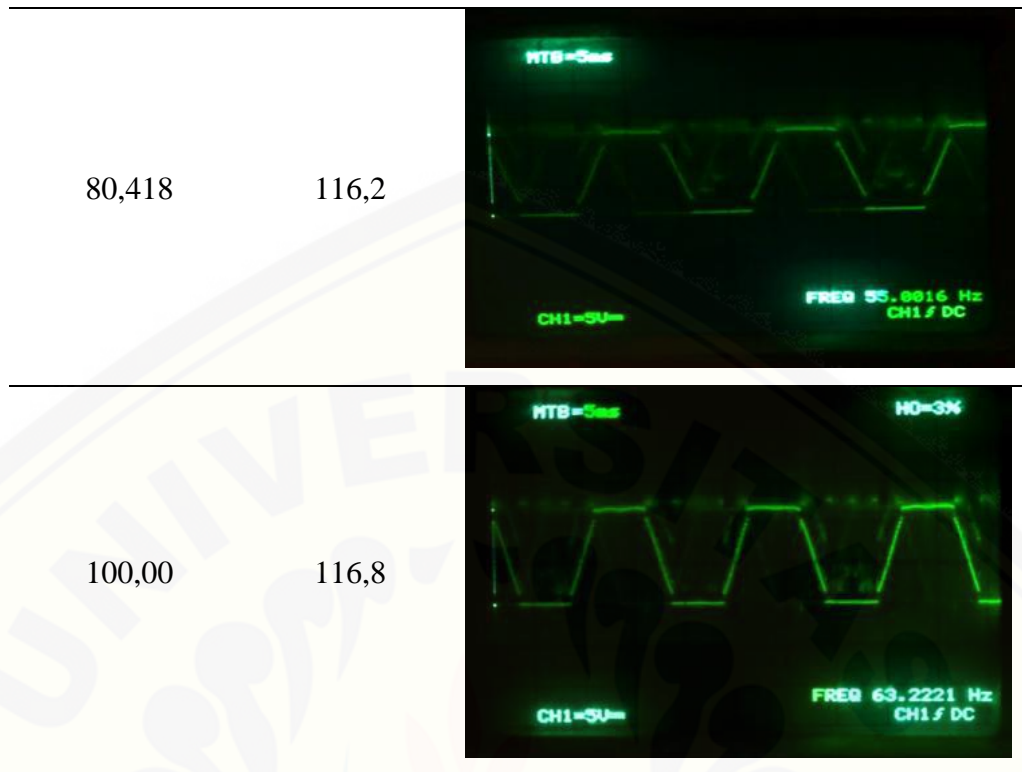


yang dipakai yakni berupa linier atau tidaknya perubahan PWM terhadap kecepatan motor dan batas kecepatan maksimumnya.

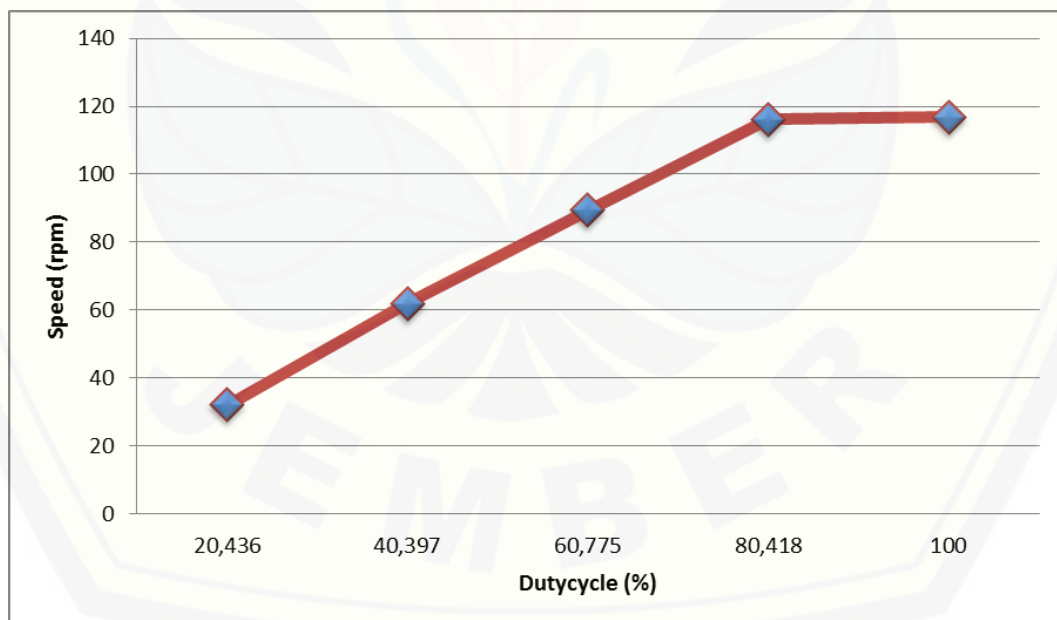
Dari hasil pengujian maka didapatkan beberapa data akibat dari perubahan PWM atau *Dutycycle* yang diperlihatkan pada tabel, sedangkan grafik hubungan antara PWM (*dutycycle*) terhadap speed ditunjukkan pada tabel.

