



**RANCANG BANGUN MOTOR BLDC TIGA FASA *SENSORLESS*
DENGAN TIPE KONSTRUKSI *OUT-RUNNER***

SKRIPSI

Oleh

HERISTO BRAMAstra GIFARY

NIM 131910201064

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

2017



**RANCANG BANGUN MOTOR BLDC TIGA FASA *SENSORLESS*
DENGAN TIPE KONSTRUKSI *OUT-RUNNER***

SKRIPSI

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

Oleh

**HERISTO BRAMASTRA GIFARY
NIM 131910201064**

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

2017

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 Luluk Herman Tjahjono dan ibunda Rima Hawati 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 Hierro Atthauriq Pradana dan Adik saya Hernando Farazi Herrera terkasih;
3. Dosen Pembimbing Utama Bapak Widyono Hadi dan Bapak Suprihadi Prasetyono 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.”

(Heristo Bramastra Gifary)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Heristo Bramastra Gifary

NIM : 131910201064

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa proyek akhir yang berjudul “Rancang Bangun Motor BLDC Tiga Fasa *Sensorless* Dengan Tipe Konstruksi *Out-Runner*” 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, 28 Juni 2017

Yang menyatakan,

Heristo Bramastra Gifary
NIM 131910201064

SKRIPSI

**RANCANG BANGUN MOTOR BLDC TIGA FASA *SENSORLESS*
DENGAN TIPE KONSTRUKSI *OUT-RUNNER***

Oleh
Heristo Bramastra Gifary
NIM 131910201064

Pembimbing :

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

Dosen Pembimbing Anggota : Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Rancang Bangun Motor BLDC Tiga Fasa *Sensorless* Dengan Tipe Konstruksi *Out-Runner*” karya Heristo Bramastra Gifary NIM: 131910201064 telah diuji dan disahkan pada :

hari, : Senin
tanggal : 31 Juli 2017
tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

Ir. Widyono Hadi, M.T.
NIP. 196104141989021001

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP. 196104141989021001

Anggota II,

Anggota III,

Prof. Dr. Bambang Sujanarko, S.T., M.M.
NIP. 196312011994021002

Dr. Ir. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.
NIP. 197104022003121001

Mengesahkan
Dekan,

Dr. Ir. Entin Hidayah M.U.M
NIP. 196612151995032001

RINGKASAN

“RANCANG BANGUN MOTOR BLDC TIGA FASA *SENSORLESS* DENGAN TIPE KONSTRUKSI *OUT-RUNNER*”; Heristo Bramastra Gifary 131910201064; 2017: 56 halaman; Program Studi Strata 1 (S1) Teknik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Jember.

Teknologi semakin berkembang dengan sangat pesat di zaman yang modern ini. Seperti halnya kebutuhan di dalam penggunaan motor-motor listrik pada kehidupan sehari-hari. Dan pada umumnya, penggunaan motor listrik ini harus dapat divariasikan dan memiliki biaya perawatan yang rendah serta memiliki efisiensi, torsi, dan kecepatan yang sangat tinggi. Hanya saja kebutuhan penggunaan motor listrik secara umum saat ini adalah motor *Brushed DC (Direct Current)* dan motor induksi. Oleh karena itu, diperlukan sebuah hal yang baru yang memiliki banyak keuntungan yaitu motor BLDC (*Brushless Direct Current*).

Pada penelitian ini, maka dilakukan sebuah perancangan motor arus searah tanpa sikat tiga fasa (*three-phase BLDC*) dari motor *brushed DC* yang mana pada stator motor *brushed DC* diubah menjadi rotor motor BLDC 3 fasa yang menggunakan magnet permanen ferrite, lalu rotor motor *brushed DC* diubah menjadi stator motor BLDC 3 fasa. Kawat tembaga yang digunakan berdiameter sebesar 0,2 mm. Kemudian membuat 2 buah stator dengan masing-masing stator memiliki 3 kutub (*pole*) dan pada stator pertama memiliki jumlah lilitan sebesar 150 lilit pada masing-masing kutubnya, sedangkan stator yang kedua memiliki jumlah lilitan sebesar 100 lilit pada tiap-tiap kutubnya. Lalu mengetahui nilai resistansi, kecepatan, dan kerapatan fluks magnet dari kedua stator yang dapat diketahui dengan menggunakan multimeter, tachometer, dan teslameter. 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, kerapatan medan magnet, dan torsi dari motor BLDC tiga fasa sensorless.

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa stator motor pertama yang memiliki jumlah lilitan 450 lilit memiliki nilai resistansi (R) sebesar 8,7 ohm dan

kecepatan motor sebesar 20.258 rpm dengan didapatkan tegangan sebesar 4,1 V (saat kondisi potensio pada servo CCPM ke arah paling kanan yaitu maksimal) dan arus yang didapatkan saat motor tersebut yaitu sebesar 0,45 A. Sehingga didapatkan nilai daya (P) pada saat motor berputar pada kecepatan maksimal dengan perhitungan daya yaitu sebesar 3,192 W. Kemudian untuk kerapatan fluks magnetnya didapatkan sebesar 0,0894 T. Sedangkan pada stator motor kedua memiliki jumlah lilitan sebanyak 300 lilitan dengan memiliki nilai resistansi yaitu sebesar 6,3 ohm dan kecepatan motor sebesar 13.884 rpm dengan nilai tegangannya didapatkan pada saat kondisi motor berputar dengan kecepatan maksimal (saat kondisi potensio pada servo CCPM ke arah paling kanan yaitu maksimal) yaitu sebesar 2,8 V dan nilai arus yang didapatkan sebesar 0,55 A. Sehingga daya yang didapat agar motor berputar dengan kecepatan maksimal yaitu sebesar 2,664 W. Kemudian kerapatan fluks magnet yang dihasilkan pada pada stator motor ini yaitu sebesar 0,0672 T. Stator motor pertama memiliki tegangan awal yaitu dimana kondisi saat rotor motor mulai berputar, tegangan awal pada stator motor pertama ini sebesar 0,9 V. Sedangkan pada stator motor kedua memiliki tegangan awal sebesar 1,2 V agar rotor motor mulai berputar (melakukan proses komutasi).

Pada jumlah lilitan total 450 lilit memiliki nilai *error* persen pada resistansi, kerapatan fluks magnet, dan kecepatan motor yaitu 4,29%; 5,42%; dan 11,67%. Sedangkan untuk jumlah lilitan total 300 lilit memiliki nilai *error* persen pada resistansi, kerapatan fluks magnet, dan kecepatan motor yaitu 7,5%; 2,6%; dan 5,13%. Sehingga didapatkan bahwa nilai *error percent* terbesar terdapat pada pengujian kecepatan motor yang memiliki jumlah lilitan total 450 lilit yaitu sebesar 11,67%. Sedangkan untuk *error percent* terkecil terdapat pada pengujian kerapatan fluks magnet pada motor 2 dengan jumlah lilitan total 300 lilit yaitu sebesar 2,6%. *Error percent* dikarenakan beberapa faktor, terutama dalam segi mekanis pembuatan motor BLDC 3 fasa *sensorless*. Jarak (*gap*) antara magnet permanen pada rotor dan ujung stator bagian dalam tidak sama. Dan juga dalam hal penggunaan alat ukur juga berpengaruh terhadap *error percent* yang didapat.

SUMMARY

"DESIGN OF THREE-PHASE SENSORLESS BLDC MOTOR WITH OUT-RUNNER CONSTRUCTION TYPE"; Heristo Bramastra Gifary 131910201064; 2017: 56 pages; Programs study (S1) of engineering, Department of electrical engineering, Faculty of Engineering at Jember University.

Technology is growing very rapidly in this modern era. As well as the need in the use of electric motors in everyday life. And in general, the use of this electric motor must be varied and has a low maintenance cost and has a very high efficiency, torque, and speed. It's just the need to use electric motors in general today are Brushed DC motor (Direct Current) and induction motor. Therefore, it needs a new thing that has many advantages that is BLDC motor (Brushless Direct Current).

