



**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC 3 FASA
SENSORLESS TIPE KONSTRUKSI *OUT-RUNNER* DENGAN METODE
*SIX STEP COMMUTATION***

SKRIPSI

Oleh

MOH LUTFI YAZID

NIM 131910201093

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO STRATA 1

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2018



**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC 3 FASA
SENSORLESS TIPE KONSTRUKSI *OUT-RUNNER* DENGAN METODE
*SIX STEP COMMUTATION***

SKRIPSI

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

Oleh

MOH LUTFI YAZID

NIM 131910201093

PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO STRATA 1

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS JEMBER

2018

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya hingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini merupakan langkah awal kesuksesan yang saya raih untuk mendekati masa depan dan meraih cita-cita di dalam hidup saya. Dengan penuh rasa syukur dengan ketulusan hati saya persembahkan karya ini kepada :

1. Kedua orang tua saya ayahanda Imam Masyhuri dan ibunda Nasak Sukmawati yang tercinta, terimakasih yang sangat berlimpah karena telah mendidik, membesarkan, memberi cinta dan kasih sayang serta doa yang tiada putus hingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini dan saya persembahkan gelar yang saya dapatkan untuk mereka;
2. Kakak saya Feri Prastiya dan Adik saya Moh Affan Attamimi terkasih;
3. Dosen Pembimbing Utama Bapak Widyono Hadi dan Bapak Samsul Bachri atas kesabaran dan keikhlasan dalam membimbing saya menyelesaikan skripsi ini;
4. Teman-teman Teknik Elektro S1 maupun D3 angkatan 2013;
5. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

“Sesungguhnya Allah Ta’Ala tidak melihat pada bentuk-bentuk (lahiriah) dan harta kekayaanmu. Tapi, Dia melihat pada hati dan amalmu skalian.”

(H.R. Muslim)

“Jika seseorang memiliki ilmu, dia akan memasuki 3 tahap : Tahap yang pertama, dia akan sombong; Tahap yang kedua, dia akan tawadhu’ (rendah hati); Tahap yang ketiga, dia akan merasakan dirinya tidak ada apa-apanya.”

(Umar Bin Khattab)

“Kemuliaan orang adalah Agamanya, harga dirinya adalah Akalnya, sedangkan ketinggian kedudukannya adalah Akhlaknya.”

(H.R. Ahmad dan Al Hakim)

“Terkadang kita merasakan kegagalan disetiap ujian hidup yang Allah Ta’Ala berikan kepada kita, tetapi yakinlah bahwa disetiap kegagalan maka keberhasilan akan datang jika kita mau berusaha keras dan berdoa karena Allah sangat mencintai hamba-hambanya yang suka bersabar dan berdoa kepada-Nya.”

(Moh Lutfi Yazid)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Moh Lutfi Yazid

NIM : 131910201064

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa proyek akhir yang berjudul “Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC 3 Fasa *Sensorless* Tipe Konstruksi *Out-Runner* dengan Metode Six Step Commutation” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan dalam institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan saya buat dengan sebenarnya, tanpa ada tekanan dan paksaan dari pihak mana pun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata dikemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 25 Januari 2018

Yang menyatakan,

MOH LUTFI YAZID

NIM 131910201093

SKRIPSI

**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC 3 FASA
SENSORLESS TIPE KONSTRUKSI *OUT-RUNNER* DENGAN METODE
*SIX STEP COMMUTATION***

Oleh
MOH LUTFI YAZID
NIM 131910201093

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Ir. Widyono Hadi, M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Samsul Bachri M., S.T.,MM.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC 3 Fasa *Sensorless* Tipe Konstruksi *Out-Runner* dengan Metode Six Step Commutation” karya Moh Lutfi Yazid NIM: 131910201064 telah diuji dan disahkan pada :

hari, : Rabu

tanggal : 24 Januari 2018

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

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

Samsul Bachri M., S.T., MM.T.
NIP. 19640317 199802 1 001

Anggota II,

Anggota III,

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP. 19700404 199601 1 001

Catur Suko Sarwono, S.T., M.Si.
NIP. 19680119 199702 1 001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik
Universitas Jember,

Dr. Ir. Entin Hidayah M.U.M
NIP. 19661215 199503 2 001

RINGKASAN

“PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC 3 FASA *SENSORLESS* TIPE KONSTRUKSI *OUT-RUNNER* DENGAN METODE *SIX STEP COMMUTATION*”; Moh Lutfi Yazid 131910201093; 2018: 54 halaman; Program Studi Strata 1 (S1) Teknik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Jember.

Seiring dengan meningkatnya kemajuan teknologi sekarang ini, seperti di bidang teknologi, informasi/komunikasi, alat transportasi, dan sebagainya, maka motor listrik menjadi hal yang tidak bisa dipisahkan dari kemajuan teknologi tersebut. Motor-motor listrik dikembangkan untuk diaplikasikan dalam berbagai bidang. Jenis motor yang sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari 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

Pengaplikasian motor brushless DC *sensorless* yang penulis amati terdapat dalam ilmu robotika maupun kedirgantaraan misalnya: aeromodelling, multicopter, RC, Drone dll. 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.

Pada penelitian ini, maka dilakukan sebuah perancangan pengendalian motor arus searah tanpa sikat tiga fasa (*three-phase* BLDC). Desain konstruksi motor ini menggunakan tipe konstruksi *out-runner* (rotor berada di luar stator). Penelitian kali ini bertujuan untuk mengetahui beberapa karakteristik dari motor

BLDC 3 fasa seperti kecepatan, frekuensi, tegangan output, arus dan daya dari motor BLDC tiga fasa sensorless.

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa stator motor pertama yang memiliki jumlah lilitan 300 lilit Motor mulai berputar pada kondisi nilai PWM bernilai 150 atau tepatnya dengan duty cycle 58,82% dengan kecepatan awal 9095 RPM. Pada kondisi ini kecepatan motor mulai bertambah seiring bertambahnya nilai PWM yang diberikan. Kemudian pada saat nilai PWM dinaikkan menjadi 225, motor mengalami slip. Pada kondisi ini motor memiliki kecepatan yang tidak konstan., kecepatan motor akan cenderung turun bahkan motor berhenti berputar. Sehingga dalam penelitian ini dibatasi nilai PWM maximal pada nilai 200 atau dengan maximal duty cycle sebesar 75% agar tidak merusak motor. Pada percobaan ini juga kita tahu bahwa semakin besar nilai PWM (*duty cycle*) yang diberikan maka semakin cepat putaran motor atau dengan kata lain nilai PWM (*duty cycle*) berbanding lurus dengan kecepatan motor. Kemudian untuk hubungan antara kecepatan motor (RPM) terhadap arus yakni semakin tinggi nilai kecepatan motor (RPM) maka semakin tinggi juga arus yang didapat. Terbukti pada kecepatan 9095 rpm nilai arusnya 0,41 A , untuk kecepatan 10340 rpm nilai arus 0,45 A, pada kecepatan 11200rpm nilai arusnya 0,48 A, begitu seterusnya sampai kecepatan penuh yakni pada kecepatan 15480 rpm arus yang terpakai sebesar 0,56 A. Sedangkan hubungan kecepatan (RPM) terhadap tegangan *output*, semakin tinggi nilai kecepatan semakin tinggi pula tegangan *output* nya. Untuk hubungan kecepatan (RPM) terhadap daya. Dapat diketahui semakin tinggi nilai kecepatan semakin tinggi pula daya yang digunakan. Terbukti pada *sample* nilai untuk kecepatan 9095 rpm memiliki nilai dayanya 1,49 W, pada kecepatan 10340 rpm daya yang digunakan sebesar 1,82 W, begitu seterusnya nilai daya akan naik sampai kecepatan maksimal yakni 15480 rpm dengan daya yang digunakan sebesar 2,71 W

Pada jumlah lilitan total 450 lilit Motor mulai berputar pada kondisi nilai PWM bernilai 125 atau tepatnya dengan duty cycle 49% dengan kecepatan awal 5795 RPM. Pada kondisi ini kecepatan motor mulai bertambah seiring bertambahnya nilai PWM yang diberikan. Kemudian pada saat nilai PWM

dinaikkan menjadi 225, motor mengalami slip. Pada kondisi ini motor memiliki kecepatan yang tidak konstan, kecepatan motor akan cenderung turun bahkan motor berhenti berputar. Sehingga dalam penelitian ini dibatasi nilai PWM maximal pada nilai 200 atau dengan maximal duty cycle sebesar 75% agar tidak merusak motor. Pada percobaan ini juga kita tahu bahwa semakin besar nilai PWM (*duty cycle*) yang diberikan maka semakin cepat putaran motor atau dengan kata lain nilai PWM (*duty cycle*) berbanding lurus dengan kecepatan motor. Kemudian untuk hubungan antara kecepatan motor (RPM) terhadap arus yakni semakin tinggi nilai kecepatan motor (RPM) maka semakin tinggi juga arus yang didapat. Terbukti pada kecepatan 6000 rpm nilai arusnya 0,41 A, untuk kecepatan 9000 rpm nilai arus 0,42 A, pada kecepatan 12000 rpm nilai arusnya 0,43 A, begitu seterusnya sampai kecepatan penuh yakni pada kecepatan 24000 rpm arus yang terpakai sebesar 0,51 A. Sedangkan hubungan kecepatan (RPM) terhadap tegangan *output*, semakin tinggi nilai kecepatan semakin tinggi pula tegangan *output* nya. Untuk hubungan kecepatan (RPM) terhadap daya. Dapat diketahui semakin tinggi nilai kecepatan semakin tinggi pula daya yang digunakan. Terbukti pada *sample* nilai untuk kecepatan 6000 rpm memiliki nilai dayanya 1,4 W, pada kecepatan 9000 rpm daya yang digunakan sebesar 1,73 W, begitu seterusnya nilai daya akan naik sampai kecepatan maksimal yakni 24000 rpm dengan daya yang digunakan sebesar 3,62 W

SUMMARY

"THE 3 PHASES BRUSHLESS DC MOTOR SPEED CONTROL SENSORLESS TYPE CONSTRUCTION OUT-RUNNER BY USING SIX STEP COMMUTATION METHODS"; MOH LUTFI YAZID 131910201093; 2018: 54 pages; Programs study (S1) of engineering, Department of electrical engineering, Faculty of Engineering at Jember University.