Tabel 4.4 Pengujian pada fasa motor

<i>Dutycycle</i> (%)	Speed (rpm)	Bentuk Sinyal pada Fasa Motor
20,436	32,1	
40,397	62,0	
60,775	89,4	



\*) Tegangan baterai saat pengujian ini adalah 12.5 volt



Gambar 4.5 Grafik hubungan *duty cycle* dengan kecepatan motor

Dari gambar dapat dilihat bahwa semakin besar nilai PWM (*duty cycle*) yang diberikan maka semakin cepat putaran motor atau dengan kata lain nilai

PWM (*dutycycle*) berbanding lurus dengan kecepatan motor. Dan didapat kecepatan maksimumnya saat tegangan input 12,5 volt sebesar 116,8 rpm. Alasan bagaimana PWM dapat mengatur kecepatan motor adalah mengatur berapa persen tegangan input yang dialirkan ke motor yakni dengan mengatur lama waktu saat sinyal high terhadap periode PWM itu sendiri atau yang biasa disebut dengan *dutycycle* yang secara matematis dapat ditulis pada persamaan berikut.

$$V_{out} = Dutycycle * V_{in} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana  $V_{out}$  merupakan tegangan output dari inverter atau tegangan input yang masuk ke motor, sedangkan  $V_{in}$  adalah tegangan baterai sebesar 12,5 volt. Sehingga untuk data pada Tabel 4.4 dapat dihitung tegangan input motornya.

- $V_{out} = 20,436\% * 12,5 = 2,55 \text{ Volt}$
- $V_{out} = 40,397\% * 12,5 = 5,05 \text{ Volt}$
- $V_{out} = 60,775\% * 12,5 = 7,57 \text{ Volt}$
- $V_{out} = 80,418\% * 12,5 = 10,05 \text{ Volt}$
- $V_{out} = 100\% * 12,5 = 12,5 \text{ Volt}$

Selain itu, dapat dilihat pada osiloskop yaitu sinyal dari salah satu fasa motor dimana metode *Six Step* menciptakan gelombang AC yang berbentuk *trapezoid* atau *square* karena PWM yang digunakan dalam metode ini merupakan PWM *square*. Akibat dari gelombang yang berbentuk *square* atau *trapezoid* timbul gelombang harmonik. Gelombang harmonik inilah yang menyebabkan motor “bising” ketika berputar. Gelombang harmonik tersebut sangat jelas terlihat pada saat motor berputar pelan atau saat frekuensi rendah yang dibuktikan dengan bentuk gelombang *trapezoid* tidak beraturan dan belum sempurna. Namun, saat motor berputar cepat atau saat frekuensi bertambah besar tepatnya saat PWM 80-100%, bentuk gelombang *trapezoid* telah sempurna atau menyerupai sinyal sinusoidal sehingga suara motor menjadi lebih mulus.

#### 4.7 Pengujian dan Analisa Kecepatan Motor Berbeban

Pengujian berbeban adalah sistem sudah terpasang beban dari awal saat motor belum dijalankan. Yaitu dengan menghubungkan motor BLDC dengan generator DC yang kemudian generator tersebut dibebankan pada resistor. Beban yang digunakan adalah empat buah resistor keramik 5 watt dengan masing-masing sebesar 1,88  $\Omega$ ; 1,41  $\Omega$ ; 0,94  $\Omega$  dan 0,47  $\Omega$ . Penulis hanya mengambil tiga buah sampel kecepatan saja yakni pada *dutycycle* 30%, 60%, 90% dengan beban berbeda-beda.

Berikut menampilkan tabel dengan mengambil tiga buah sampel *dutycycle*.

Tabel 4.5 Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 30%

Speed (rpm)	Beban ( $\Omega$ )	Tegangan Fasa (Vac)	Arus Fasa (I)
78,9	-	6,49	0,92
53,9	0,47	5,2	3,01
56,3	0,94	5,32	2,92
60,0	1,41	5,44	2,75
62,4	1,88	5,53	2,55

Tabel 4.6 Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 60%

Speed (rpm)	Beban ( $\Omega$ )	Tegangan Fasa (Vac)	Arus Fasa (I)
101,2	-	7,16	0,94
65,7	0,47	5,90	3,68
71,4	0,94	6,19	3,22
74,7	1,41	6,41	3,03
76,5	1,88	6,59	2,80

Tabel 4.7 Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 90%

Speed (rpm)	Beban ( $\Omega$ )	Tegangan Fasa (Vac)	Arus Fasa (I)
112,5	-	8,54	0,95
71,7	0,47	6,27	4,23
78,1	0,94	6,63	3,78

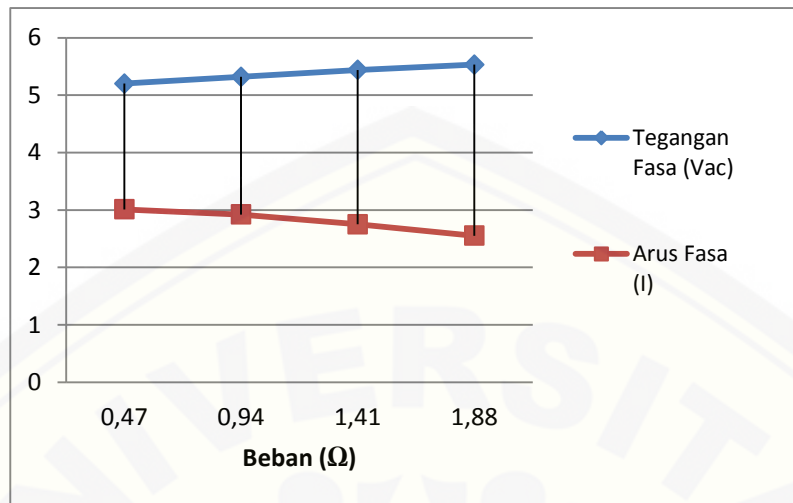
83,4	1,41	6,91	3,45
86,8	1,88	7,18	3,18

Berdasarkan Tabel 4.5 diatas terdapat empat data dengan nilai beban berbeda dengan kecepatan awal sebesar 78,9rpm, dimana semakin besar nilai beban, maka semakin besar pula nilai tegangan pada fasa motor dan berbanding terbalik dengan nilai arus pada fasa motor yang semakin menurun. Sebagai contoh pada beban  $0,47\Omega$  nilai tegangan sebesar 5,2 Vac dan nilai Arus 3,01 A. Sedangkan pada beban  $1,88\Omega$  nilai tegangan naik menjadi 5,53 Vac dan nilai Arus turun menjadi 2,55 A. Hal tersebut terjadi dikarenakan pada saat generator diberi beban kecil maka akan membutuhkan motor dengan torsi yang sangat besar, sehingga kecepatan motor akan menurun, dapat dilihat pada tabel, nilai kecepatan terendah terjadi pada nilai beban yang paling kecil. Pada saat terjadi kenaikan torsi maka arus akan semakin besar pula.