In this research, a 3-phase BLDC direct motor design of a DC motor is applied to the motor stator brushed DC to a 3 phase phase BLDC motor rotor using a permanent ferrite magnet, then the motor rotor brushed DC to the stator 3 phase BLDC motor. The copper wire used is 0.2 mm in diameter. Then make 2 stator with each stator having 3 poles and the first stator has 150 turns of coil on each pole, while the second stator has a 100-wound winding in each pole. Then know the value of resistance, velocity, and magnetic flux density of both stator which can be known by using multimeter, tachometer, and teslameter. This motorcycle construction design uses an out-runner construction type. This research aims to know some characteristics of 3 phase BLDC motor such as speed, frequency, magnetic field density, and torque from three sensorless-phase BLDC motor.

From the test results obtained that the first motor stator has a number of windings 450 winding has a value of resistance (R) of 8.7 ohm and motor speed of 20,258 rpm with the obtained voltage of 4.1 V (when the condition on the servo CCPM to the far right Which is maximal) and the current obtained when the motor is 0.45 A. So the power value (P) is obtained when the motor rotates at maximum speed with the power calculation of 3.192 W. Then for the magnetic

flux density is 0.0894 T While the second motor stator has a winding number of 300 windings with a resistance value of 6.3 ohms and motor speed of 13,884 rpm with the value of the voltage obtained when the motor condition rotates with maximum speed (when the condition of the servo CCPM to the most potential Right is maximal) that is equal to 2.8 V and the current value obtained is 0.55 A. So that power Obtained so that the motor rotates with a maximum speed of 2.664 W. Then the magnetic flux density generated on the motor stator is 0.0672 T. The first motor stator has an initial voltage that is where the condition when the motor rotor began to spin, the initial voltage at this first motor stator Of 0.9 V. While on the second motor stator has an initial voltage of 1.2 V for the rotor motor began to rotate (commutation process).

In the total amount of 450 windings has a percent error value on resistance, magnetic flux density, and motor speed of 4.29%; 5.42%; And 11.67%. As for the total number of 300 turns has a percent error value on resistance, magnetic flux density, and motor speed is 7.5%; 2.6%; And 5.13%. So it is found that the biggest error percentage value is in motor speed testing which has total winding total 450 lilit that is equal to 11.67%. As for the smallest error percent is also found in testing the magnetic flux density on the motor 2 with a total turnover 300 lilit of 2.6%. Error percent due to several factors, especially in terms of mechanical manufacture of 3 phase sensors BLDC motor. The distance (gap) between the permanent magnet on the rotor and the inner stator end is not the same. And also in terms of the use of measuring tools also affect the percentage of the obtained percent errors.

PRAKATA

Bismillahirrohmanirohim.

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Motor BLDC Tiga Fasa *Sensorless* Dengan Tipe Konstruksi *Out-Runner*”. 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. Widyono Hadi, M.T. selaku dosen pembimbing utama dan Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T., 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 Prof. Dr. Bambang Sujanarko, S.T., M.M., selaku dosen penguji 1 dan Bapak Dr. Ir. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., 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 Ginanjar Ni'matullah, Eki Rovianto, Suwandi, Wahyu Pradana, Moh. Lutfi Yazid, Septian Dwi Admaja, dll) yang telah membantu dalam proses pengujian skripsi.
10. Kontrakan Brantas 14 yang mana dari awal kuliah semester 4 sampai saat ini selalu memberikan semangat, bantuan, pengalaman yang tak pernah terlupakan dalam memberikan sesuatu yang sangat berharga.
11. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Sistem Tenaga yang selalu menjadi inspirasi dan ide-ide bagi penulis.
12. Sahabat dari sejak SMP hingga sekarang yang selalu memberikan dukungan untuk menyelesaikan skripsi.
13. 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, 28 Juni 2017

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.....	x
PRAKATA.....	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xviii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Motor DC.....	7
2.1.1 Motor <i>Brushed</i> DC.....	9
2.1.2 Motor <i>Brushless</i> DC	11
2.2 Kerapatan Fluks Magnet	15
2.3 Kecepatan Sinkron dan Rotor Motor	16
2.4 EMF (<i>Electromotive Force</i>)	18
2.5 Torsi dan Daya	19
2.7 Solenoida.....	20

2.8 Baterai Lithium	21
2.10 Magnet Permanen	22
2.11 ESC (<i>Electronic Speed Controller</i>)	24
2.12 <i>Bearing</i>	24
2.13 Hambatan pada Kawat	26
2.14 Rangkaian <i>Star</i> dan <i>Delta</i>	27
BAB 3. METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	28
3.2 Alat dan Bahan.....	28
3.3 Tahapan Penelitian	29
3.4 Blok Diagram Sistem	31
3.5 Rencana Perancangan Motor BLDC 3 Fasa	32
3.5.1 Perancangan Model Sistem Motor BLDC 3 Fasa.....	32
3.5.1.1 Perancangan Konstruksi Motor BLDC 3 Fasa	33
3.5.1.2 Baterai Li-Po Zippy Flightmax 1800 mAh.....	34
3.5.1.3 ESC Hobbywing Skywalker 20 A	35
3.5.1.4 <i>Servo Tester</i> CCPM	36
3.5.2 Perancangan Rotor Motor BLDC 3 Fasa	37
3.5.3 Perancangan Stator Motor BLDC 3 Fasa	38
3.6 Rencana Pengujian Motor BLDC 3 Fasa	40
3.6.1 Pengukuran Tahanan pada Stator Motor	40
3.6.2 Pengukuran Kecepatan Putar Motor	41
3.6.3 Pengukuran Kerapatan Fluks Magnet.....	41
3.6.4 Perhitungan Kerapatan Fluks Magnet, Frekuensi, Kecepatan, dan Torsi pada Motor BLDC 3 Fasa.....	41
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1 Analisis Data Pengujian	44
4.1.1 Pengujian pada Motor BLDC 3 Fasa <i>Sensorless</i>	46
4.1.2 Hubungan Jumlah Lilitan pada Kumputan Stator Terhadap Kecepatan Putar Motor BLDC 3 Fasa <i>Sensorless</i>	50

4.1.3 Hubungan Kerapatan Fluks Magnet Terhadap Kecepatan Putar Motor BLDC 3 Fasa <i>Sensorless</i>	52
4.1.4 Hubungan Torsi dan Daya Terhadap Kecepatan Putar Motor BLDC 3 Fasa <i>Sensorless</i>	53
4.2 Perbandingan Data Hasil Pengukuran dengan Data Hasil Perhitungan	54
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN	