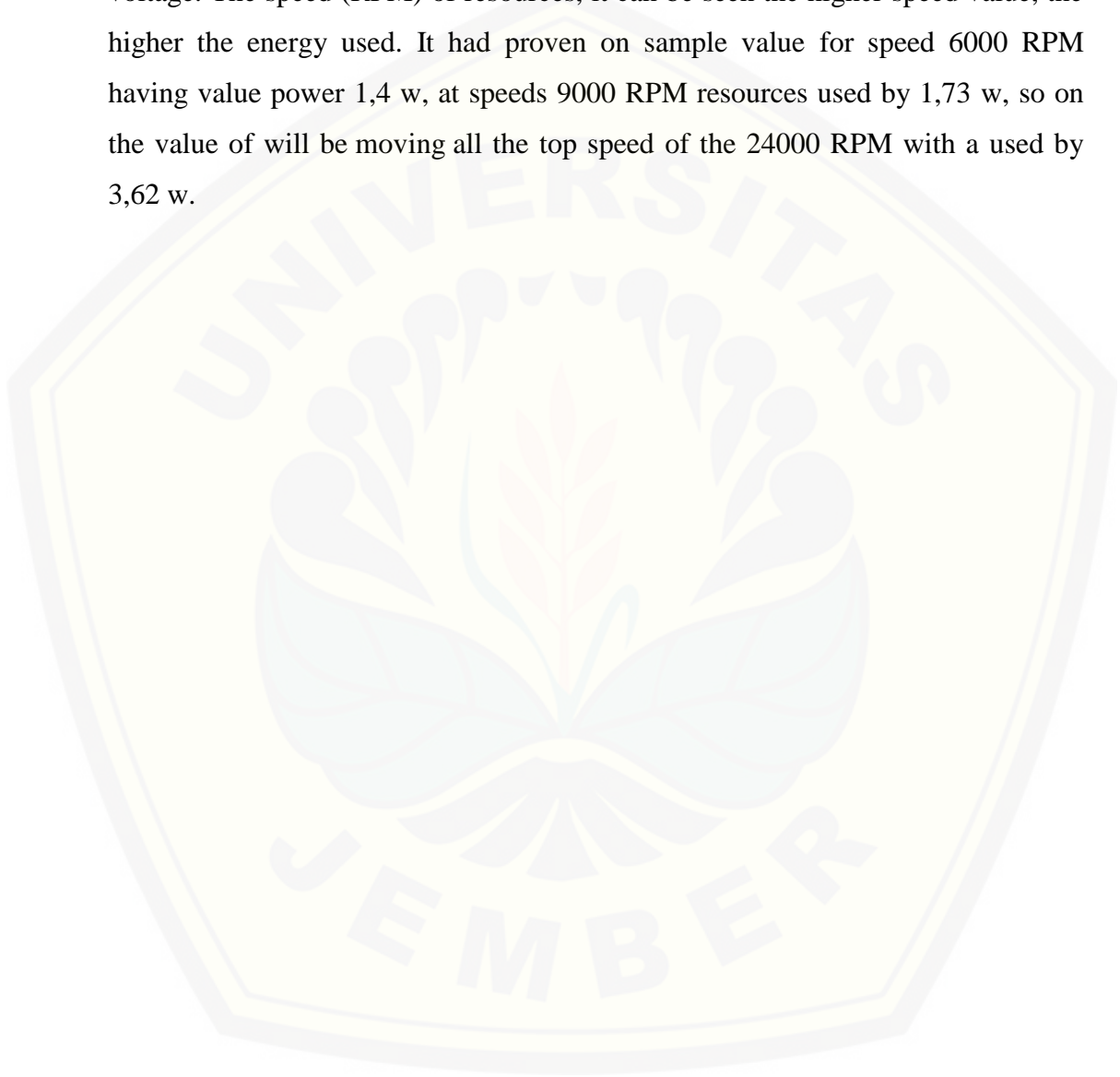
As the development of technological advance right now, such as the technology sector, information or communication, transportation, etc., caused the electric motor can't separate from the technological advance. Electric motors developed to apply in every sector. The kind of motor that used in daily life is a DC motor, because it's so easy to speed control of value voltage or field current. But, the DC motor uses a mechanical commutator (brush), therefore; it has a low reliability. It happens because there are brush losses and requires maintenance or periodic replacements. The weakness can be overcome by using Brushless DC motor that uses an electrical commutation, therefore; it has high efficiency and long operation time.

The application of the sensorless DC brushless motor that the writer observed is provided in the science of robotics and aerospace such as aeromodeling, multicopter, RC, Drone, etc. In order to BLDC can controlled it well (speed and constant torque), the timing of appropriate commutation changes is required. If the timing of the commutation change is not correct, the BLDC motor will slip. As a result of the slip is the speed and torque of the motor is not constant. Especially, it happens when the motor rotates at the high speed. When the slip occurs, the motor speed will tend to fall and it may be stopped when the motor is spinning.

In this research, a design of direct current motor control without three phases BLDC is used. This motor construction design uses an out-runner construction type (the rotor is outside the stator). The purpose of this research is to know some characteristic of 3 phase BLDC motor such as speed, frequency, output voltage, current and power from three sensorless phases BLDC motor. From the test results found that the first motor stator which has a number of 300

turns of motor rotates at the value of PWM value worth 150 or precisely with a 58.82% duty cycle with an initial speed of 9095 RPM. At this condition the motor speed starts to increase as the added PWM value is given. Then when the PWM value has increased to 225, the motor slips. In this condition the motor has a speed that is not constant. Motor speed will tend to go down even motor stop spinning. So in this study limited PWM maximal value at 200 or with maximal duty cycle of 75% so as not to damage the motor. In this experiment we also know that the greater the value of PWM (duty cycle) is given the faster rotation of the motor or in other words the value of PWM (duty cycle) is directly proportional to the speed of the motor. Then for the relationship between motor speeds (RPM) to the current that the higher the value of motor speed (RPM), the higher the current obtained. Proven at the speed of 9095 RPM the current value is 0.41 A, for speed 10340 RPM, current value 0.45 A, at a 11200 RPM speed of 1148rpm current value, soon up to full speed at 15480 RPM, current rate used is 0.56 A. While the relation speed (RPM) to the output voltage, the higher the speed value the higher the output voltage. For speed relation (RPM) to power it. It can be known the higher the speed value, the higher the power used. Proven on the sample value for the speed of 9095 RPM has a power value of 1.49 W, at a speed of 10340 RPM of power used for 1.82 W, so on the value of power will rise to a maximum speed of 15480 RPM with a power user of 2.71 W. On the total winding total 450 turns Motor starts spinning at the value of PWM value is worth 125 or rather with 49% duty cycle with initial speed 5795 RPM. At this condition the motor speed starts to increase as the added PWM value is given. Then when the PWM value has increased to 225, the motor slips. In this condition the motor has a speed that is not constant., Motor speed will tend to go down even motor stop spinning. So in this study limited PWM maximal value at 200 or with maximal duty cycle of 75% so as not to damage the motor. In this experiment we also know that the greater the value of PWM (duty cycle) is given the faster rotation of the motor or in other words the value of PWM (duty cycle) is directly proportional to the speed of the motor. Then for the relationship between motor speed (RPM) to the current that the higher the value of motor speed (RPM), the higher the current obtained.

Proven at speed 6000 RPM, current value 0.41 A, for speed 9000 RPM, current value 0.42 A, at 12000 RPM speed of 12000 RPM, current value 0.43 am, so on until full speed at speed 24000 RPM current used 0, 51 A. While the speed (RPM) against an output voltage, the higher speed value, the higher an output voltage. The speed (RPM) of resources, it can be seen the higher speed value, the higher the energy used. It had proven on sample value for speed 6000 RPM having value power 1,4 w, at speeds 9000 RPM resources used by 1,73 w, so on the value of will be moving all the top speed of the 24000 RPM with a used by 3,62 w.



PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahim.

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengendalian Kecepatan Motor Brushless DC 3 Fasa *Sensorless* Tipe Konstruksi *Out-Runner* dengan Metode Six Step Commutation”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi strata satu (S1) Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua tercinta yang telah memberikan dorongan semangat, motivasi, dukungan dan doanya demi terselesaikannya proyek akhir ini.
2. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah M.UM, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
3. Bapak Dr. Ir. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.
4. Bapak Dedy Kurnia Setiawan, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi S-1 Teknik Elektro Universitas Jember.
5. Bapak Ir. Widnyono Hadi, M.T. selaku dosen pembimbing utama dan Bapak Samsul Bachri M., S.T., MMT., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, tenaga guna memberikan bimbingan dan pengarahan serta dukungan materi dalam kelancaran penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Supriyadi Prasetyono, S.T., M.T., selaku dosen penguji 1 dan Bapak Catur Suko Sarwono, S.T., M.si., selaku dosen penguji 2 yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun sehingga sangat membantu terhadap penyempurnaan skripsi ini.
7. Seluruh Dosen Teknik Elektro Universitas Jember yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan bimbingan selama mengikuti pendidikan di Universitas Jember;

8. Keluarga besar Teknik Elektro khususnya angkatan 2013 (INTEL UNEJ), terimakasih atas dukungan dan motivasi yang kalian berikan.
9. Partner Skripsi Heristo Bramastya, Sofyan Ahmadi, Bima, Bayu setya, dll) yang telah membantu dalam proses pengujian skripsi.
10. Paguyuban KEMAPATA yang mana dari awal kuliah sampai saat ini selalu memberikan semangat, bantuan, pengalaman yang tak pernah terlupakan dalam memberikan sesuatu yang sangat berharga.
11. Teman-teman Kontrakan Brantas 14 yang hingga sekarang selalu memberikan dukungan untuk menyelesaikan skripsi.
12. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, terimakasih banyak yang mana telah mendukung dan memberikan semangat dalam penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa kesempurnaan hanya milik-Nya sehingga sebagai manusia biasa, penulis selalu terbuka terhadap masukan dan menerima segala kritik dan saran dari semua pihak yang sifatnya membangun demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan tidak lupa juga penulis menyampaikan permohonan maaf yang sebesar-besarnya jika terdapat kesalahan dan kekeliruan di dalam skripsi ini.

Jember, 16 Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY.....	xi
PRAKATA.....	xiv
DAFTAR ISI.....	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
1.6 Sistematika Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Motor <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC)	6
2.2 Prinsip Kerja BLDC	7
2.3 Metode <i>Six Step Commutation</i>	9
2.4 Inverter 3 Fasa	18
2.5 Arduino MEGA2560.....	19
2.7 Baterai Lithium Polimer	19
2.8 IDE Arduino	23

BAB 3. METODE PENELITIAN	25
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	25
3.2 Alat dan Bahan.....	25
3.3 Tahapan Penelitian	25
3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem	28
3.5 Model Motor BLDC 3 Fasa.....	30
3.6 Rencana Pengujian Kendali Motor BLDC 3 Fasa.....	30
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Analisa Data Pengujian	32
4.2 Pengujian dan Analisa Sinyal PWM.....	33
4.3 Pengujian dan Analisa Kontrol Motor	36
4.3.1 Pengaruh Perubahan PWM atau Dutycycle pada Motor 1	36
4.3.2 Pengaruh Perubahan PWM atau Dutycycle pada Motor 2.....	40
4.4 Hubungan Kecepatan Putar Motor BLDC 3 Fasa Sensorless terhadap Arus, Tegangan ,dan Daya	45
4.5 Perancangan Menggunakan Software Arduino.....	32
BAB 5. PENUTUP.....	58
5.1 Kesimpulan.....	54
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA	56
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Spesifikasi Arduino MEGA2560.....	16
2.2 Kelebihan dan kekurangan baterai <i>lithium-ion</i>	20
3.1 Spesifikasi Motor	30
3.2 Rencana Pengujian Motor BLDC 3 Fasa.....	31
4.1 Perubahan Bentuk Keluaran Sinyal PWM	34
4.2 Perbandingan Nilai PWM dengan Kecepatan dan Bentuk Sinyal Motor 1.	37
4.3 Perbandingan Nilai PWM dengan Kecepatan dan Bentuk Sinyal Motor 2.	41
4.4 Data Hasil Pengujian Kontrol Motor 1 PWM <i>six-step</i>	45
4.5 Data Hasil Pengujian Kontrol Motor 2 PWM <i>six-step</i>	48

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Bentuk Fisik Motor BLDC	7
2.2 Tipe Konstruksi Out-Runner pada Motor BLDC 3 Fasa.....	7
2.3 Tegangan stator BLDC	8
2.4 Proses pembangkitan sinyal.....	10
2.5 Clear up dan clear down	11
2.6 Sinyal PWM dengan variasi duty cycle.....	12
2.7 <i>Upper Phase</i> PWM.....	12
2.8 <i>Lower Phase</i> PWM	13
2.9 <i>Pre-sixty Degree</i> PWM.....	13
2.10 <i>Post-sixty Degree</i> PWM	13
2.11 Inverter 3 Fasa	14
2.12 Model Konduksi 120°	15
2.13 Arduino MEGA2560 R3 Bagian Depan.....	16
2.14 Baterai Lithium-Polimer.....	21
2.15 Tampilan IDE Arduino	24
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	26
3.2 Blok Diagram Sistem.....	28
3.3 Inverter Tiga Fasa	29
4.1 Rancangan Pengendali Motor BLDC	32
4.2 Motor BLDC 3 Fasa kontruksi Out-Runner	33
4.3 Grafik Hubungan Jumlah Lilitan Terhadap Kecepatan Putar Motor	51
4.4 Grafik hubungan PWM terhadap speed (RPM) Motor 1.....	40
4.5 Grafik hubungan PWM terhadap speed (RPM) Motor 2.....	44
4.6 Grafik hubungan speed (RPM) terhadap arus (A).....	46
4.7 Grafik hubungan speed (RPM) terhadap Tegangan	46
4.8 Grafik hubungan speed (RPM) terhadap daya (W)	47
4.9 Grafik hubungan speed (RPM) terhadap arus (A).....	48
4.10 Grafik hubungan speed (RPM) terhadap Tegangan	49

4.11	Grafik hubungan speed (RPM) terhadap daya (W)	49
4.12	Serial Monitor Arduini	52



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan meningkatnya kemajuan teknologi sekarang ini, seperti di bidang teknologi, informasi/komunikasi, alat transportasi, dan sebagainya, maka motor listrik menjadi hal yang tidak bisa dipisahkan dari kemajuan teknologi tersebut. Motor-motor listrik dikembangkan untuk diaplikasikan dalam berbagai bidang. Jenis motor yang sering digunakan dalam kehidupan sehari-hari 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 (Leonard N. Elevelich, 2005).