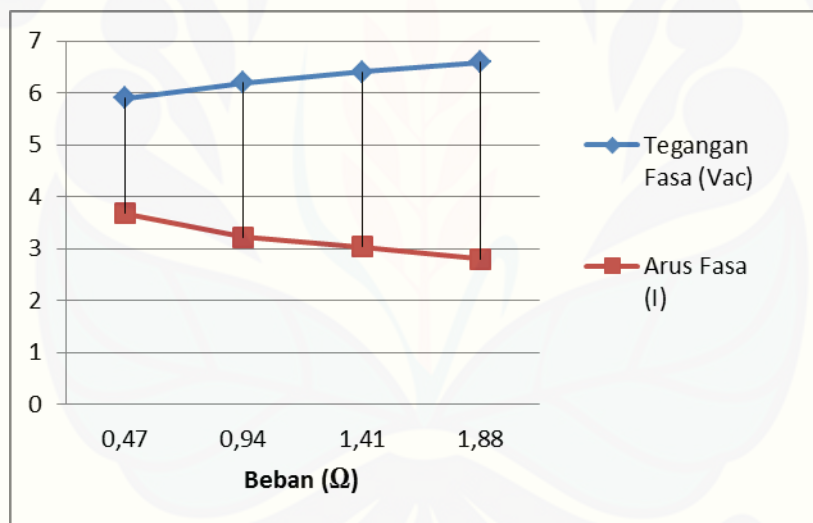
Hal yang serupa juga terjadi pada tabel 4.6 dan tabel 4.7 hanya saja nilai kecepatan, tegangan, dan arus memiliki nilai yang lebih besar. Ini dikarenakan nilai kecepatan awal yang lebih besar, yaitu sebesar 101,2 rpm dan 112,5 rpm.

Dari data tabel diatas dapat dilihat bahwa arus tertinggi yaitu sebesar 4,23 A terjadi pada *dutycycle* 90% dengan beban paling kecil  $0,47\Omega$ . Sedangkan nilai Arus terendah sebesar 2,55 A terjadi pada *dutycycle* 30% dengan beban paling besar yaitu  $1,88\Omega$ .

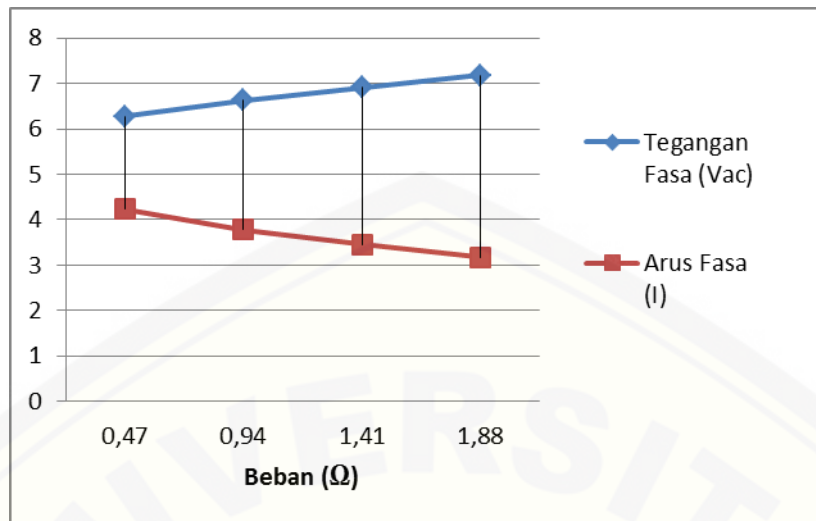
Berikut grafik hubungan antara tegangan dengan arus.



Gambar 4.6 Grafik hubungan tegangan dan arus pada *dutycycle* 30%



Gambar 4.7 Grafik hubungan tegangan dan arus pada *dutycycle* 60%



Gambar 4.6 Grafik hubungan tegangan dan arus pada *dutycycle* 90%

Kurva diatas adalah hubungan antara tegangan dan arus, dimana semakin besar tegangan maka semakin kecil nilai arusnya. Dari ketiga kurva diatas, dapat disimpulkan kurva tersebut memiliki linieritas yang hampir sama. Sehingga hal ini berarti sistem ini mampu bekerja optimal dari kecepatan rendah hingga kecepatan tinggi.

## BAB 5. PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan dari penelitian dengan judul “DESAIN SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR BLDC BERBASIS *PROGRAMMABLE ARRAY LOGIC* DENGAN METODE *SIX STEP COMMUTATION*” maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