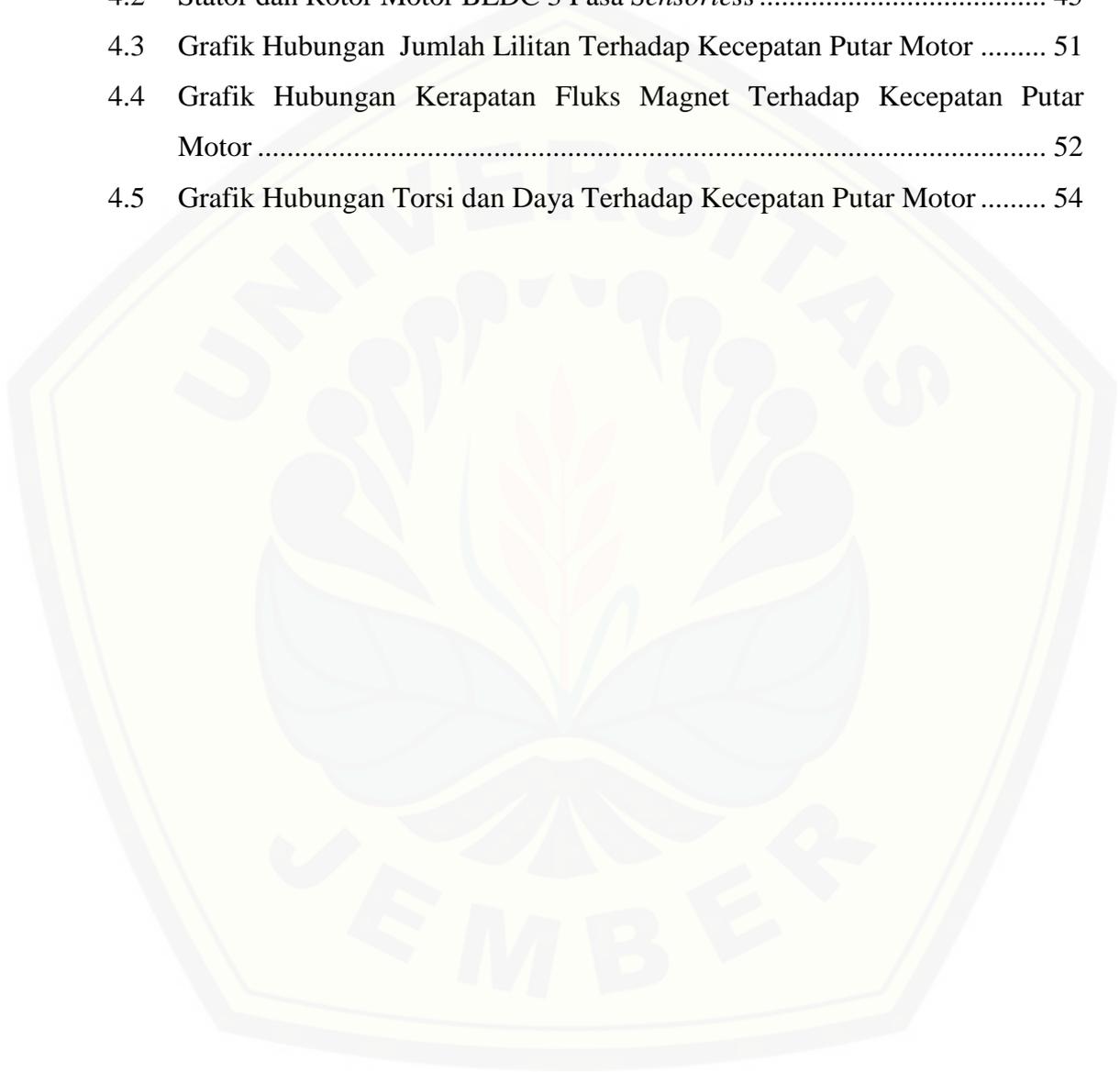
DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Perbandingan antara <i>Conventional Motors</i> dan <i>Brushless Motors</i>	14
2.2 Kemampuan Hantar Arus Kawat Email berdasarkan American wire gauge	21
2.3 Hambatan Jenis dari Beberapa Material pada Suhu 20° C	27
3.1 Spesifikasi Baterai Li-Po Zippy Flightmax 1800 mAh 2 S1P 20 C	35
3.2 Spesifikasi ESC Hobbywing Skywalker 20 A	36
3.3 Spesifikasi Servo <i>Tester</i> CCPM	37
3.4 Rencana Pengujian Motor BLDC 3 Fasa.....	41
4.1 Hasil Pengujian pada Stator Motor Menggunakan Multimeter	46
4.2 Hasil Pengujian Motor BLDC 3 Fasa Menggunakan Tachometer	48
4.3 Hasil Pengujian Motor BLDC 3 Fasa Menggunakan Teslameter	49
4.4 Perbandingan Data Hasil Pengukuran dan Data Hasil Perhitungan	55
4.5 Nilai <i>Error</i> Persen Resistansi pada Kumparan Stator	55
4.6 Hasil <i>Error</i> Persen Kecepatan Motor	56
4.7 Hasil <i>Error</i> Persen Kerapatan Fluks Magnet.....	56

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Motor DC.....	8
2.2 Konstruksi Motor <i>Brushed</i> DC.....	9
2.3 Konstruksi Motor <i>Brushed</i> DC Sederhana	10
2.4 Konstruksi Motor <i>Brushless</i> DC <i>Sensorless</i>	13
2.5 Konstruksi Motor <i>Brushless</i> DC dengan Sensor <i>Hall</i>	13
2.6 Tipe Konstruksi <i>Out-Runner</i> pada Motor BLDC 3 Fasa.....	14
2.7 Tipe Konstruksi <i>In-Runner</i> pada Motor BLDC 3 Fasa	15
2.8 Tegangan Stator pada Motor BLDC 3 Fasa	16
2.9 EMF (<i>Electromotive Force</i>) balik pada stator motor BLDC	19
2.10 Medan magnet pada solenoida.....	20
2.11 Mekanisme Baterai Lithium-Ion.....	22
2.12 Magnet Permanen Neodymium	23
2.13 Magnet Permanen Ferrite	23
2.14 <i>Electronic Speed Controller</i> (ESC)	24
2.15 <i>Bearing</i>	25
2.16 Komponen Penyusun <i>Anti-Friction Bearing</i>	26
2.17 Rangkaian <i>Star</i> dan <i>Delta</i>	28
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	29
3.2 Blok Diagram Sistem.....	31
3.3 Perancangan Model Sistem Motor BLDC 3 Fasa.....	33
3.4 Perancangan Konstruksi Motor BLDC 3 Fasa <i>Sensorless</i>	34
3.5 Baterai Li-Po Zippy Flightmax 1800 mAh 2 S1P 20 C	34
3.6 ESC Hobbywing Skywalker 20 A	35
3.7 <i>Servo Tester</i> CCPM	36
3.8 <i>Anti-Friction Bearing</i> (a), Stator Motor <i>Brushed</i> DC (b), dan Antena Radio (c).....	37
3.9 Rencana Perancangan Rotor Motor BLDC 3 Fasa	38

3.10 Rotor Motor Brushed DC (a) dan (b), Anti-Friction <i>Bearing</i> (c), dan Antena Radio (d)	39
3.11 Rencana Perancangan Stator Motor BLDC 3 Fasa	40
4.1 Motor BLDC 3 Fasa <i>Sensorless</i> dengan Tipe Konstruksi <i>Out-Runner</i>	42
4.2 Stator dan Rotor Motor BLDC 3 Fasa <i>Sensorless</i>	45
4.3 Grafik Hubungan Jumlah Lilitan Terhadap Kecepatan Putar Motor	51
4.4 Grafik Hubungan Kerapatan Fluks Magnet Terhadap Kecepatan Putar Motor	52
4.5 Grafik Hubungan Torsi dan Daya Terhadap Kecepatan Putar Motor	54



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi semakin berkembang dengan sangat pesat di zaman yang modern ini sehingga kendaraan yang ramah lingkungan banyak diciptakan dalam pengembangan teknologi alat transportasi, baik itu kendaraan roda empat maupun kendaraan roda dua, yang berbasis teknologi hybrid ataupun elektrik. Hal ini dikarenakan isu global warming yang dihasilkan oleh alat transportasi konvensional (sederhana) yang sebagian besar menjadi penyebab terjadinya efek dari global warming. Selain tidak ramah lingkungan, pemakaian bahan bakar fosil yang tidak terkontrol dapat mengakibatkan sebagian besar cadangan minyak bumi akan habis jika digunakan terus-menerus. Selain itu, kebutuhan di dalam penggunaan motor-motor listrik pada kehidupan sehari-hari juga meningkat. Dan pada umumnya, penggunaan motor listrik ini harus dapat divariasikan dan memiliki biaya perawatan yang rendah serta memiliki efisiensi, torsi, dan kecepatan yang sangat tinggi. Hanya saja kebutuhan penggunaan motor listrik secara umum saat ini adalah motor *Brushed DC (Direct Current)* dan motor induksi.