Motor dc tanpa sikat atau disebut *Brushless DC Motor* adalah suatu jenis motor-sinkron, artinya medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor berputar di frekuensi yang sama. Motor jenis ini mempunyai permanen magnet pada bagian rotor sedangkan elektro-magnet pada bagian statornya.

Brushless DC Motor memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan motor DC konvensional lainnya. Keunggulan yang paling utama dari motor jenis brushless yaitu menggunakan bahan semikonduktor untuk mengubah maupun membalik arah putaran motor, serta tingkat kebisingan motor jenis ini rendah karena putarannya yang halus. Kelemahan dari motor jenis ini yaitu harga yang relatif tinggi dibandingkan dengan motor DC konvensional pada umumnya dan juga harus adanya pengendali elektronik untuk memutar motor brushless itu sendiri.

Pengontrolan motor brushless sangat dibutuhkan dan hampir setiap penggemar motor *brushless* terlibat di dalamnya dengan mendesain sistem tersebut sesuai dengan apa yang mereka butuhkan. Setiap desain memiliki

spesifikasi kebutuhan dari motor yang akan digunakan seperti tenaga, kecepatan, kapan motor harus mulai berjalan dan kapan harus berhenti, dan tentu saja dengan mempertimbangkan efisiensi dari daya yang digunakan.

Bidang yang saya amati dalam kontrol motor *brushless direct current* (BLDC) selama ini yaitu pengaplikasian motor brushless DC *sensorless* dalam ilmu robotika maupun kedirgantaraan misalnya: aeromodelling, multicopter, RC, Drone dll. 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 (Abe Dharmawan, 2009).

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 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. Metode *six-step* merupakan metode yang sering digunakan dalam pengendalian *inverter* motor BLDC. Hal ini karena metode ini mudah diimplementasikan dan memiliki algoritma yang sederhana. Gelombang yang dihasilkan dari metode ini berbentuk *square* atau *trapezoid*.

Untuk mengatur besar tegangan input ke motor dapat dilakukan dengan mengatur PWM (*Pulsed Width Modulation*). Prinsip kerja metode ini adalah mengatur prosentase lebar pulsa *high* terhadap perioda dari suatu sinyal dari rangkaian *Op-Amp* atau dengan perangkat digital. Oleh karena itu dipakailah mikrokontroler. Penggunaan mikrokontroler memiliki beberapa keuntungan yaitu mudah di program dan rangkaian kontrol menjadi lebih sederhana.

Pada penelitian percobaan ini, dilakukan sebuah perancangan pengendalian motor BLDC tiga fasa *sensorless* yang menggunakan tipe *out-runner (external-rotor)* dengan memanfaatkan *Back-Emf Zero Crossing* dengan Metode *Six Step Commutation*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian singkat di atas, terdapat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan kontrol motor BLDC dengan Metode *Six Step Commutation*?
2. Bagaimana perangkat lunak kontrol motor BLDC dengan Metode *Six Step Commutation*?
3. Bagaimana kinerja dari kontrol motor BLDC dengan Metode *Six Step Commutation*?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan uraian rumusan masalah tersebut, maka pembahasan pada penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Motor BLDC yang digunakan adalah motor BLDC dengan tipe *out-runner sensorless* dengan 300 lilitan dan 350 lilitan yang masing-masing mempunyai 3 Pole
2. Sumber energi utama berupa tegangan DC 7,4 V dengan menggunakan baterai Li-Po 2S berkapasitas 1800 mAh
3. Tidak membahas secara mendetail tentang konstruksi motor BLDC.
4. Hubungan kecepatan yang digunakan pada kondisi tanpa beban.

1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Merancang kontrol motor BLDC dengan Metode *Six Step Commutation*.
2. Mendesain software kontrol motor BLDC dengan Metode *Six Step Commutation*.
3. Mengetahui kinerja dari kontrol motor BLDC dengan Metode *Six Step Commutation*.

1.5 Manfaat

Manfaat yang diharapkan setelah tujuan penelitian ini tercapai adalah dapat menghasilkan sistem kendali motor BLDC yang handal untuk penyelesaian masalah yang dihadapi selama ini terutama dalam bidang *aeromodelling* yang menggunakan *brushless* DC motor. Selain itu, diharapkan setelah melakukan penelitian ini yaitu untuk mendukung pengembangan ilmu pengetahuan tentang motor arus searah tanpa sikat (BLDC) tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* serta menjadi terobosan baru untuk melakukan penelitian selanjutnya mengenai rancang bangun pengendalian motor BLDC itu sendiri.

1.6 Sistematika Penelitian

Secara garis besar penyusunan proposal skripsi ini adalah sebagai berikut:

- a. PENDAHULUAN
Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika pembahasan.
- b. TINJAUAN PUSTAKA
Berisi penjelasan tentang teori yang berhubungan dengan penelitian.
- c. METODOLOGI PENELITIAN
Menjelaskan tentang metode kajian yang digunakan untuk menyelesaikan skripsi.

d. **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisi hasil penelitian dan analisa hasil penelitian.

e. **PENUTUP**

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari penulis



BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor *Brushless Direct Current* (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 magnet permanen 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.

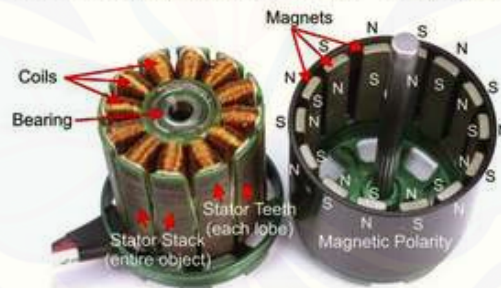
Oleh karena tidak adanya *brush* pada motor BLDC, untuk menentukan *timing* komutasi yang tepat pada motor ini sehingga didapatkan torsi dan kecepatan yang konstan, terdapat dua metode yang digunakan yakni metode sensorless dan dengan menggunakan sensor. Metode sensorless dilakukan dengan cara mendeteksi 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



Gambar 2.1 Bentuk Fisik Motor BLDC (Sumber: NEC Electronic, 2006)

Untuk tipe konstruksi dari motor BLDC 3 fasa ini terbagi menjadi 2 yaitu tipe konstruksi *out-runner* dan tipe konstruksi *in-runner*. Untuk tipe konstruksi *out-runner* ini digunakan jika ingin mendapatkan torsi yang tinggi, yang mana rotornya berada di luar stator. Sedangkan tipe konstruksi *in-runner* ini digunakan untuk mendapatkan kecepatan yang tinggi, yang mana rotornya berada di dalam stator motor (Victor Andrian, 2016).

OUTRUNNER COMPONENTS



Gambar 2.2 Tipe Konstruksi Out-Runner pada Motor BLDC 3 Fasa (Sumber: Victor Andrian, 2016)

2.2 Prinsip Kerja BLDC

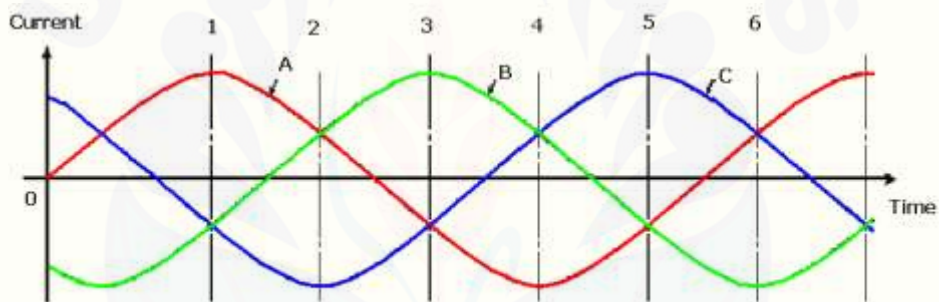
Motor BLDC ini dapat bekerja ketika *stator* yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada *stator* timbul medan magnet (B):

$$B = \frac{\mu Ni}{2l} \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan 1, 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.

$$Ns = \frac{120f}{P} \quad .2)$$

Berdasarkan persamaan 2, f merupakan frekuensi arus *input* dan p merupakan jumlah *pole rotor*. Motor BLDC berputar sebagai akibat dari interaksi magnet permanen pada *rotor* dengan medan magnet yang dihasilkan ketika tegangan AC terhubung pada satu kumparan *stator*. (NEC Electronic Corporation, 2006). Pada gambar 2.3 berikut ditunjukkan bentuk sinyal pada tegangan *stator* motor BLDC yang berupa sinyal tiga fasa.



Gambar 2.3 Tegangan stator BLDC (Sumber : Mahfud, 2017)

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).

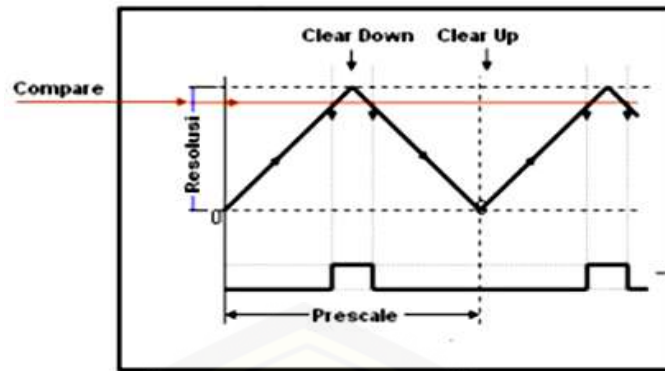
2.3.1 Metode Six Step Commutation

2.3.1 Dasar Pembangkitan PWM secara Digital

Metode PWM adalah metode yang cukup efektif untuk mengendalikan kecepatan motor. Cara kerjanya adalah mengatur prosentase lebar pulsa *high* terhadap perioda dari suatu sinyal persegi dalam bentuk tegangan periodik yang diberikan ke motor sebagai sumber daya. Semakin besar perbandingan lama sinyal *high* dengan perioda sinyal maka semakin cepat motor berputar.

Sinyal PWM dapat dibangun dengan menggunakan metode analog yakni dengan rangkaian *op-amp* atau dengan menggunakan metode digital. Dengan metode digital setiap perubahan PWM dipengaruhi oleh resolusi dari PWM itu sendiri. Misalkan PWM digital 8 bit berarti PWM tersebut memiliki resolusi 2 pangkat 8 = 256, maksudnya nilai keluaran PWM ini memiliki 256 variasi, variasinya mulai dari 0 – 255 yang mewakili *duty cycle* 0 – 100% dari keluaran PWM tersebut. Pada perancangan *driver* ini, sinyal PWM akan diatur secara digital yang dibangkitkan oleh mikrokontroler ATmega 16.