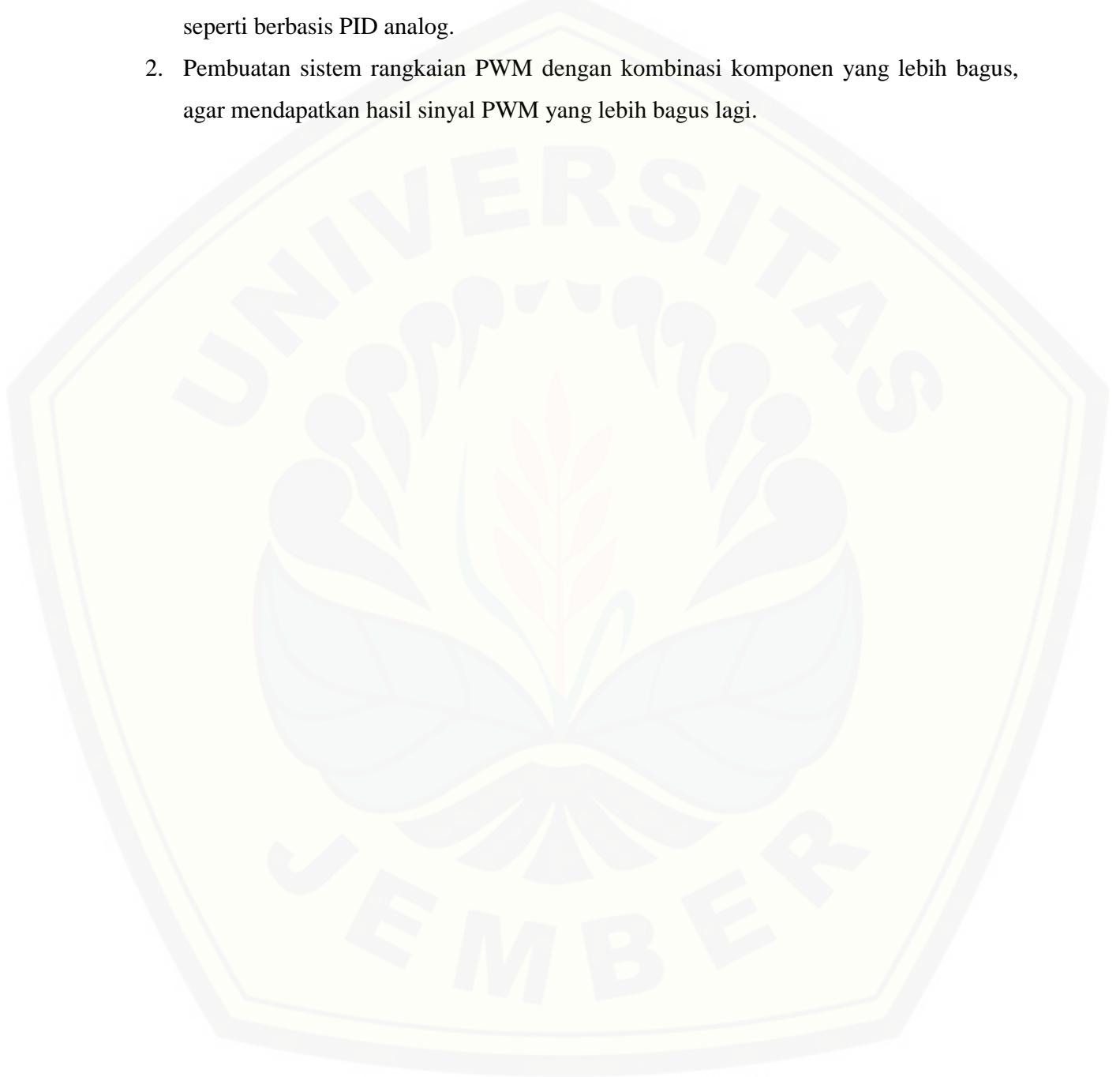
1. Untuk memprogram IC *Programmable Array Logic* menggunakan aplikasi WinCUPL yang paling mudah dalam pengoperasiannya.
2. Dengan tegangan rendah, sebesar 2,5 volt atau 50% dari tegangan  $V_{cc}$ , IC ini masih dapat bekerja.
3. Pada kaki input, Tegangan input pada saat low  $V_{IL}$  sebesar 10,3 sampai 10,4 mV, sedangkan nilai high  $V_{IH}$  tegangan sebesar 4,41-4,42Volt.
4. Pada kaki output, tegangan output pada saat low  $V_{OL}$  sebesar 1,3 sampai 1.5 mV, dan pada saat high  $V_{OH}$  sebesar 2,796V.
5. Perbandingan dengan menggunakan IC gerbang logika, maka penggunaan IC PAL ini sangat efisien dari segi fisiknya.
6. Perubahan PWM (*duty cycle*) pada motor BLDC mempengaruhi kecepatan pada motor BLDC. Semakin besar nilai PWM (*duty cycle*), putaran motor BLDC semakin cepat.



## 5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk lebih menyempurnakan hasil penelitian ini atau untuk dikembangkan lebih lanjut yakni antara lain :

1. Kontrol kecepatan motor BLDC dapat dikembangkan lagi dengan metode kontrol lain seperti berbasis PID analog.
2. Pembuatan sistem rangkaian PWM dengan kombinasi komponen yang lebih bagus, agar mendapatkan hasil sinyal PWM yang lebih bagus lagi.