Akan tetapi, motor *Brushed DC (Direct Current)* dan motor induksi saja belum cukup untuk memenuhi kebutuhan masyarakat di zaman yang semakin berkembang ini. Karena pada dasarnya, motor *brushed DC* memiliki komutator mekanik juga dengan adanya *brush* (sikat) yang memiliki rugi-rugi dan juga biaya perawatannya yang mahal karena adanya *brush* yang cepat mengalami kerusakan pada saat proses komutasi. Kemudian efisiensi yang dimiliki dari motor *brushed DC* ini yaitu sebesar 75-80%. Sedangkan untuk motor induksi hanya memerlukan biaya perawatan yang cukup rendah dan juga memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor *Brushed DC*. Akan tetapi, motor induksi memiliki kelemahan yaitu motor induksi lebih cepat panas pada saat motor induksi bekerja. Karena adanya disipasi daya pada angker dinamanya dan karena motor induksi merupakan motor asinkron yaitu motor yang memiliki kecepatan putar medan magnet yang berbeda dengan kecepatan putar rotor, sehingga

memiliki slip. Oleh karena itu, dari kelemahan motor – motor tersebut diperlukan sebuah hal yang baru yang dapat mengatasi kelemahan tersebut yaitu motor BLDC (*Brushless Direct Current*).

Pada motor BLDC memiliki lebih banyak keuntungan dibandingkan dengan motor DC dan motor induksi. Karena motor BLDC sudah menggunakan komutator elektrik yang mana tidak memiliki rugi – rugi pada komutatornya. Sehingga motor BLDC lebih diandalkan daripada motor *Brushed* DC dan juga memiliki efisiensi yang tinggi (Elevich, 2005).

Keuntungan dari penggunaan motor BLDC ini adalah memiliki tingkat kebisingan yang rendah, kecepatan motor BLDC yang tinggi yaitu sekitar 10.000 rpm atau bisa lebih, dan torsi yang tinggi serta pada motor BLDC juga memiliki tingkat efisiensi yang tinggi yaitu sekitar 85-95%. Kelebihan lain dibanding mesin induksi adalah tanggapannya lebih cepat, umur pakai lebih lama, dan mempunyai rentang kecepatan yang lebar. Akan tetapi, kelemahan dari motor BLDC yaitu pengendalian yang lebih rumit untuk mengatur kecepatan dan torsi pada motor BLDC serta harga pada motor BLDC ini yang juga cukup mahal. Oleh karena itu, jika ingin mendapatkan efisiensi yang tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi dan dapat divariasikan serta hanya memerlukan biaya yang rendah untuk perawatan maka digunakan motor BLDC yang juga dapat memenuhi kebutuhan pada kehidupan sehari-hari. Dengan stator yang terbuat dari beberapa kumparan dengan lilitan sebuah kawat yang ukuran diameternya bervariasi. Dan rotor yang terdiri dari beberapa magnet permanen seperti magnet neodmium, ferrite, dan lain sebagainya. Kemudian motor BLDC memiliki 2 jenis yaitu *sensorless* yang tidak menggunakan sensor magnet dan *sensored* yang menggunakan sensor magnet untuk mengetahui posisi rotor. Motor BLDC juga memiliki 2 tipe konstruksi yaitu tipe konstruksi *out-runner* yaitu rotor yang berada di luar stator (proses komutasi berada di luar stator) dan berguna untuk mendapatkan torsi yang tinggi. Sedangkan tipe konstruksi *in-runner* yaitu rotor yang berada di dalam stator (proses komutasi berada di dalam stator) yang berguna untuk mendapatkan kecepatan yang tinggi.

Brushless DC (BLDC) Motor sebenarnya adalah motor sinkron AC 3 fasa dengan magnet permanen pada rotor. Walaupun merupakan *synchronous* AC 3 fasa, motor ini tetap disebut BLDC karena pada implementasinya BLDC Motor menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC oleh inverter 3 fasa. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada stator BLDC Motor adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor. Medan magnet putar yang dihasilkan stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh putaran rotor memiliki frekuensi yang sama. (Andrean, 2016).

Pada penelitian ini, maka dilakukan sebuah perancangan motor arus searah tanpa sikat tiga fasa (*three-phase* BLDC) yang menggunakan stator pada motor *brushed* DC agar menjadi rotor pada motor BLDC 3 fasa dan juga terdapat magnet permanen ferrite pada rotor motor. Kemudian menggunakan rotor yang memiliki 3 kutub pada motor *brushed* DC untuk dijadikan stator pada motor BLDC 3 fasa. Kawat tembaga yang digunakan memiliki ukuran diameter sebesar 0,2 mm. Kemudian membuat 2 buah stator yang sama ukurannya akan tetapi memiliki jumlah lilitan yang berbeda, dengan stator pertama memiliki jumlah lilitan sebesar 150 lilit pada masing-masing kutubnya, sedangkan stator yang kedua memiliki jumlah lilitan sebesar 100 lilit pada tiap-tiap kutubnya. Lalu mengetahui nilai resistansi dari kedua stator dengan menggunakan multimeter. Jenis motor BLDC 3 fasa yang digunakan menggunakan jenis motor BLDC 3 fasa *sensorless* yaitu tidak menggunakan sensor magnet dengan tipe konstruksi motor ini menggunakan tipe konstruksi *out-runner*. Penelitian kali ini bertujuan untuk mengetahui beberapa karakteristik dari motor BLDC 3 fasa seperti kecepatan, frekuensi, kerapatan fluks magnet, dan torsi dari motor BLDC tiga fasa *sensorless*. Tipe konstruksi *out-runner* ini sedikit susah pada segi mekanik karena pada stator harus terdapat *bearing* yang mana *bearing* tersebut harus terpasang presisi (terletak di titik tengah stator yang menyerupai bentuk lingkaran) dan dengan adanya *bearing* jenis *anti-friction bearing*, maka tidak akan menimbulkan gesekan yang akan mempengaruhi kecepatan putar motor. Kemudian inti besi yang terdapat pada rotor motor BLDC 3 fasa terbuat dari antena radio yang sudah

terpotong dan harus terpasang presisi dan melekat permanen pada rotor motor BLDC 3 fasa *sensorless*.

Motor BLDC tiga fasa harus menggunakan *driver* motor sebagai penggerak motor agar motor dapat berputar yaitu berupa pengendali dan inverter 3 fasa seperti “ESC (*Electronic Speed Controller*) Hobbywing Skywalker 20 A” lalu *servo tester* untuk menaikkan maupun menurunkan kecepatan putar motor tersebut. Kemudian untuk sumber tegangan DC pada motor ini menggunakan baterai Li-Po Zippy Flightmax 2S dengan kapasitas 1800 mAh dan tegangan baterai 7,4 V yang kemudian diinverter oleh ESC tersebut sehingga menjadi tegangan AC 3 fasa yang mana tegangan AC 3 fasa ini akan digunakan untuk membuat proses perubahan polaritas secara terus – menerus yang akan menciptakan medan magnet putar stator, sehingga magnet permanen pada rotor akan berputar mengikuti medan magnet putar stator. Hal inilah yang menyebabkan motor BLDC tiga fasa ini terus-menerus dapat berputar.

Berdasarkan latar belakang seperti yang diuraikan tersebut, maka peneliti mengambil judul “Rancang Bangun Motor BLDC Tiga Fasa *Sensorless* dengan Tipe Konstruksi *Out-Runner*” sebagai judul penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang diuraikan pada latar belakang, maka dapat disusun beberapa rumusan masalah yang menjadi fokus penelitian adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana membuat dan merancang motor BLDC tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*?
2. Bagaimana pengaruh resistansi kawat tembaga yang terdapat pada kumparan stator motor terhadap kecepatan putar motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*?
3. Bagaimana karakteristik kecepatan, frekuensi, torsi, dan kerapatan fluks magnet dari rancang bangun motor BLDC tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*?