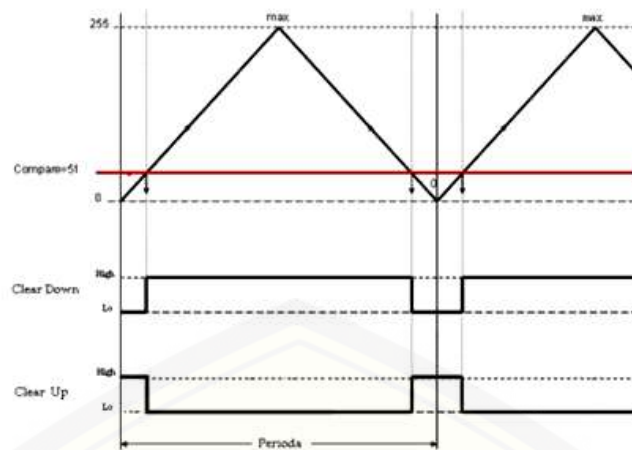
Proses pembangkitan sinyal PWM pada mikrokontroler AVR ATmega 16 ditunjukkan pada gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4. Proses pembangkitan sinyal (Sumber : Mahfud , 2017)

Resolusi adalah jumlah variasi perubahan nilai dalam PWM tersebut. Misalkan suatu PWM memiliki resolusi 8 bit berarti PWM ini memiliki variasi perubahan nilai sebanyak $2 \text{ pangkat } 8 = 256$ variasi mulai dari 0 – 255 perubahan nilai. *Compare* adalah nilai pembanding. Nilai ini merupakan nilai referensi *duty cycle* dari PWM tersebut. Nilai *compare* bervariasi sesuai dengan resolusi dari PWM. Dalam gambar nilai *compare* ditandai dengan garis warna merah, dimana posisinya diantara dasar segitiga dan ujung segitiga.

Clear digunakan untuk penentuan jenis komparator apakah komparator *inverting* atau *non-inverting*. Mikrokontroler akan membandingkan posisi keduanya, misalkan bila PWM diset pada kondisi *clear down*, berarti apabila garis segitiga berada dibawah garis merah (*compare*) maka PWM akan mengeluarkan logika 0. Begitu pula sebaliknya apabila garis segitiga berada diatas garis merah (*compare*) maka PWM akan mengeluarkan logika 1. Lebar sempitnya logika 1 ditentukan oleh posisi *compare*, lebar sempitnya logika 1 itulah yang menjadi nilai keluaran PWM, dan kejadian ini terjadi secara harmonik terus-menerus. Maka dari itu nilai *compare* inilah yang dijadikan nilai *duty cycle* PWM. *clear up* adalah kebalikan (*invers*) dari *clear down* pada keluaran logikanya. Pada Gambar 2.5 berikut ditampilkan perbedaan dari bentuk sinyal *clear up* dan *clear down*.



Gambar 2.5. Clear up dan clear down (Sumber : Mahfud , 2017)

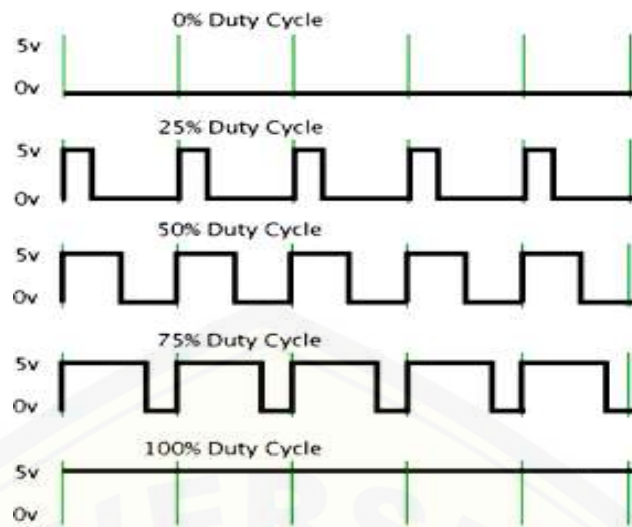
Prescale digunakan untuk menentukan waktu perioda dari pada PWM. Nilai prescale bervariasi yaitu 1, 8, 32, 64, 128, 256, 1024. Misalkan jika prescale diset 64 berarti timer/PWM akan menghitung 1 kali bila clock di CPU sudah 64 kali, Clock CPU adalah clock mikrokontroler itu sendiri. Perioda dari PWM dapat dihitung menggunakan rumus :

$$T = \left(\frac{1}{\text{clock CPU}} \right) \times \text{prescale} \times \text{resolusi} \dots\dots\dots(3)$$

Sedangkan untuk melakukan perhitungan duty cycle PWM adalah dengan cara mengatur lebar pulsa “on” dan “off” dalam satu perioda gelombang melalui pemberian besar sinyal referensi output dari suatu PWM akan didapat duty cycle yang diinginkan. Duty cycle dari PWM dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$\text{Duty cycle} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

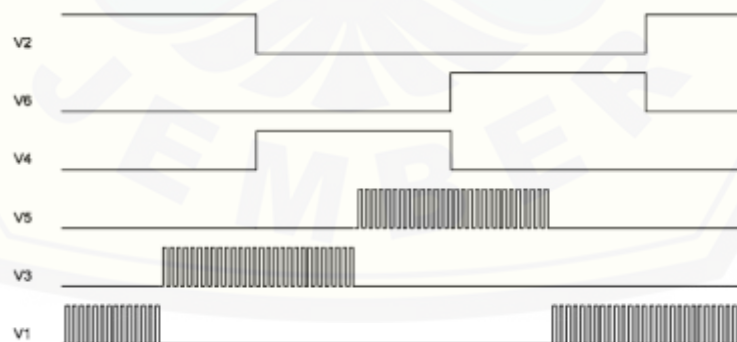
Duty cycle 100% berarti sinyal tegangan pengatur motor dilewatkan seluruhnya. Jika tegangan catu 100V, maka motor akan mendapat tegangan 100V. Pada duty cycle 50%, tegangan pada motor hanya akan diberikan 50% dari total tegangan yang ada, begitu seterusnya (Nugroho, Murti, & Rusdinar, 2010). Contoh sinyal PWM dengan dutycycle yang berbeda-beda dapat dilihat pada gambar 6 berikut.



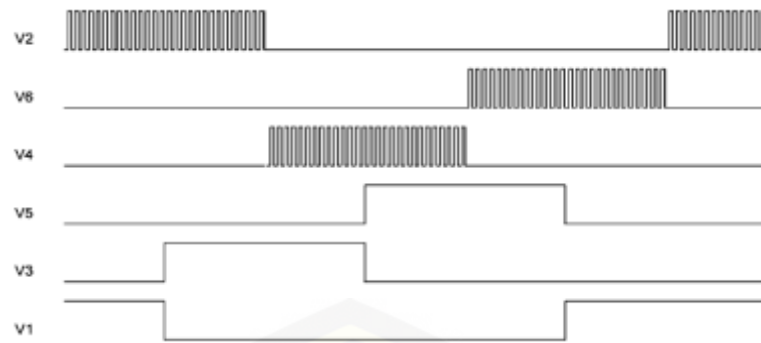
Gambar 2.6. Sinyal PWM dengan variasi duty cycle (Sumber : Mahfud , 2017)

2.3.2 Pengaturan Kecepatan dengan Kontrol PWM

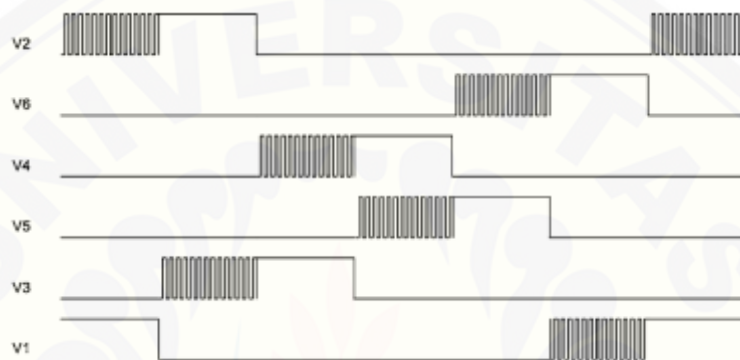
Seperti yang kita tahu, inverter di kontrol oleh suatu modulasi PWM, yang berarti bahwa inverter tersebut dapat mengubah-ubah tegangan *output* dengan *duty cycle* yang berbeda, hal inilah yang digunakan untuk mengontrol kecepatan. Setidaknya terdapat empat metode untuk menambahkan PWM ke sistem *switching* inverter tiga fasa yakni *Upper Phase* yang ditunjukkan pada gambar 2.7, *Lower Phase* yang ditunjukkan pada gambar 2.8, *Pre-Sixty Degree* yang ditunjukkan pada gambar 2.9 dan *Post-Sixty Degree* yang ditunjukkan pada gambar 2.7.



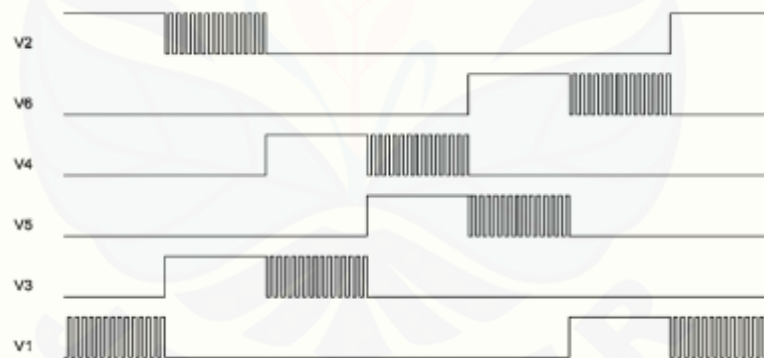
Gambar 2.7. *Upper phase* PWM (Sumber : Mahfud , 2017)



Gambar 2. 8. *Lower phase* PWM (Sumber : Mahfud , 2017)



Gambar 2.9. *Pre-sixty Degree* PWM (Sumber : Mahfud , 2017)

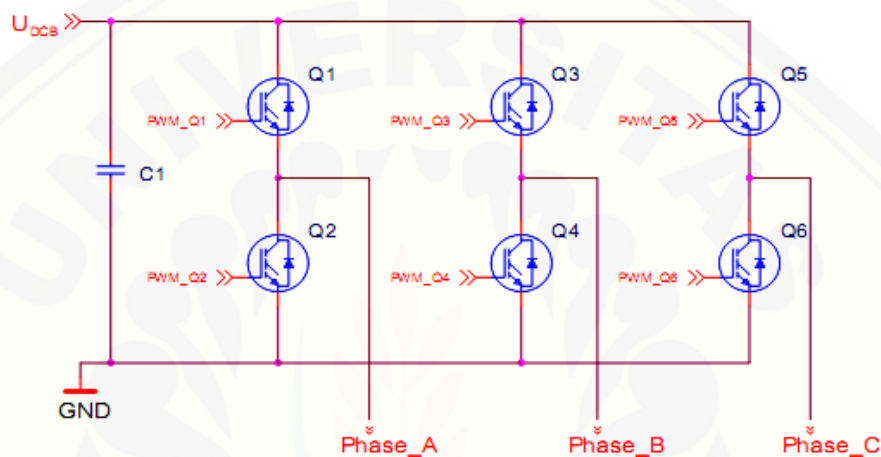


Gambar 2.10. *Post-sixty Degree* PWM (Sumber : Mahfud , 2017)

Dimana, mosfet bagian atas adalah V1, V3 dan V5 sedangkan mosfet bagian bawah adalah V2, V4 dan V6. PWM ditambahkan pada sinyal aktif high (Ganatama, 2014).