**DAFTAR PUSTAKA**

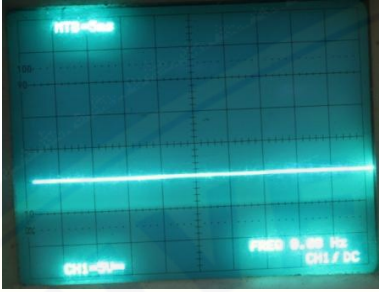
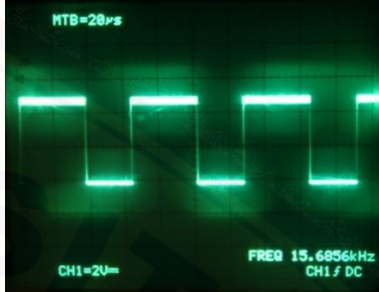
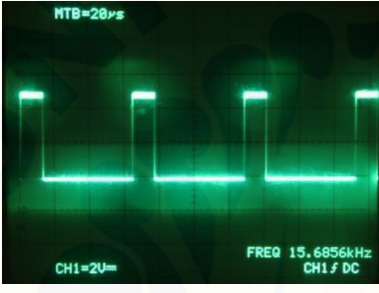
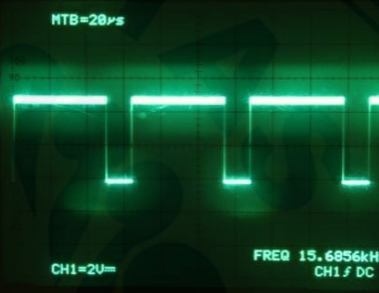
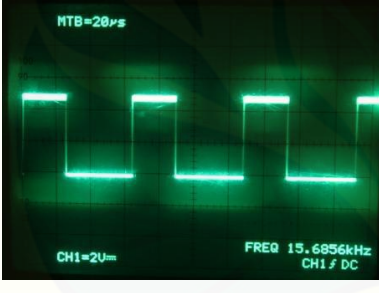
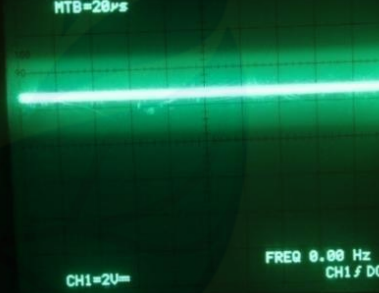
- Ali, Asif. *Control Of Bldc Motor With The Help Of Pulse Width Modulation*.
- Bhargavi Nisarga, Daniel Torres. 2011. *Sensored 3-Phase BLDC Motor Control Using MSP430*. Texas Instrument.
- Dharmawan, Abe. 2009. *Pengendali Motor DC Brushless dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATmega 16*. Universitas Indonesia.
- Freescall Semiconductor, 2005. *BLDC Motor with Speed Closed Loop and DC-Bus Break Controller, Driven by eTPU on MPC5554*.
- Irmansyah. Mohammad. 2009. *Gerbang logika berbasis Programmable logic device (pld)*. Teknik Elektro Politeknik Negeri Padang.
- Maini, A. K . 2007. *Digital Electronics :Principle Devices and Applications*. John Wiley & Sons. England
- Microchip Corp. 2002. *Brushless DC Motor Control Made Easy*.
- NEC Electronic Corporation. 2006. *3-Phase Brushless DC Motor Control 120-Degree Trapezoidal Drive with Hall Sensors for MC-LVKIT-714 Motor Control Evaluation System*. Germany)
- Nugroho, Seno Ajie. 2010. *Perancangan dan Implementasi DC to DC Converter Sebagai Driver Motor DC Kapasitas 200 Volt 9 Ampere dengan Metode Pulse Width Modulation*. Bandung: ITT Telkom.
- NXP Semiconductor. 2007. *Brushless DC motor control using the LPC2141*.
- Sovan, Bayu. 2014. *Rancang Bangun Sistem Pengendali Motor Brushless Dc Untuk Aplikasi Pada Mobil Listrik*. Universitas Jember
- Sujanarko, Bambang. 2012. *BLDC Controller Using Digital Logic For Electric Vehicle*. University Of Jember. Seminar Retii, Yogyakarta.
- Tinder, R. F. 2000. *Engineering Digital Design Second Edition*. Academic Press. San Diego
- Topaloglu, I. 2013. *Closed-Loop Speed Control of PM-BLDC Motor Fed by Six Step Inverter and Effects of Inertia Changes for Desktop CNC Machine*.
- Varsani, Anish. 2003. *Low Cost Brushless DC Controller*. Queensland: University Of Queensland

Yen-Shin Lai. 2006. *Assessment of Pulse-Width Modulation Techniques for Brushless DC Motor Drives*. National Taipei University of Technology.



LAMPIRAN

A. Pengujian dan Analisa Rangkaian PWM

D(%)	Bentuk Sinyal	D(%)	Bentuk Sinyal
0		60,775	
20,4 36		80,481	
40,3 97		100	

## B. Listing Program

```

Name      PAL ;
PartNo    00 ;
Date      8/22/2014 ;
Revision  01 ;
Designer  Engineer ;
Company   unej ;
Assembly  None ;
Location  ;
Device    virtual ;

/* ***** INPUT PINS ***** */
PIN 2 = A; /* Input Sensor Hall A */
PIN 3 = B; /* Input Sensor Hall B */
PIN 4 = C; /* Input Sensor Hall C */
PIN 5 = D; /* Input Direction */
PIN 6 = P; /* Input PWM */

/* ***** OUTPUT PINS ***** */
PIN 12 = Q6; /* Output switch 1 */
PIN 13 = Q3; /* Output switch 2 */
PIN 14 = Q5; /* Output switch 3 */
PIN 15 = Q2; /* Output switch 4 */
PIN 16 = Q4; /* Output switch 5 */
PIN 17 = Q1; /* Output switch 6 */

/* ***** FUNGSI SIX STEP ***** */

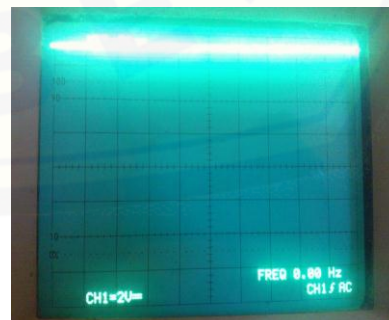
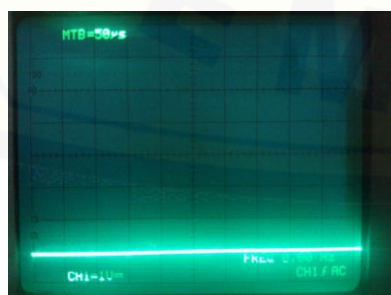
Q1=(!D & B & !A # D & !B & A);
Q2=(!D & C & !B # D & !C & B);
Q3=(!D & !C & A # D & C & !A);
Q4=(!D & !B & A # D & B & !A & P);
Q5=(!D & !C & B # D & C & !B & P);
Q6=(!D & C & !A # D & !C & A & P);
    
```