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian yang dilakukan dapat lebih terfokus dan tidak menyimpang dari permasalahan yang ada, maka diambil beberapa batasan masalah sebagai berikut :

1. Kawat tembaga yang digunakan memiliki ukuran diameter sebesar 0,2 mm.
2. Sumber energi utama berupa tegangan DC 7,4 V dengan menggunakan baterai Li-Po 2S berkapasitas 1800 mAh.
3. Menggunakan ukuran rotor berdiameter 2,35 cm dan stator berdiameter 1,8 cm.
4. Menggunakan magnet permanen ferrite pada rotor motor BLDC 3 fasa.
5. Menggunakan antena radio sebagai inti besi berdiameter 0,2 cm dan panjang 5,35 cm.
6. Pengujian hanya pada resistansi kawat tembaga dari kumparan kedua stator motor, kerapatan fluks magnet, serta kecepatan pada motor BLDC 3 fasa.
7. *Driver* motor yang digunakan untuk motor BLDC 3 fasa menggunakan ESC (*Electronic Speed Controller*) Hobbywing Skywalker 20 A.
8. Menggunakan *bearing* jenis *anti-friction bearing*.
9. Kumparan hubung pada stator motor BLDC 3 fasa menggunakan rangkaian *hubung delta* (segitiga).

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai dalam melaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Membuat dan merancang bangun motor BLDC tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*.
2. Mendapatkan hasil dan menganalisa pengaruh resistansi kawat tembaga yang terdapat pada kumparan stator motor terhadap kecepatan putar motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*.
3. Mendapatkan hasil dan menganalisa karakteristik kecepatan, frekuensi, torsi, dan kerapatan fluks magnet dari rancang bangun motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*.

4. Untuk mengetahui dan menganalisa pengaruh medan elektromagnetik pada stator motor terhadap kecepatan putar motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*.

1.5 Manfaat Penelitian

Berdasarkan penelitian tentang motor BLDC tiga fasa, adapun manfaat yang diharapkan setelah melakukan penelitian yaitu mendukung pengembangan ilmu pengetahuan tentang motor arus searah tanpa sikat (BLDC) tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*, menjadi suatu perkembangan teknologi tentang motor BLDC tiga fasa *sensorless* sebagai acuan di dalam peningkatan keandalan dan efisiensi motor, dan motor BLDC tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* ini dapat menjadi sebuah konsep terobosan baru untuk melakukan penelitian selanjutnya.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor DC

Motor listrik merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang bekerja dengan cara mengubah energi listrik (gaya tarik antara medan magnet electromagnet dan magnet permanen) menjadi sebuah energi gerak (mekanis). Dan celah udara pada sebuah motor berada diantara medan dan angker dinamo untuk jarak ruang mekanis, medan magnet merupakan contoh dari garis *flux* yang melalui dari celah udara satu sisi ke sisi lainnya dan sepanjang besi yang menyeluruh pada sirkuit magnet tertutup (David Marks, 2012).

Secara umum, pada keseluruhan motor listrik memiliki mekanisme kerja dasar agar motor dapat bekerja (berputar) yaitu :

1. Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan sebuah gaya.
2. Jika kawat yang membawa arus listrik dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran/loop, maka kedua sisi loop, yaitu pada daerah sudut kanan medan magnet akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan.
3. Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar / torsi untuk memutar kumparan.
4. Motor-motor memiliki beberapa loop pada dinamonya yang mana berfungsi untuk memberikan tenaga putar yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan.

Di dalam sebuah motor listrik pasti memiliki beban, yang mana beban tersebut digunakan untuk suatu keperluan seperti memutar *impeller* pompa, *fan* atau *blower*, menggerakkan kompresor, mengangkat beban seperti *konveyor*, dan lain sebagainya. Salah satu jenis dari motor listrik ini sendiri adalah motor DC.

Motor DC memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Dalam motor DC terdapat dua kumparan yaitu kumparan medan yang berfungsi untuk menghasilkan medan magnet dan kumparan jangkar yang berfungsi sebagai tempat terbentuknya gaya gerak listrik (GGL). Jika arus dalam kumparan jangkar berinteraksi dengan medan magnet, maka akan timbul torsi (T) yang akan memutar motor (Nalaprana Nugroho dan Sri Agustina, 2015).

Motor DC memiliki 3 bagian atau komponen utama untuk dapat berputar yaitu :

- Kutub medan, bahwa interaksi dua magnet (kutub utara dan kutub selatan) akan menyebabkan perputaran pada motor DC. Motor DC memiliki kutub medan yang stasioner dan dinamo yang menggerakkan *bearing* pada ruang diantara kutub medan. Motor DC sederhana memiliki dua kutub medan (kutub utara dan kutub selatan). Elektromagnet menerima listrik dari sumber daya luar sebagai penyedia struktur medan.
- *Current* elektromagnet atau dinamo. Bila arus masuk menuju dynamo, maka arus ini akan menjadi elektromagnet. Dinamo yang berbentuk silinder dihubungkan ke as penggerak untuk menggerakkan beban. Untuk kasus motor DC yang kecil, dinamo berputar dalam medan magnet yang dibentuk oleh kutub utara sampai kutub selatan magnet berganti lokasi.
- Komutator merupakan komponen yang berguna untuk membalikkan arah arus listrik dalam dinamo dan juga membantu dalam transmisi arus antara dinamo dan sumber daya.



Gambar 2.1 Motor DC

Sumber : <http://zoniaelektro.net/motor-dc/>

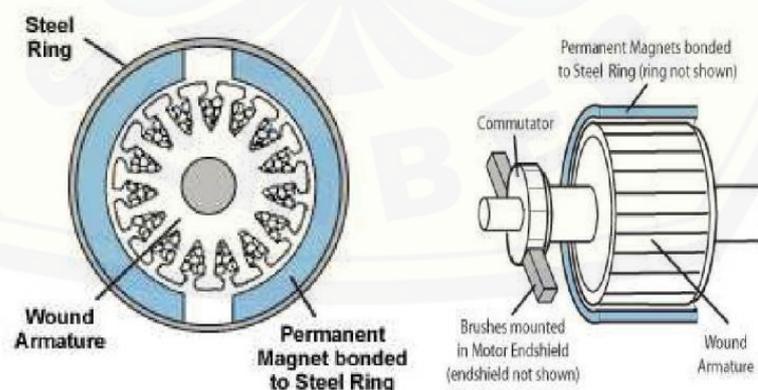
Keuntungan utama motor DC adalah sebagai pengendali kecepatan yang tidak mempengaruhi kualitas pasokan daya, karena motor ini dapat dikendalikan dengan mengatur :

- Tegangan dinamo : meningkatkan tegangan dinamo akan meningkatkan kecepatan
- Arus medan : menurunkan arus medan akan meningkatkan kecepatan.

Motor DC tersedia tersedia dalam banyak ukuran, namun penggunaannya pada umumnya dibatasi untuk beberapa penggunaan berkecepatan rendah, penggunaan daya rendah hingga sedang, seperti peralatan mesin dan rolling mills, sebab sering terjadi masalah dengan perubahan arah arus listrik mekanis pada ukuran yang lebih besar. Motor tersebut juga dibatasi hanya untuk penggunaan di area yang bersih dan tidak berbahaya sebab resiko percikan api pada sikatnya. Motor DC juga relatif mahal dibanding motor AC.

2.1.1 Motor *Brushed* DC

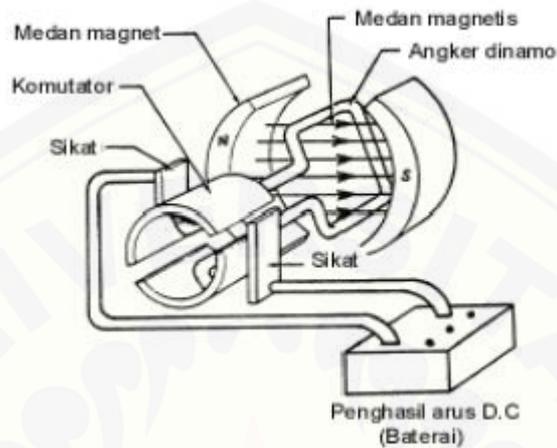
Motor DC dengan sikat memiliki fungsi sebagai pengubah arus pada kumparan sedemikian rupa sehingga arah putaran motor akan selalu sama. (Kurniawan, 2016). Motor ini juga masih menggunakan komutator mekanik untuk proses komutasinya sehingga motor ini memiliki rugi-rugi pada putarannya.