2.4 Inverter 3 Fasa

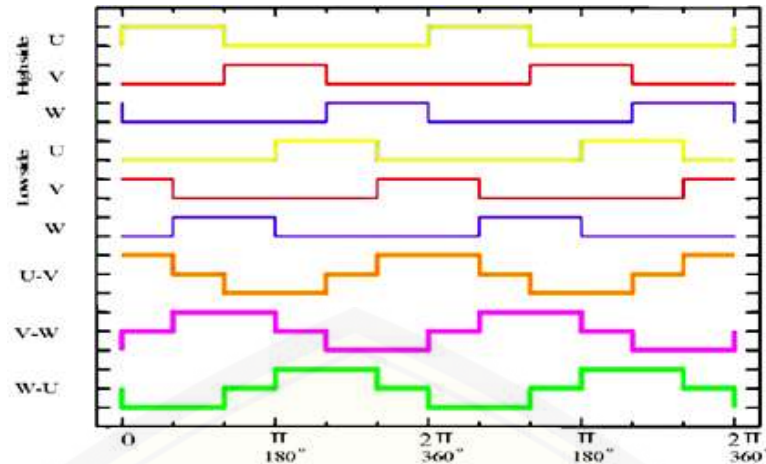
Untuk membangkitkan daya/tegangan dari sumber DC, maka digunakan *driver* 3 fasa. Definisi secara umum dari *inverter* adalah peralatan elektronika daya yang berfungsi mengubah tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC). Untuk BLDC diperlukan *inverter* 3 fasa yang terdiri dari 6 komponen *switching*. Pada perancangan alat ini menggunakan mosfet IRF 3205. Susunan dari keenam komponen *switching inverter* 3 fasa ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut.



Gambar 2.11 Inverter 3 fasa (Sumber: Leonard, 2005)

Terdapat 2 jenis mode operasi dari inverter jenis ini, yaitu mode konduksi 120° dan mode konduksi 180° . 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° yang digunakan. Inverter 3 fasa dengan mode konduksi 120° memungkinkan setiap komponen pensakelaran akan konduksi selama 120° dengan pasangan konduksi yang berbeda, seperti pada gambar 12, 60° pertama antara $U-\bar{V}$, dan 60° ke dua antara $U-\bar{W}$, kemudian $V-\bar{W}$, $V-\bar{U}$, $W-\bar{U}$, $W-\bar{V}$, $U-\bar{V}$ dan siklus berulang kembali.

Pada gambar 2.12 berikut merupakan bentuk sinyal untuk tiap *switching* dan tegangan antar fase yang dihasilkan pada mode konduksi 120° .



Gambar 2.12 Mode konduksi 120° (Sumber: Leonard, 2005)

2.5 Arduino MEGA2560

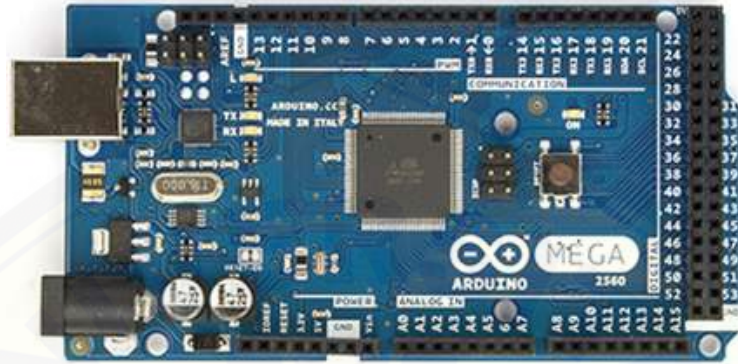
Arduino MEGA2560 adalah papan mikrokontroler berbasis ATMEGA2560. Arduino MEGA2560 memiliki 54 pin digital *input / output*, dimana 15 pin dapat digunakan sebagai output PWM, 16 pin sebagai input analog, dan 4 pin sebagai UART (port serial hardware), 16 MHz kristal *osilator*, koneksi USB, *jack power*, *header ICSP*, dan tombol *reset*. Ini semua yang diperlukan untuk mendukung mikrokontroler. Cukup dengan menghubungkannya ke komputer melalui kabel USB atau *power* dihubungkan dengan adaptor AC-DC atau baterai untuk mulai mengaktifkannya. Arduino MEGA2560 kompatibel dengan sebagian besar *shield* yang dirancang untuk Arduino Duemilanove atau Arduino Diecimila. Arduino MEGA2560 adalah versi terbaru yang menggantikan versi Arduino Mega.

Arduino MEGA2560 berbeda dari papan sebelumnya, karena versi terbaru sudah tidak menggunakan *chip driver* FTDI USB-to-serial. Tapi, menggunakan chip ATmega16U2 (ATmega8U2 pada papan Revisi 1 dan Revisi 2) yang diprogram sebagai konverter USB-to-serial. Arduino MEGA2560 Revisi 2 memiliki resistor penarik jalur HWB 8U2 ke Ground, sehingga lebih mudah untuk dimasukkan ke dalam mode DFU. Arduino MEGA2560 Revisi 3 memiliki fitur-fitur baru berikut:

- a. pinout : Ditambahkan pin SDA dan pin SCL yang dekat dengan pin AREF dan dua pin baru lainnya ditempatkan dekat dengan pin RESET, IOREF memungkinkan *shield* untuk beradaptasi dengan tegangan yang tersedia pada

papan. Di masa depan, shield akan kompatibel baik dengan papan yang menggunakan AVR yang beroperasi dengan 5 Volt dan dengan Arduino Due yang beroperasi dengan tegangan 3.3 Volt.

- b. Sirkuit RESET.
- c. Chip ATmega16U2 menggantikan chip ATmega8U2.



Gambar 2.13 Arduino MEGA2560 R3 Bagian Depan (Sumber: Atmel , 2007)

Dibawah ini spesifikasi sederhana dari Arduino MEGA2560 :

Tabel 2.1 spesifikasi Arduino MEGA2560

Mikrokontroler	ATMEGA2560
Tegangan Operasi	5V
Input Voltage (disarankan)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Pin Digital I/O	54 (yang 15 pin digunakan sebagai output PWM)
Pins Input Analog	16
Arus DC per pin I/O	40 mA
Arus DC untuk pin 3.3V	50 Ma
Flash Memory	256 KB (8 KB digunakan untuk bootloader)
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

Arduino Mega dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan catu daya eksternal. Sumber daya dipilih secara otomatis. Sumber daya eksternal (non-

USB) dapat berasal baik dari adaptor AC-DC atau baterai. Adaptor dapat dihubungkan dengan mencolokkan steker 2,1 mm yang bagian tengahnya terminal positif ke ke jack sumber tegangan pada papan. Jika tegangan berasal dari baterai dapat langsung dihubungkan melalui header pin Gnd dan pin Vin dari konektor POWER.

Papan Arduino ATMEGA2560 dapat beroperasi dengan pasokan daya eksternal 6 Volt sampai 20 volt. Jika diberi tegangan kurang dari 7 Volt, maka, pin 5 Volt mungkin akan menghasilkan tegangan kurang dari 5 Volt dan ini akan membuat papan menjadi tidak stabil. Jika sumber tegangan menggunakan lebih dari 12 Volt, *regulator* tegangan akan mengalami panas berlebihan dan bisa merusak papan. Rentang sumber tegangan yang dianjurkan adalah 7 Volt sampai 12 Volt.

Pin tegangan yang tersedia pada papan Arduino adalah sebagai berikut :

- a. VIN : Adalah *input* tegangan untuk papan Arduino ketika menggunakan sumber daya eksternal (sebagai 'saingan' tegangan 5 Volt dari koneksi USB atau sumber daya ter-regulator lainnya). Anda dapat memberikan tegangan melalui pin ini, atau jika memasok tegangan untuk papan melalui jack power, kita bisa mengakses atau mengambil tegangan melalui pin ini.
- b. 5V : Sebuah pin yang mengeluarkan tegangan ter-regulator 5 Volt, dari pin ini tegangan sudah diatur (ter-regulator) dari regulator yang tersedia (built-in) pada papan. Arduino dapat diaktifkan dengan sumber daya baik berasal dari jack power DC (7-12 Volt), konektor USB (5 Volt), atau pin VIN pada board (7-12 Volt). Memberikan tegangan melalui pin 5V atau 3.3V secara langsung tanpa melewati regulator dapat merusak papan Arduino.
- c. 3V3 : Sebuah pin yang menghasilkan tegangan 3,3 Volt. Tegangan ini dihasilkan oleh *regulator* yang terdapat pada papan (*on-board*). Arus maksimum yang dihasilkan adalah 50 mA.
- d. GND : Pin Ground atau Massa.
- e. IOREF : Pin ini pada papan Arduino berfungsi untuk memberikan referensi tegangan yang beroperasi pada mikrokontroler. Sebuah perisai (*shield*) dikonfigurasi dengan benar untuk dapat membaca pin tegangan IOREF dan memilih sumber daya yang tepat atau mengaktifkan penerjemah tegangan

(*voltage translator*) pada output untuk bekerja pada tegangan 5 Volt atau 3,3 Volt.

Masing-masing dari 54 digital pin pada Arduino Mega dapat digunakan sebagai input atau output, menggunakan fungsi `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()`. Arduino Mega beroperasi pada tegangan 5 volt. Setiap pin dapat memberikan atau menerima arus maksimum 40 mA dan memiliki resistor pull-up internal (yang terputus secara default) sebesar 20-50 kOhms. Selain itu, beberapa pin memiliki fungsi khusus, antara lain :

- a. Serial : 0 (RX) dan 1 (TX); Serial 1 : 19 (RX) dan 18 (TX); Serial 2 : 17 (RX) dan 16 (TX); Serial 3 : 15 (RX) dan 14 (TX). Digunakan untuk menerima (RX) dan mengirimkan (TX) data serial TTL. Pins 0 dan 1 juga terhubung ke pin chip ATmega16U2 Serial USB-to-TTL.
- b. Eksternal Interupsi : Pin 2 (interrupt 0), pin 3 (interrupt 1), pin 18 (interrupt 5), pin 19 (interrupt 4), pin 20 (interrupt 3), dan pin 21 (interrupt 2). Pin ini dapat dikonfigurasi untuk memicu sebuah interupsi pada nilai yang rendah, meningkat atau menurun, atau perubah nilai.
- c. SPI : Pin 50 (MISO), pin 51 (MOSI), pin 52 (SCK), pin 53 (SS). Pin ini mendukung komunikasi SPI menggunakan perpustakaan SPI. Pin SPI juga terhubung dengan header ICSP, yang secara fisik kompatibel dengan Arduino Uno, Arduino Duemilanove dan Arduino Diecimila.
- d. LED : Pin 13. Tersedia secara built-in pada papan Arduino ATMEGA2560. LED terhubung ke pin digital 13. Ketika pin diset bernilai HIGH, maka LED menyala (ON), dan ketika pin diset bernilai LOW, maka LED padam (OFF).
- e. TWI : Pin 20 (SDA) dan pin 21 (SCL). Yang mendukung komunikasi TWI menggunakan perpustakaan Wire. Perhatikan bahwa pin ini tidak di lokasi yang sama dengan pin TWI pada Arduino Duemilanove atau Arduino Diecimila.

Arduino MEGA2560 memiliki 16 pin sebagai *analog input*, yang masing-masing menyediakan resolusi 10 bit (yaitu 1024 nilai yang berbeda). Secara default pin ini dapat diukur/diatur dari mulai *ground* sampai dengan 5 Volt, juga memungkinkan untuk mengubah titik jangkauan tertinggi atau terendah mereka menggunakan pin AREF dan fungsi `analogReference()`.