## C. Pengujian Rangkaian Driver

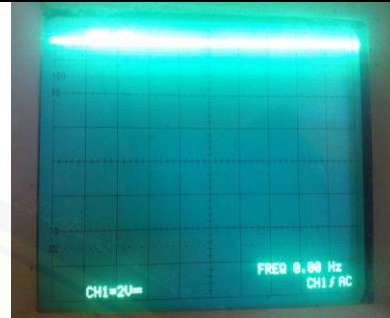
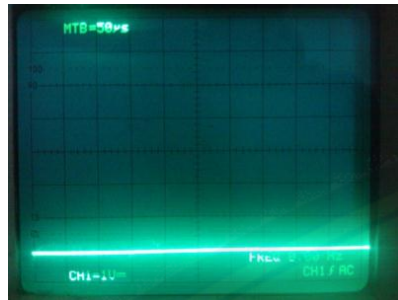
Pada Saat Kondisi Low

Pada Saat Kondisi High

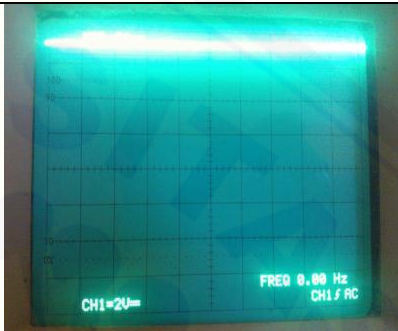
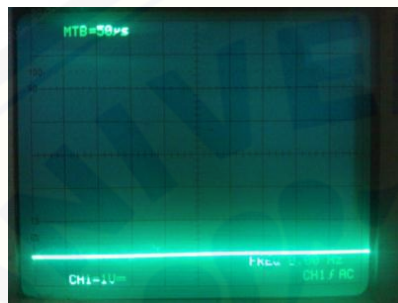
Q1



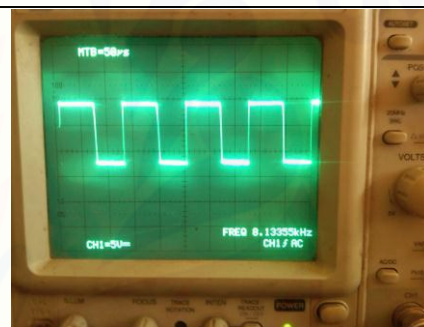
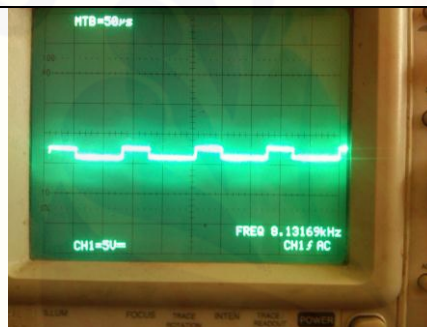
Q2



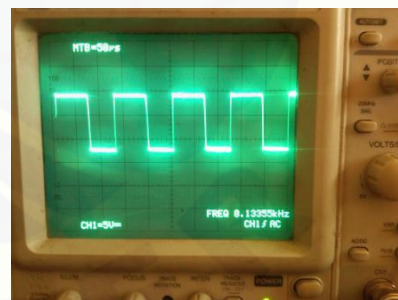
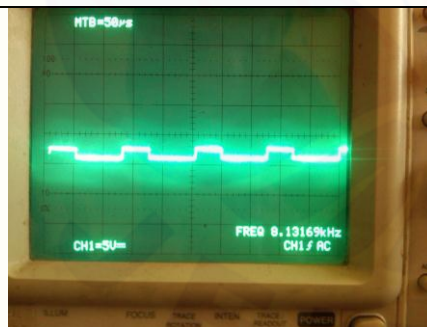
Q3



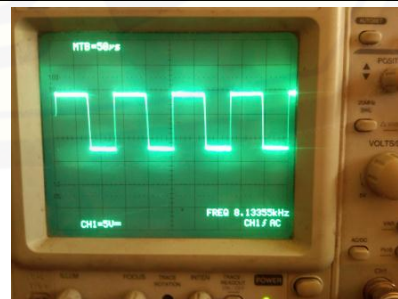
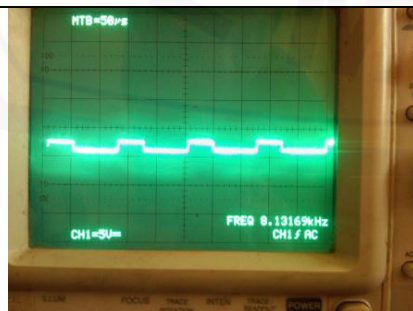
Q4



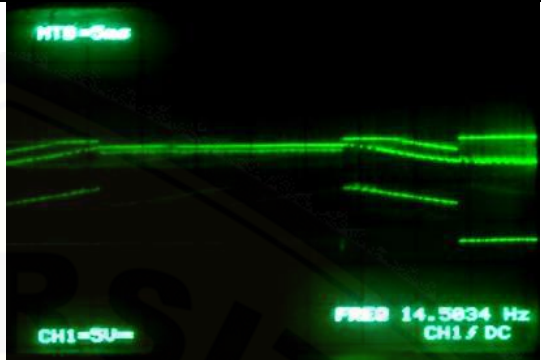

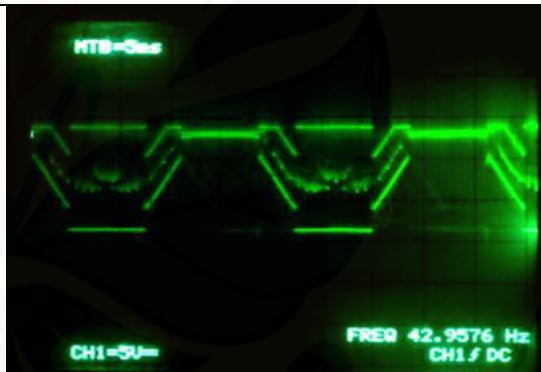

Q5



Q6



**D. Pengujian dan Analisa Kecepatan Motor Tanpa Beban**

Dutycycle (%)	Speed (rpm)	Bentuk Sinyal pada Fasa Motor
20,436	32,1	
40,397	62,0	
60,775	89,4	
80,418	116,2	