Gambar 2.2 Konstruksi Motor Brushed DC

Sumber : <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/AC-brushless-brushedmotors.html>

Bentuk motor *brushed* DC yang paling sederhana yaitu memiliki kumparan satu lilitan yang bisa berputar bebas diantara kutub-kutub magnet permanen. Dan motor *brushed* DC sederhana juga memiliki tingkat efisiensi hanya sekitar 75% sampai 80% saja.



Gambar 2.3 Konstruksi Motor *Brushed* DC Sederhana

Sumber : <http://ilmuteknik.com/mesin/prinsip-dasar-cara-kerja-motor-dc-sederhana.html/>

Catu tegangan DC dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuh komutator, dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumparan satu lilitan pada gambar di atas disebut angker dinamo. Angker dinamo adalah sebutan untuk komponen yang berputar di antara medan magnet. Motor ini memiliki kelemahan yaitu memiliki kecepatan yang rendah dibandingkan dengan motor yg lainnya dan biaya perawatan yang tinggi karena terdapat *brush*.

Motor arus searah bekerja berdasarkan hukum *lorentz* atau prinsip interaksi antara dua fluks magnet. Dimana kumparan medan akan menghasilkan fluks magnet yang arahnya dari kutub utara menuju kutub selatan dan kumparan jangkar akan menghasilkan fluks magnet yang melingkar. Interaksi antara kedua fluks magnet ini menimbulkan suatu gaya (Mustofa, 2014).

Besarnya gaya yang dibangkitkan motor DC (Direct Current) dapat dirumuskan melalui persamaan sebagai berikut :

$$F = B \cdot i_a \cdot l \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana : F merupakan gaya Lorentz (Newton), i_a adalah arus yang mengalir pada konduktor jangkar (Ampere), B = kerapatan medan magnet (Wb/m^2), dan l merupakan panjang konduktor jangkar (m).

2.1.2 Motor *Brushless* DC

Motor BLDC dapat disebut juga dengan *Permanent Magnet DC Synchronous Motors*, yang merupakan salah satu motor yang sangat terkenal karena memiliki karakteristik dan performa yang sangat baik. 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 EMF yang berbentuk sinusoidal.

Motor BLDC ini memiliki sistem kontrol komutasi secara elektris dan juga memiliki banyak keuntungan diantaranya :

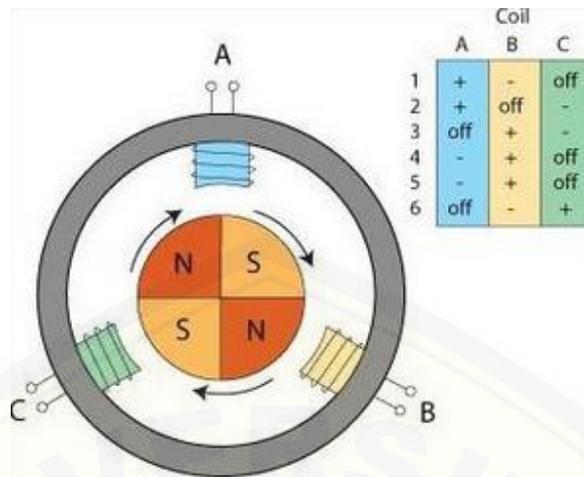
1. Memiliki karakteristik speed dan torsi yang lebih baik
2. Respon dinamis yang tinggi
3. Tingkat efisiensi dan ketahanan yang tinggi
4. Memiliki tingkat pengoperasian yang lama (karena tidak adanya erosi dari *brush*)
5. Tingkat kebisingan yang rendah
6. Memiliki jarak kecepatan yang lebih tinggi tergantung dari kekuatan medan magnet, dan
7. Berkurangnya tingkat gangguan elektromagnet

Pada kondisi ini, perbandingan pengiriman torsi untuk ukuran motor begitu tinggi. Selain itu, motor BLDC memiliki tingkat efisiensi sekitar 85% sampai 90% dan juga memiliki kecepatan yang tinggi dalam pengaplikasiannya yaitu sekitar 10.000 rpm atau di atasnya. Motor BLDC juga terkenal dengan kontrol kecepatan yang lebih baik. (José Carlos Gamazo-Real, Ernesto Vázquez-Sánchez dan Jaime Gómez-Gil, 2010). Akan tetapi, motor BLDC juga memiliki kelemahan yaitu membutuhkan kontroler, *top speed* yang terbatas, tidak ideal

dalam daya yang besar (30 kW) dan tegangan yang tinggi (200 V) serta harga yang cukup mahal.

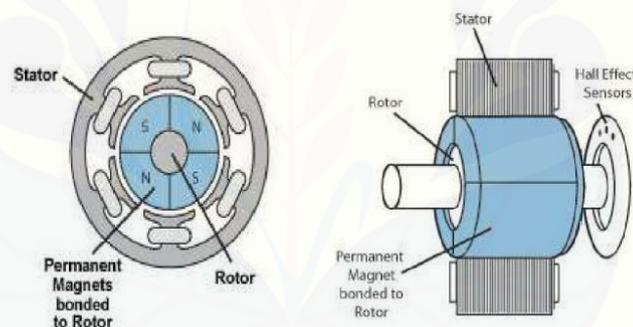
Pada motor BLDC digunakan mode pengendalian sendiri (*self-controlled*) memanfaatkan sensor posisi rotor dan sebuah inverter untuk mengendalikan arus pada belitan stator. Mode *self-controlled* pada BLDC memanfaatkan sensor posisi rotor yang di umpan balikkan pada kontroler untuk menentukan *timing* pensaklaran inverter. Dengan demikian perubahan frekuensi medan putar dapat diatur menyesuaikan kecepatan rotor saat itu. Hasilnya kecepatan rotor dapat dikendalikan tanpa harus mengalami kondisi lepas sinkron. Walaupun merupakan synchronous AC 3 fasa, motor ini tetap disebut BLDC karena pada implementasinya BLDC Motor menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC oleh inverter 3 fasa. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada stator BLDC Motor adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet permanen rotor. Medan magnet putar yang dihasilkan stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh putaran rotor memiliki frekuensi yang sama.

Motor BLDC 3 fasa ini secara umum terbagi menjadi 2 yaitu motor BLDC *sensorless* dan *sensored*. Pada *sensored brushless* ESC bermotor sistem selalu mengetahui posisi rotor. Hal ini sangat penting pada kecepatan rendah maupun pada kondisi awal ketika tidak ada gerakan rotor. Dengan informasi posisi yang tepat rotor, ESC dapat menerapkan kekuatan untuk kombinasi fase yang benar rotor. Manfaat lain dari desain *sensored* adalah bahwa motor dan ESC selalu sinkron satu sama lain pada semua kecepatan dan sistem umpan balik Sensor berbasis jauh lebih cepat, lebih dapat diandalkan, dan secara keseluruhan jauh lebih unggul. Sedangkan ESC *sensorless* tidak mengetahui posisi rotor sampai berputar pada kecepatan tertentu, sehingga untuk mengetahui pergerakan dari motor jenis ini bisa dilakukan dengan cara mendeteksi dari BEMF dan *zero-crossing*. Akan tetapi, motor *brushless* DC *sensorless* ini merupakan jenis motor yang lebih sederhana dan memiliki potensi yang lebih dapat diandalkan daripada motor *brushless* DC *sensored* (memiliki sensor *hall*) terutama jika pengaplikasiannya berada pada tempat yang kotor dan lembab.