Ada beberapa pin lainnya yang tersedia, antara lain :

- a. AREF : Referensi tegangan untuk input analog. Digunakan dengan fungsi `analogReference()`.
- b. RESET : Jalur LOW ini digunakan untuk me-reset (menghidupkan ulang) mikrokontroler. Jalur ini biasanya digunakan untuk menambahkan tombol *reset* pada *shield* yang menghalangi papan utama Arduino.

Arduino Mega dapat diprogram dengan *software* Arduino. ATMEGA2560 pada Arduino Mega sudah tersedia *preburned* dengan *bootloader* yang memungkinkan untuk meng-upload kode baru tanpa menggunakan programmer hardware eksternal. Hal ini karena komunikasi yang terjadi menggunakan protokol asli STK500 (<http://arduino.cc/>)

2.6 Baterai Lithium Polimer

Lithium-ion baterai merupakan tipe baterai *rechargeable* dimana *ion lithium* bergerak dari kutub negatif menuju positif selama proses *discharge* atau pemakaian dan akan mengalami hal sebaliknya ketika proses *charging* atau pengisian. Sifat kimia, performa, harga dan factor *safety* berbeda-beda diantara tipe baterai lithium.

Penggunaan baterai *lithium* saat ini menjadi hal umum di dunia terutama di sektor *consumer electronics*. Jenis baterai *rechargeable* ini sangat populer di dunia karena karakter *energy densities* yang baik, tidak ada *memory effect* dan hanya terjadi sedikit *energy losses* ketika baterai disimpan.

Selain banyak digunakan di sektor *consumer electronics*, *lithium* baterai juga banyak digunakan di bidang militer, mobil listrik dan aplikasi pesawat terbang. Riset untuk lebih mengembangkan teknologi baterai ini berfokus pada hal peningkatan *energy density*, daya tahan, biaya produksi dan keamanan.

Energy density dari *lithium-ion* battery lebih besar dua kali lipat dari baterai standar *nickel-cadmium* dan masih ada potensi untuk ditingkatkan di masa depan. Karakteristik *discharge* ketika diberi beban sangatlah baik dan memiliki perilaku yang sama dengan *nickel-cadmium*. Apabila kembali dibandingkan dengan baterai *nickel-cadmium* yang umum digunakan sebelumnya, besarnya *cell voltage* baterai *lithium-ion* yaitu 3,6 volt per *cell* membuat baterai ini bisa dipakai hanya dalam

satu *cell* untuk keperluan alat-alat elektronik sementara baterai *nickel cadmium* membutuhkan jumlah 3 kali lebih banyak karena nilai *voltage per cell* hanya 1,2 volt per *cell*.

Baterai *lithium-ion* merupakan jenis *low-maintenance battery* yang merupakan sebuah keuntungan karena tidak terdapat pada jenis baterai lainnya. Tidak ada *memory effect* dan tidak memerlukan perlakuan *recycle energy* untuk memperpanjang *lifetime*. Ketika terbakar, baterai ini juga memberikan dampak yang lebih sedikit (Ario Wibawa Satria, 2012).

Tabel 2.2 Kelebihan dan kekurangan baterai *lithium-ion*

Kelebihan	Kekurangan
<i>Energy density</i> besar	Membutuhkan <i>electronically circuit protection</i>
Tidak perlu <i>charging</i> lama saat baterai pertama kali digunakan. Cukup <i>charging regular</i>	Terjadi <i>aging</i> atau penuaan sejak selesai diproduksi
<i>Low-self discharge</i> . Kurang dari setengah dari <i>nickel-based battery</i> <i>Low maintenance</i>	Proses distribusi baterai yang ketat ketika dalam jumlah besar Mahal untuk diproduksi 40% lebih mahal dari <i>nickel-based battery</i>
Dapat mengeluarkan arus <i>discharge</i> yang besar untuk alat-alat seperti <i>power tools</i>	Komposisi kimia dapat berubah pada kondisi tertentu

Diluar berbagai keunggulannya tersebut, beberapa kelemahan juga dimiliki oleh baterai ini yakni baterai ini tergolong rapuh secara fisik dan membutuhkan *electronically circuit protection* eksternal untuk menjaganya tetap beroperasi secara aman.

Circuit protection ini berperan dalam menjaga dan membatasi nilai tegangan aman maksimal ketika proses *charging* serta menjaga dan membatasi nilai tegangan aman minimal ketika proses *discharging*. Fitur ini dalam *circuit protection* yaitu memonitor temperatur setiap *cell* untuk mencegahnya berada pada temperatur ekstrem.

Dari variabel arus, maksimum *charge* dan *discharge* baterai di setiap pack dibatasi antara 1C dan 2C. Dengan tindakan pencegahannya melalui *circuit protection* ini secara teoretikal kemungkinan penggunaan baterai *lithium-ion* sudah cukup aman.

Aging atau penuaan baterai adalah salah satu masalah yang belum teratasi oleh teknologi baterai ini. Semenjak selesai proses manufaktur dan keluar pabrik, baterai ini sudah memulai proses penuannya sendiri. Penurunan besar kapasitas baterai akan dimulai setahun setelah baterai selesai diproduksi dan akan terus menurun sepanjang waktu. Beberapa manufaktur melakukan klaim dua tahun hingga tiga tahun semenjak proses produksi bahwa baterai *lithium-ion* sudah tidak layak meskipun hanya disimpan dan belum sekalipun digunakan.

Secara berkala, manufaktur baterai *lithium-ion* melakukan perbaikan untuk meningkatkan kualitas baterai. Kombinasi unsur kimia baru diperkenalkan hampir setiap enam bulan sekali dan dengan cepatnya hal tersebut berjalan sangat sulit untuk menilai seberapa baik *lifetime* baterai ini.

Penyimpanan pada temperatur rendah memperlambat proses penuaan baterai *lithium-ion*. Produsen baterai menganjurkan temperature penyimpanan pada 15⁰ C atau 59⁰ F. Baterai juga diperlukan *charging* 40% kapasitasnya selama proses penyimpanan



Gambar 2.14 Baterai Lithium-Polimer (Sumber : Heristo, 2017)

Rating Baterai Li-Po

1. Tegangan (*Voltage*)

Pada baterai jenis NiCad atau NiMH tiap sel memiliki 1,2 volt sedangkan pada baterai Lipo memiliki rating 3,7 volt per sel. Keuntungannya adalah tegangan baterai yang tinggi dapat dicapai dengan menggunakan jumlah sel yang lebih sedikit.

Pada setiap paket baterai LiPo selain tegangan ada label yang disimbolkan dengan "S". Disini "S" berarti sel yang dimiliki sebuah paket baterai (battery pack). Sementara bilangan yang berada didepan simbol menandakan jumlah sel dan biasanya berkisar antar 2-6S (meskipun kadang ada yang mencapai 10S). Berikut adalah beberapa contoh notasi baterai LiPo.

- 3.7 volt battery = 1 cell x 3.7 volts
- 7.4 volt battery = 2 cells x 3.7 volts (2S)
- 11.1 volt battery = 3 cells x 3.7 volts (3S)
- 14.8 volt battery = 4 cells x 3.7 volts (4S)
- 18.5 volt battery = 5 cells x 3.7 volts (5S)
- 22.2 volt battery = 6 cells x 3.7 volts (6S)

2. Kapasitas (*Capacity*)

Kapasitas baterai menunjukkan seberapa banyak energi yang dapat disimpan oleh sebuah baterai dan diindikasikan dalam *miliampere hours* (mAh). Notasi ini adalah cara lain untuk mengatakan seberapa banyak beban yang dapat diberikan kepada sebuah baterai selama 1 jam, dimana setelah 1 jam baterai akan benar-benar habis.

Sebagai contoh sebuah baterai RC LiPo yang memiliki rating 1000 mAh akan benar-benar habis apabila diberi beban sebesar 1000 miliampere selama 1 jam. Apabila baterai yang sama diberi beban 500 miliampere, maka baterai akan benar-benar habis setelah selama 2 jam. Begitu pun apabila beban ditingkatkan menjadi 15.000 miliampere (15 Amps) maka energi di dalam baterai akan habis terpakai setelah selama 4 menit saja. (15 Amp merupakan jumlah beban yang umum digunakan pada RC kelas 400). Seperti yang telah dijelaskan, dengan

beban arus yang begitu besar maka merupakan sebuah keuntungan apabila menggunakan baterai dengan kapasitas yang lebih besar (misal 2000 mAh). Dengan begitu maka waktu discharge akan meningkat menjadi 8 menit.

3. Discharge Rate

Discharge rate biasa disimbolkan dengan “C” merupakan notasi yang menyatakan seberapa cepat sebuah baterai untuk dapat dikosongkan (discharge) secara aman. Sesuai dengan penjelasan diatas bahwa energi listrik pada baterai LiPo berasal dari pertukaran ion dari anoda ke katoda. Semakin cepat pertukaran ion yang dapat terjadi maka berarti semakin nilai dari “C”.

Sebuah baterai dengan discharge rate 10C berarti baterai tersebut dapat di discharge 10 kali dari kapasitas baterai sebenarnya. begitu juga 15C berarti 15 kali, dan 20C berarti 20 kali. dsb.

Mari gunakan contoh baterai 1000 mAh diatas sebagai contoh. Jika baterai tersebut memiliki rating 10C maka berarti baterai tersebut dapat menahan beban maksimum hingga 10.000 miliampere atau 10 Ampere. (10×1000 miliampere = 10 Ampere). Angka ini berarti sama dengan 166 mA per menit, maka energi baterai 1000 mAh akan habis dalam 6 menit. Angka ini berasal dihitung dengan mengkalkulasi jumlah arus per menitnya. $1000 \text{ mAh} \div 60 \text{ menit} = 16,6 \text{ mA}$ per menit. Lalu kemudian kalikan 16,6 dengan C rating (dalam hal ini 10) = 166 mA beban per menit. Lalu bagi 1000 dengan 166 = 6,02 menit.

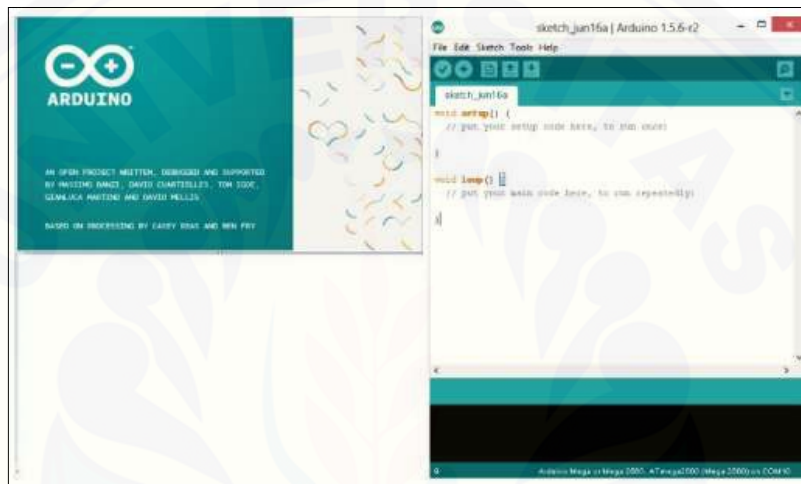
2.7 IDE Arduino

Software Arduino yang akan digunakan adalah driver dan IDE. IDE diciptakan untuk para pemula bahkan yang tidak memiliki *basic* bahasa pemrograman sama sekali karena menggunakan bahasa C++ yang telah dipermudah melalui *library*. IDE Arduino adalah *software* canggih yang ditulis dengan menggunakan bahasa Java. *Software* IDE Arduino terdiri dari 3 (tiga) bagian:

1. Editor program, untuk menulis dan mengedit program dalam bahasa *processing*. *Listing program* pada Arduino disebut *sketch*.