100,00

116,8



**E. Pengujian dan Analisa Kecepatan Motor Berbeban**

Tabel 4.5 Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 30%

Speed (rpm)	Beban ( $\Omega$ )	Tegangan Fasa (Vac)	Arus Fasa (I)
78,9	-	6,49	0,92
53,9	0,47	5,2	3,01
56,3	0,94	5,32	2,92
60,0	1,41	5,44	2,75
62,4	1,88	5,53	2,55

Tabel 4.6 Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 60%

Speed (rpm)	Beban ( $\Omega$ )	Tegangan Fasa (Vac)	Arus Fasa (I)
101,2	-	7,16	0,94
65,7	0,47	5,90	3,68
71,4	0,94	6,19	3,22
74,7	1,41	6,41	3,03
76,5	1,88	6,59	2,80

Tabel 4.7 Pengujian motor berbeban pada *dutycycle* 90%

Speed (rpm)	Beban ( $\Omega$ )	Tegangan Fasa (Vac)	Arus Fasa (I)
112,5	-	8,54	0,95
71,7	0,47	6,27	4,23
78,1	0,94	6,63	3,78
83,4	1,41	6,91	3,45
86,8	1,88	7,18	3,18



F. Datasheet MOSFET IRF640



IRF640, SiHF640

Vishay Siliconix

Power MOSFET

PRODUCT SUMMARY	
V <sub>DS</sub> (V)	200
R <sub>DS(on)</sub> (Ω)	V <sub>GS</sub> = 10 V   0.18
Q <sub>g</sub> (Max.) (nC)	70
Q <sub>gs</sub> (nC)	13
Q <sub>gd</sub> (nC)	39
Configuration	Single

FEATURES

- Dynamic dV/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements
- Compliant to RoHS Directive 2002/95/EC

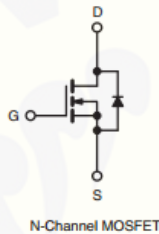
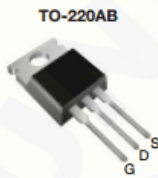


RoHS+ COMPLIANT

DESCRIPTION

Third generation Power MOSFETs from Vishay provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220AB package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 W. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220AB contribute to its wide acceptance throughout the industry.



ORDERING INFORMATION	
Package	TO-220AB
Lead (Pb)-free	IRF640PbF SiHF640-E3
SnPb	IRF640 SiHF640

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (T <sub>C</sub> = 25 °C, unless otherwise noted)					
PARAMETER			SYMBOL	LIMIT	UNIT
Drain-Source Voltage			V <sub>DS</sub>	200	V
Gate-Source Voltage			V <sub>GS</sub>	± 20	
Continuous Drain Current	V <sub>GS</sub> at 10 V	T <sub>C</sub> = 25 °C	I <sub>D</sub>	18	A
		T <sub>C</sub> = 100 °C		11	
Pulsed Drain Current <sup>a</sup>			I <sub>DM</sub>	72	
Linear Derating Factor				1.0	W/°C
Single Pulse Avalanche Energy <sup>b</sup>			E <sub>AS</sub>	580	mJ
Repetitive Avalanche Current <sup>a</sup>			I <sub>AR</sub>	18	A
Repetitive Avalanche Energy <sup>a</sup>			E <sub>AR</sub>	13	mJ
Maximum Power Dissipation	T <sub>C</sub> = 25 °C		P <sub>D</sub>	125	W
Peak Diode Recovery dV/dt <sup>c</sup>			dV/dt	5.0	V/ns
Operating Junction and Storage Temperature Range			T <sub>J</sub> , T <sub>stg</sub>	- 55 to + 150	°C
Soldering Recommendations (Peak Temperature)	for 10 s			300 <sup>d</sup>	
Mounting Torque	6-32 or M3 screw			10	
				1.1	N · m

Notes

- Repetitive rating; pulse width limited by maximum junction temperature (see fig. 11).
- V<sub>DD</sub> = 50 V, starting T<sub>J</sub> = 25 °C, L = 2.7 mH, R<sub>g</sub> = 25 Ω, I<sub>AS</sub> = 18 A (see fig. 12).
- I<sub>SD</sub> ≤ 18 A, di/dt ≤ 150 A/μs, V<sub>DD</sub> ≤ V<sub>DS</sub>, T<sub>J</sub> ≤ 150 °C.
- 1.6 mm from case.