Gambar 2.4 Konstruksi Motor *Brushless DC Sensorless*

Sumber: <http://www.electricisart-bogipower.com/2014/12/jenis-jenis-motor-penggerak-dynamo-pada.html>



Gambar 2.5 Konstruksi Motor *Brushless* dengan Sensor *Hall*

Sumber: <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/AC-brushless-brushedmotors.html>.

Pada gambar 2.4 merupakan konstruksi motor BLDC *sensorless* yaitu pada proses komutasinya motor ini tidak memakai sensor hall sebagai sensor pendeteksi medan magnet. Dan pada gambar 2.5 merupakan konstruksi motor BLDC yang memakai sensor hall yang berfungsi untuk mendeteksi adanya medan magnet. Sensor hall ini terbuat dari bahan semikonduktor seperti GaAs dan InSb.

Berikut merupakan table perbandingan antara motor konvensional dan motor BLDC :

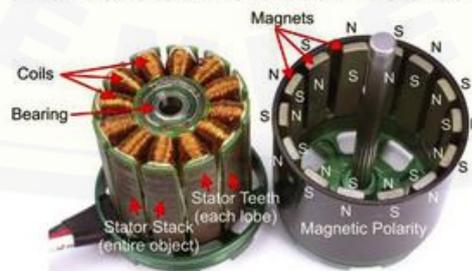
Tabel 2.1 Perbandingan antara *Conventional Motors* dan *Brushless Motors*

	Conventional motors	Brushless motors
Mechanical structure	Field magnets on the stator	Field magnets on the rotor Similar to AC synchronous motor
Distinctive features	Quick response and excellent controllability	Long-lasting Easy maintenance (usually no maintenance required)
Winding connections	Ring connection The simplest: Δ connection	The highest grade: Δ or Y-connected three-phase connection Normal: Y-connected three-phase winding with grounded neutral point, or four-phase connection The simplest: Two-phase connection
Commutation method	Mechanical contact between brushes and commutator	Electronic switching using transistors
Detecting method of rotor's position	Automatically detected by brushes	Hall element, optical encoder, etc.
Reversing method	By a reverse of terminal voltage	Rearranging logic sequencer

Sumber : T. Kenjo dan S. Nagamori

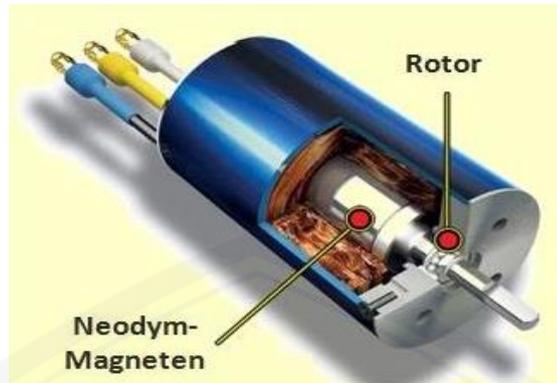
Untuk tipe konstruksi dari motor BLDC 3 fasa ini terbagi menjadi 2 yaitu tipe konstruksi *out-runner* dan tipe konstruksi *in-runner*. Untuk tipe konstruksi *out-runner* ini digunakan jika ingin mendapatkan torsi yang tinggi, yang mana rotornya berada di luar stator. Sedangkan tipe konstruksi *in-runner*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

OUTRUNNER COMPONENTS



Gambar 2.6 Tipe Konstruksi *Out-Runner* pada Motor BLDC 3 Fasa

Sumber : <https://www.electricbike.com/motor-tech-learn-the-terms-part-1/>



Gambar 2.7 Tipe Konstruksi *In-Runner* pada Motor BLDC 3 Fasa

Sumber : http://www.rcplanesguru.org/2015/09/electronics-and-propulsion-system-in-rc_14.html

2.2 Kerapatan Fluks Magnet

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus AC 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator maka akan timbul medan magnet. Kuat medan magnet (H) tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$H = \frac{iN}{l} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana : (H) atau kuat medan magnet merupakan besarnya gaya gerak magnet per satuan panjang dari suatu jalur aliran fluks magnet, (i) merupakan arus yang mengalir pada belitan, (N) merupakan jumlah lilitan dan (l) merupakan panjang lintasan magnet dalam meter. Kemudian untuk kerapatan fluks magnet (B) dapat dirumuskan :

$$B = \frac{\phi}{A} \dots\dots\dots (2.3)$$

Dimana : kerapatan fluks magnet (B) merupakan merupakan fluks magnet per satuan luas pada bidang yang tegak lurus dengan fluks magnet tersebut, (ϕ) merupakan fluks magnet, dan (A) merupakan luas penampang. Lalu untuk permeabilitas magnet (μ) merupakan suatu benda untuk menghasilkan suatu kerapatan fluks magnet (B) dari adanya kuat medan magnet (H), dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\mu = \frac{B}{H} \dots \dots \dots (2.4)$$

Ketika persamaan 2.4 dan 2.6 disubstitusikan, maka akan didapatkan :

$$\mu = \frac{\phi}{AH} \dots \dots \dots (2.5)$$

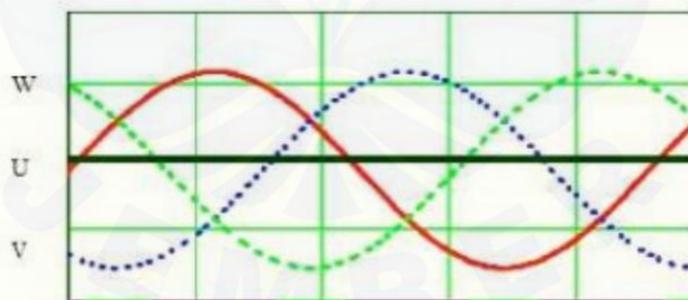
Dan saat persamaan 2.5 dan 2.6 disubstitusikan, maka akan didapatkan :

$$B = \frac{\mu i N}{l} \dots \dots \dots (2.6)$$

Berdasarkan persamaan 2.6, semakin besar arus yang mengalir di dalam suatu kumparan, semakin besar kuat medannya. Begitu juga semakin banyak lilitan kawatnya, maka semakin banyak menghasilkan garis gaya magnet. Kemudian semakin dekat jarak antara magnet permanen dengan magnet yang bersifat sementara, maka akan semakin kuat medan magnet yang dihasilkan.

2.3 Kecepatan Sinkron dan Rotor Motor

Pada stator timbul medan magnet akibat adanya polaritas yang berubah – ubah. Polaritas yang berubah – ubah ini timbul karena adanya arus AC (*Alternating Current*) yang mengalir pada stator tersebut. Pada motor BLDC memiliki 3 buah fasa yaitu U, V, dan W.



Gambar 2.8 Tegangan Stator pada Motor BLDC 3 Fasa

Sumber : <http://dokumen.tips/documents/motor-listrik-blcdc.html>

Ketika stator U mendapat tegangan negatif maka medan magnet yang timbul memiliki polaritas negatif. Sedangkan untuk stator V dan stator W diberikan tegangan positif maka stator tersebut memiliki medan magnet dengan polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet

kumparan pada stator dan magnet permanen pada rotor, sisi positif magnet rotor akan berputar mendekati medan magnet stator U, sedangkan sisi negatif magnet rotor akan berputar mendekati sisi positif medan magnet stator V dan W. Karena menggunakan tegangan AC sinusoidal, maka polaritas pada medan magnet stator U, V, dan W akan berubah – ubah sehingga magnet permanen pada rotor akan berputar menyesuaikan polaritas dari medan magnet stator tersebut. Dan dari proses perubahan polaritas tegangan pada stator yang terjadi secara terus – menerus akan menciptakan medan putar magnet stator, sehingga magnet permanen pada rotor akan terus berputar mengikuti medan putar magnet stator. Hal ini yang menyebabkan rotor pada motor BLDC 3 fasa dapat terus berputar. (Dharmawan, 2009).