2. *Compiler*, sebuah modul yang berfungsi mengubah bahasa *processing* (kode program) menjadi kode biner karena kode biner merupakan bahasa program yang dipahami oleh mikrokontroler.
3. *Uploader*, sebuah modul yang berfungsi memasukkan kode biner ke dalam memori mikrokontroler.

Struktur perintah pada Arduino secara garis besar terdiri dari dua bagian yaitu *void setup* dan *void loop*. *Void setup* berisi perintah yang akan dieksekusi hanya satu kali sejak Arduino dihidupkan sedangkan *void loop* berisi perintah yang akan dieksekusi berulang-ulang selama Arduino dinyalakan.



Gambar 2.15. Tampilan IDE Arduino (Sumber : <https://www.arduino.cc/>)

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

A. Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Sistem Kendali Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Slamet Riyadi No. 62 Patrang, Jember 68111.

B. Waktu Penelitian

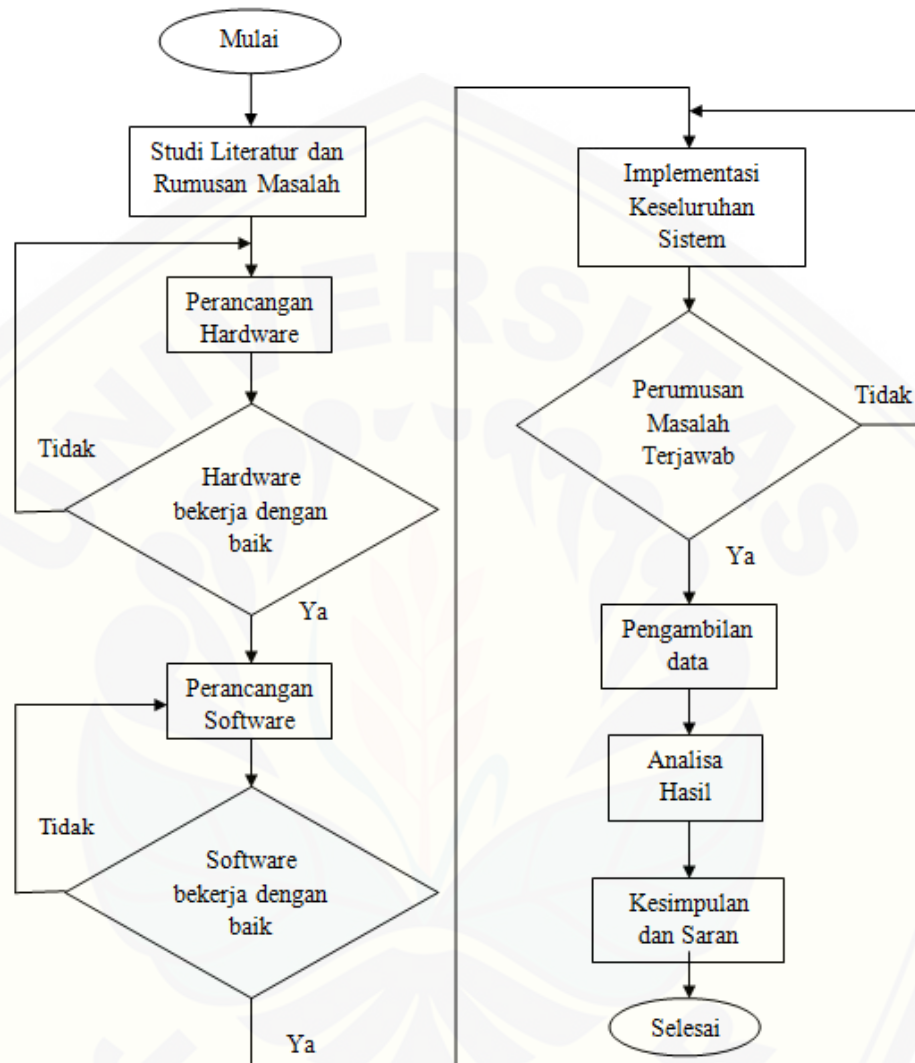
Waktu penelitian dilaksanakan selama 1 bulan. Pada bulan Juli 2017 sampai Desember 2017.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Multimeter
- b. Driver motor *brush less* DC
- c. Motor *brush less* DC
- d. Tacho meter
- e. *Power supply*
- f. *Personal computer*
- g. Arduino NANO
- h. *Software arduino*
- i. *Osciloscop (Software Virtin)*
- j. Baterai *LI-PO 2s* 12 Volt 1800 Mah

3.3 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir 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 sistem rangkaian *power supply*, *driver mosfet*, *inverter 3 fasa*, dan arduino Mega

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

3. Perancangan Software

Software yang diperlukan berupa program arduino, dimana program di arduino ini antara lain berupa masukan nilai kecepatan.

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

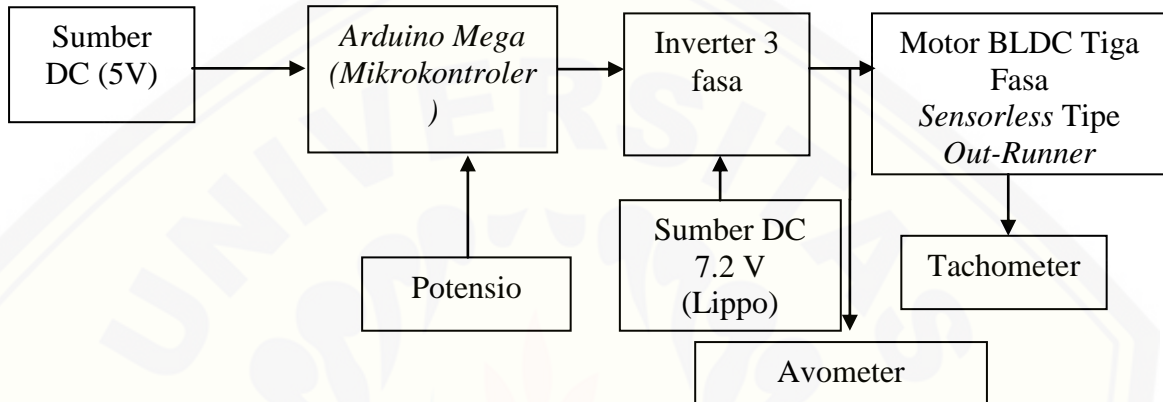
Setelah melakukan pengujian keseluruhan sistem bekerja dengan baik dan hasilnya memenuhi target, maka yang dilakukan selanjutnya adalah pengambilan data yang diperlukan dan kemudian dianalisa data yang telah didapatkan

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

3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem

Pada penelitian ini, perangkat yang digunakan dalam sistem pengendalian BLDC dengan metode Six Step Commutation terdiri dari Laptop, *potensiometer*, arduino Mega, Inverter 3 fasa, motor BLDC, dan *battery* LI-PO 7,2 V.



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

Dari gambar diagram blok diatas dapat diketahui cara kerja dari perancangan Pengendali Motor BLDC 3 Fasa *Sensorless* type out-runner dengan Metode Six Step Commutation. Prinsip kerja dari penelitian ini yaitu dalam perancangan sistem kontrol Motor BLDC digunakan arduino Mega sebagai mikrokontroler untuk pengontrolan dari inverter 3 Fasa untuk memutar motor BLDC.

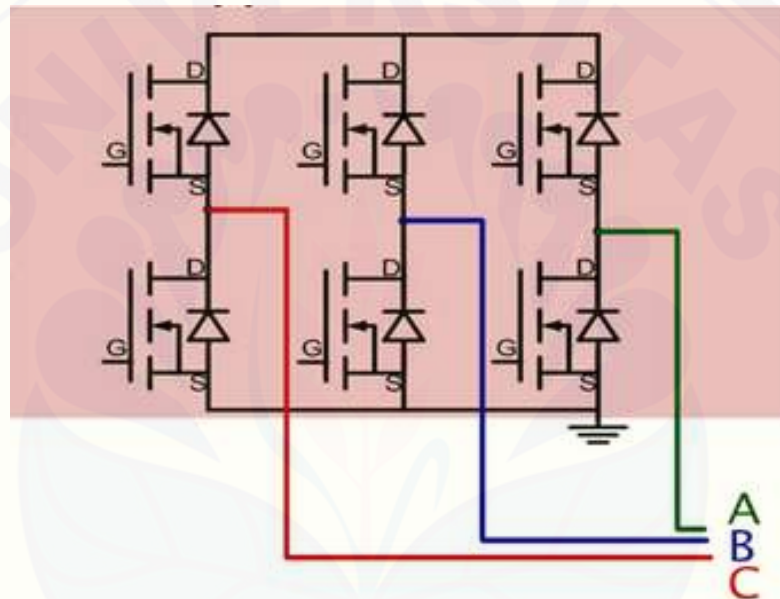
Komponen-komponen yang terdapat pada sistem ini terdiri atas beberapa macam diantaranya:

a. **Arduino Mega**

Rangkaian kontroler pada penelitian ini menggunakan Arduino Mega yang bertindak sebagai pusat kendali dari sistem ini. Arduino memiliki kelebihan dibanding menggunakan mikrokontroler seperti jika ditinjau dari segi bahasa pemrograman cukup mudah, handal, banyak di pasaran dan harganya relatif terjangkau, selain itu Arduino bisa langsung digunakan tanpa harus membuat sistem minimum sebagai sistem pendukungnya.

b. Inverter Tiga Fasa

Inverter tiga fasa berfungsi sebagai pengendali motor BLDC. Inverter tiga fasa dirancang menggunakan enam buah saklar semikonduktor berupa *mosfet* dengan tipe IRF 3205, di mana masing-masing bagian sakelar diparalel dua buah *mosfet* agar dapat melewati arus dua kali lebih besar seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Inverter tiga fasa (Sumber : www.electrionoobs.com/)

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

$$P_{3\phi} = 3 \times V_L \times I_L \times \cos\phi$$

Dimana :

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

V_L = tegangan fasa (volt)

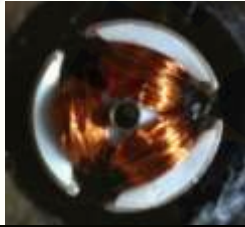
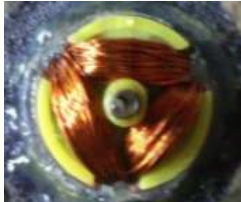
I_L = arus fasa

$\text{Cos}\varphi$ = faktor daya.

3.5 Model Motor BLDC 3 Fasa

Pada skripsi kali ini, motor BLDC yang digunakan seperti yang ditunjukkan pada gambar 15 beserta spesifikasinya.

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor

Motor BLDC 3 Fasa Sensorless	Jumlah Lilitan (N)	Resistansi Motor (Ohm)	Frekuensi Input (kHz)	Kuat Medan Magnet (T)
	300	6,3 Ω	Hz	0,067 T
	450	8,7 Ω	Hz	0,1064 T

3.6 Rencana Pengujian Kendali Motor BLDC 3 Fasa

Pada penelitian ini menggunakan rencana pengujian pengendali motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* untuk mendapatkan berbagai macam parameter data sesuai yang diharapkan. Parameter data ini diperlukan untuk mendapatkan hasil seperti kecepatan, arus, tegangan, maupun frekuensi yang terdapat pada motor melalui beberapa tahapan pengujian. Dan pengujian tersebut hanya diuji pada frekuensi, tegangan *input*, arus *input*, dan kecepatan motor BLDC 3 fasa ini.