G. Datasheet PAL16v10

TIBPAL 16L8-15C, TIBPAL 16R4-15C, TIBPAL 16R6-15C, TIBPAL 16R8-15C  
 TIBPAL 16L8-20M, TIBPAL 16R4-20M, TIBPAL 16R6-20M, TIBPAL 16R8-20M  
 HIGH-PERFORMANCE *IMPACT*™ PAL® CIRCUITS  
SRPS019A – FEBRUARY 1984 – REVISED APRIL 2000

- High-Performance Operation:  
 Propagation Delay  
 C Suffix ... 15 ns Max  
 M Suffix ... 20 ns Max
- Functionally Equivalent, but Faster Than  
 PAL16L8A, PAL16R4A, PAL16R6A, and  
 PAL16R8A
- Power-Up Clear on Registered Devices (All  
 Register Outputs Are Set High, but Voltage  
 Levels at the Output Pins Go Low)
- Package Options Include Both Plastic and  
 Ceramic Chip Carriers in Addition to  
 Plastic and Ceramic DIPs
- Dependable Texas Instruments Quality and  
 Reliability

DEVICE	I INPUTS	3-STATE O OUTPUTS	REGISTERED Q OUTPUTS	I/O PORTS
PAL16L8	10	2	0	6
PAL16R4	8	0	4 (3-state buffers)	4
PAL16R6	8	0	6 (3-state buffers)	2
PAL16R8	8	0	8 (3-state buffers)	0

description

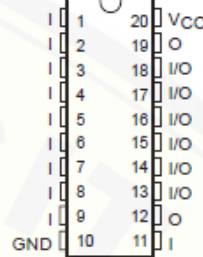
These programmable array logic devices feature high speed and functional equivalency when compared with currently available devices. These *IMPACT*™ circuits combine the latest Advanced Low-Power Schottky technology with proven titanium-tungsten fuses to provide reliable, high-performance substitutes for conventional TTL logic. Their easy programmability allows for quick design of custom functions and typically results in a more compact circuit board. In addition, chip carriers are available for further reduction in board space.

recommended operating conditions

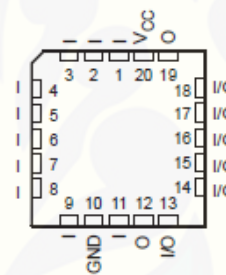
		MIN	NOM	MAX	UNIT
V <sub>CC</sub>	Supply voltage	4.75	5	5.25	V
V <sub>IH</sub>	High-level input voltage	2		5.5	V
V <sub>IL</sub>	Low-level input voltage			0.8	V
I <sub>OH</sub>	High-level output current			-3.2	mA
I <sub>OL</sub>	Low-level output current			24	mA
f <sub>clock</sub>	Clock frequency	0		50	MHz
t <sub>w</sub>	Pulse duration, clock (see Note 2)	High	8		ns
		Low	9		
t <sub>su</sub>	Setup time, input or feedback before clock ↑		15		ns
t <sub>h</sub>	Hold time, input or feedback after clock ↑		0		ns
T <sub>A</sub>	Operating free-air temperature	0	25	75	°C

NOTE 2: The total clock period of clock high and clock low must not exceed clock frequency, f<sub>clock</sub>. The minimum pulse durations specified are for clock high or low only, but not for both simultaneously.

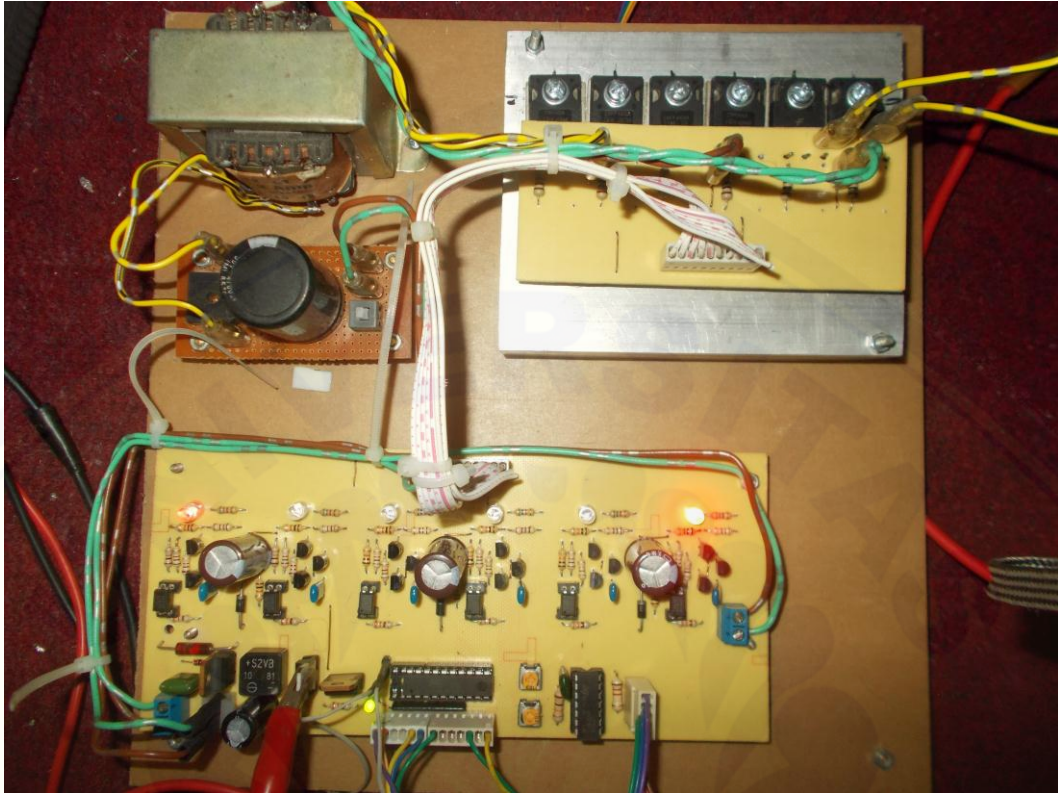
TIBPAL16L8'  
 C SUFFIX ... J OR N PACKAGE  
 M SUFFIX ... J OR W PACKAGE  
 (TOP VIEW)



TIBPAL16L8'  
 C SUFFIX ... FN PACKAGE  
 M SUFFIX ... FK PACKAGE  
 (TOP VIEW)



**F. Dokumentasi Alat**



JEMBER