Sehingga pada pengujian tersebut memiliki beberapa parameter data yang diambil agar sesuai dengan yang diharapkan yaitu sebagai berikut :

Tabel 3.2 Rencana Pengujian Motor BLDC 3 Fasa

Pengendali	V (volt)	I (A)	P (Watt)	n_r (Rpm)	F (Hz)	PWM
Motor 1 (300 Lilitan)	xx	xx	xx	xx	xx	xx
Motor 2 (450 Lilitan)	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Dari rencana pengujian tersebut, pengujian dilakukan untuk mendapatkan kecepatan putar motor (Rpm) menggunakan alat ukur kecepatan yaitu tachometer, arus masukan pada motor (A) dengan menggunakan multimeter, tegangan masukan pada motor (V) juga menggunakan multimeter, frekuensi pada motor (Hz) menggunakan oscilloscope, nilai PWM pada arduino , serta bentuk gelombang dari metode *six step commutation*. Sehingga akan didapatkan karakteristik dari pengujian tersebut dan pengaruh PWM terhadap perubahan kecepatan putar motor BLDC 3 fasa, pengaruh kecepatan putar motor terhadap arus, tegangan, dan daya pada motor, serta juga dapat diketahui perbandingan kecepatan pada motor 1 dan motor 2.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dari hasil pengujian yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain:

1. semakin besar nilai PWM (*duty cycle*) yang diberikan maka semakin cepat putaran motor atau dengan kata lain nilai PWM (*duty cycle*) berbanding lurus dengan kecepatan motor
2. Pada pengujian kecepatan motor BLDC 3 fasa didapatkan kecepatan tertinggi pada motor dengan menggunakan stator pertama dengan jumlah lilitan 450 lilit yaitu sebesar 20.258 rpm. Sedangkan untuk motor dengan menggunakan stator kedua dengan jumlah lilitan 300 lilit kecepatannya hanya 13.884 rpm. Hal ini terjadi karena semakin banyak jumlah lilitan kawat tembaga yang digunakan maka kecepatan yang dihasilkan oleh motor BLDC 3 fasa *sensorless* semakin meningkat.
3. Kecepatan putar motor dapat mempengaruhi arus, tegangan dan daya pada motor. Pada saat kecepatan motor jika kecepatan motor semakin besar arus, tegangan, dan daya motor akan semakin bertambah.
4. Salah satu kelebihan dari sistem arduino ini adalah, kita dapat memprogram sesuai kebutuhan. Dari percobaan yang telah dilakukan pada motor 1 , kita dapat mengetahui nilai PWM saat motor mulai berjalan yaitu pada PWM 125 sedangkan motor mencapai maksimal kecepatan pada PWM 200, sehingga kita tinggal mengatur pemetaan pada programnya seperti ini `val = map(val, 0, 1023, 125, 200)`; sehingga sistem ini akan berjalan dengan baik sesuai parameter yang telah ditentukan, dan motor tidak akan mengalami slip pada saat kita mengatur nilai potensiometer pada kondisi maksimal

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, maka dapat diambil beberapa saran antara lain:

1. Perlu diperhatikan diteliti lebih lanjut dengan data perhitungan mengenai maksimal kecepatan pada tiap-tiap motor.
2. Dilakukan perbandingan antara motor BLDC dengan konstruksi Out-Runner dengan konstruksi In-runner dengan spesifikasi motor sama pada tiap lilitan
3. Pada penelitian selanjutnya diharapkan lebih teliti dalam pembuatan maupun perancangan pengendali BLDC agar menggunakan konstruksi yang lebih presisi pada motor BLDC tiga fasa *sensorless* agar pada saat poses komutasi motor berputar dengan lebih halus dan juga tidak menimbulkan gesekan antara stator dengan rotor motor.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrean, Victor. 2016. Rancang Bangun Sistem Pengereman Regeneratif *Brushless* DC Motor Menggunakan *Bidirectional Voltage Source Inverter* (VSI). *Skripsi*. Malang : Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Universitas Brawijaya.
- Atmel. 2007. *8-bit AVR with 16 KBytes In-System Programmable Flash Atmega16, Atmega16L*. San Jose: Atmel.
- Bramastya, Heristo. 2017. *Motor BLDC 3 Fasa Sensorless dengan Kontruksi Out-Runner*. Universitas Jember.
- Christian, Felix Lukman. 2013. *Pengendali Kecepatan Motor DC Brushless Menggunakan Microcontroller AVR*. Jakarta : Universitas Bina Nusantara.
- Dharmawan, Abe. 2009. Pengendalian Motor Brushless DC Dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan ATMEGA 16. *Skripsi*. Depok : Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- Elevich, Leonard N. 2005. *3-Phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using 56800/E Digital Signal Controllers*. *Freescale Semiconductor, Inc* (2002,2005).
- Gamazo-Real, Jose Carlos, Ernesto Vazquez-Sanchez and Jalme Gomez-Gill. 2010. *Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends*. *Paper*. Valladolid : Department of Signal Theory, Communication and Telematic Engineering University of Valladolid.
- Gao, Xianhu. 2013. *BLDC Motor Control with Hall Sensors Based on FRDM-KE02Z*. *Freescale Semiconductor, Inc* (2013).
- Kurniawan, Aditya Rizky. 2016. Rancang Bangun Motor Searah Tanpa Sikat Satu Fasa. *Skripsi*. Jember : Teknik Elektro Universitas Jember.
- Li, Kun, Ao Chen, Kun Zhang and Ben M. Chen. *Improved Efficiency Electronic Speed Controller Development for 3-Phase Brushless DC Motor in Unmanned Aerial Systems*. *Paper*. Singapore : Department of Electrical and Computer Engineering, NUS.

- Sovan, Bayu. 2017. *Rancang Bangun kontrol Motor Brushless Direct Current dengan Metode PWM Sinusoidal*. Universitas Jember.
- Marks, David. 2012. *Electric Motors for Machines and Mechanisms. Inductory Session*. East Aurora, New York : Moog, Inc.
- Mustofa, Prof. Dr. Ir. H. Didik Notosudjono, M. Sc. dan Ir. Dede Suhendi, M.T. 2014. *Perancangan Pembangkit Listrik Menggunakan Generator Magnet Permanen dengan Motor DC Sebagai Prime Mover*. Bogor : Teknik Elektro Universitas Pakuan Bogor.
- 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
- Shao, Jianwen. 2003. *Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives*. Virginia Polytechnic Institute and the State University.
- Sovan, Bayu. 2014. *Rancang Bangun Sistem Pengendali Motor Brushless Dc Untuk Aplikasi Pada Mobil Listrik*. Universitas Jember
- <http://electronoobs.com/> Diakses pada tanggal 22 Maret 2017.
- <http://www.arduino.cc/> Diakses pada tanggal 22 Maret 2017.



LAMPIRAN

LAMPIRAN 1
PERHITUNGAN

1. Perhitungan Daya

$$\text{Motor 1 } P_{Rpm} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{9000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{9000} = \sqrt{3} \times 2,11 \times 0,41$$

$$P_{9000} = 1,49 \text{ W}$$

$$P_{10000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{10000} = \sqrt{3} \times 2,34 \times 0,45$$

$$P_{10000} = 1,82 \text{ W}$$

$$P_{11000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{11000} = \sqrt{3} \times 2,66 \times 0,48$$

$$P_{11000} = 2,21 \text{ W}$$

$$P_{12000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{12000} = \sqrt{3} \times 2,7 \times 0,5$$

$$P_{12000} = 2,33 \text{ W}$$

$$P_{13000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{13000} = \sqrt{3} \times 2,74 \times 0,52$$

$$P_{13000} = 2,46 \text{ W}$$

$$P_{14000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{14000} = \sqrt{3} \times 2,77 \times 0,55$$

$$P_{15000} = 2,63 \text{ W}$$

$$P_{15000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{15000} = \sqrt{3} \times 2,8 \times 0,56$$

$$P_{15000} = 2,71 \text{ W}$$

Motor 2 $P_{Rpm} = \sqrt{3} \times V \times i$

$$P_{6000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{6000} = \sqrt{3} \times 2,04 \times 0,41$$

$$P_{6000} = 1,4 \text{ W}$$

$$P_{9000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{9000} = \sqrt{3} \times 2,38 \times 0,42$$

$$P_{9000} = 1,73 \text{ W}$$

$$P_{12000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{12000} = \sqrt{3} \times 2,66 \times 0,43$$

$$P_{12000} = 1,98 \text{ W}$$

$$P_{15000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{15000} = \sqrt{3} \times 2,81 \times 0,44$$

$$P_{15000} = 2,14 \text{ W}$$

$$P_{18000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{18000} = \sqrt{3} \times 3,12 \times 0,46$$

$$P_{18000} = 2,48 \text{ W}$$

$$P_{21000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{21000} = \sqrt{3} \times 3,6 \times 0,49$$

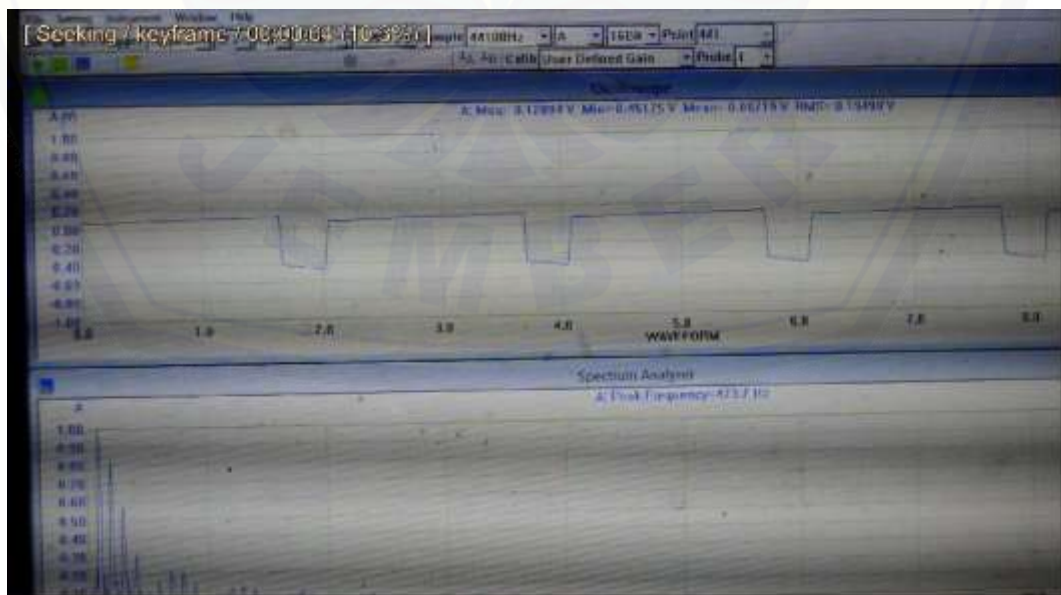
$$P_{21000} = 3,05 \text{ W}$$

$$P_{24000} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{24000} = \sqrt{3} \times 4,1 \times 0,51$$

$$P_{24000} = 3,62 \text{ W}$$

LAMPIRAN 2
DOKUMENTASI





LAMPIRAN 3
LISTING PROGRAM

```
const int potpin = A1;

const int escpin = 9;
int val;

void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(potpin, INPUT);
  pinMode(escpin, OUTPUT);
}

void loop(){
  val = analogRead(potpin);
  val = map(val, 0, 1023, 0, 255);
  analogWrite(escpin, val);
  Serial.println(val);
  delay(15);
}
```


LAMPIRAN 4
DATA SPESIFIKASI MOTOR BLDC 3 FASA

No	Motor BLDC 3 Fasa Sensorless	Jumlah Lilitan (N)	Resistansi Motor (Ohm)	Kuat Medan Magnet (T)
1		300	6,3 Ω	0,067 T
2		450	8,7 Ω	0,1064 T