Pada motor BLDC 3 Fasa, arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa sinusoidal, maka nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah – ubah setiap saat. Akibatnya pada tiap – tiap kumparan akan tercipta medan putar elektromagnet dengan kecepatan (n_s). Dan dirumuskan sebagai berikut :

$$n_s = \frac{120 f}{p} \dots\dots\dots (2.7)$$

Pada persamaan 2.7, diketahui bahwa (f) merupakan frekuensi input motor dan (p) merupakan jumlah kutub (pole) pada stator motor, dan n_s merupakan kecepatan medan putar elektromagnet stator (Azzumar, 2012). Kemudian untuk kecepatan rotor motor didapatkan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$E_a = 2 \pi N f \phi \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana : (E_a) merupakan gaya gerak listrik dalam volt, (N) merupakan jumlah lilitan yang digunakan, (f) merupakan frekuensi dalam satuan Hz, dan (ϕ) merupakan fluks magnet dalam satuan Wb. Ketika $n_s = n_r$, maka didapatkan persamaan kecepatan rotor pada motor sebagai berikut:

$$n_r = \left(\frac{120}{2 \pi p N} \right) \left(\frac{E_a}{\phi} \right) \dots\dots\dots (2.9)$$

Dimana : (n_r) merupakan kecepatan rotor dalam satuan rpm, (p) jumlah kutub, (N) merupakan jumlah lilitan, (E_a) merupakan ggl dalam satuan volt, dan (ϕ) merupakan fluks magnet dalam satuan Wb.

2.4 EMF (*Electromotive Force*)

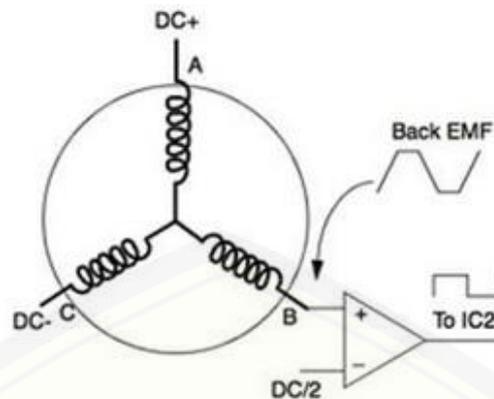
EMF (*Electromotive Force*) merupakan perbedaan potensial listrik yang berada diantara kedua ujung yaitu (*coil* dan belitan) stator yang memaksa listrik untuk mengalir di sebuah area dengan potensial yang rendah pada waktu mengisi ulang (*charge*). EMF (*Electromotive Force*) atau gaya gerak listrik yang berbeda berasal dari induksi magnet atau bergenerasi dari reaksi kimia oleh baterai. Lalu EMF balik atau gaya gerak listrik balik itu sendiri adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Besarnya EMF balik dipengaruhi oleh kecepatan sudut putaran motor (ω), medan magnet yang dihasilkan rotor (B), dan banyaknya lilitan pada belitan stator (N) sehingga besarnya EMF balik dapat dihitung dengan persamaan :

$$V = i R + EMF \dots \dots \dots (2.10)$$

$$EMF \text{ balik} = B.N.l.r.\omega \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana : (B) adalah kerapatan medan magnet (Tesla), (N) adalah banyaknya lilitan pada belitan stator per fasa, (l) merupakan panjangnya batang rotor (m), r = Jari-jari dalam motor (m), (ω) merupakan kecepatan sudut putaran motor (rad) (dimana $\omega = 2\pi f$).

Ketika motor BLDC sudah dibuat pada jumlah lilitan stator dan besarnya medan magnet yang dihasilkan nilainya sudah dibuat konstan sehingga yang mempengaruhi besarnya EMF balik adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor, semakin besar kecepatan sudut yang dihasilkan maka semakin besar pula EMF balik yang dihasilkan oleh motor (Kurniawan, 2016).



Gambar 2.9 EMF (*Electromotive Force*) balik pada stator motor BLDC

Sumber : <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/jun/controlling-sensorless-blcd-motors-via-back-emf>

Perubahan besarnya EMF balik ini mempengaruhi torsi motor *Brushless* DC, apabila kecepatan motor yang dihasilkan melebihi kecepatan rata-rata, maka akan mengakibatkan EMF balik yang dihasilkan oleh motor lebih besar daripada tegangan potensial pada belitan stator sehingga arus yang mengalir pada stator akan turun.

2.5 Torsi dan Daya

Gaya tekan putar pada bagian yang berputar disebut torsi, pada motor memiliki torsi yang mana dapat dihitung menggunakan rumus :

$$T = B i l r \dots\dots\dots (2.12)$$

Jika pada persamaan 2.12 disubstitusikan dengan persamaan 2.6 maka akan menjadi persamaan :

$$T = \left(\frac{\mu \cdot i \cdot N}{l}\right) (i \cdot l \cdot r) = \frac{W_b}{m^2} \times \text{Amp m}^2 \dots\dots\dots (2.13)$$

Karena $1 \text{ Wb} = 1 \text{ Volt detik}$, maka $T = \text{Volt detik Amp} = V i t = P \cdot t$, dan $t = \frac{1}{f}$

sedangkan $f_r = \frac{n_r p}{120}$, sehingga persamaan torsi akan menjadi :

$$T = \left(\frac{120 P}{n_r p}\right) \dots\dots\dots (2.14)$$

Ketika persamaan 2.8 disubstitusikan pada persamaan 2.14, maka diperoleh persamaan :

$$T = \left(\frac{120}{p}\right) \left(\frac{E_a I_a}{nr}\right) \dots\dots\dots (2.15)$$

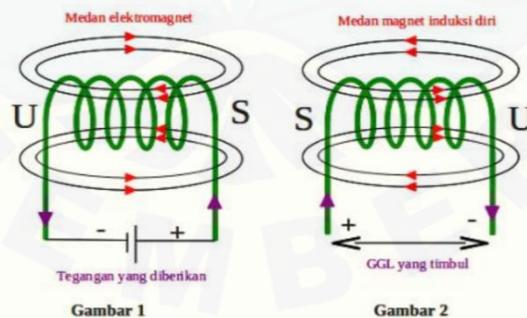
Pada persamaan 2.14, menggunakan daya aktif yang merupakan daya listrik yang digunakan untuk keperluan menggerakkan mesin-mesin listrik atau peralatan lainnya (Fajar, 2013). Untuk motor listrik 3 fasa, daya aktif dapat dirumuskan:

$$P = \sqrt{3} V i \cos \phi \dots\dots\dots (2.16)$$

Dimana : (P) merupakan daya (watt), (T) merupakan torsi (Nm), (V) merupakan tegangan (volt), (i / i_a) merupakan arus (ampere), (n_r) merupakan kecepatan rotor (rpm), (f) merupakan frekuensi (Hz), cos φ merupakan faktor daya (0,85) (sumber : arsyah, 2016), (N) merupakan jumlah lilitan, (p) merupakan jumlah kutub, dan (E_a) merupakan ggl (volt).

2.7 Solenoida

Solenoida merupakan sebuah kumparan kawat yang terdiri dari beberapa lilitan (loop). Saat arus listrik mengalir solenoida, solenoida tersebut akan memiliki sifat medan magnet. Posisi dari kutub – kutub medan magnet pada solenoida dipengaruhi oleh arah arus di tiap lilitan tersebut. Karena garis – garis medan magnet akan meninggalkan kutub utara magnet, maka kutub utara solenoida pada Gambar 2.8 berada di ujung kanan.



Gambar 2.10 Medan magnet pada solenoida

Setiap kumparan menghasilkan medan magnet dan medan total di dalam solenoida karena adanya arus listrik yang mengalir. Jika kumparan – kumparan solenoida berjarak sangat dekat, medan di dalam pada dasarnya akan parallel dengan sumbu kecuali di bagian ujung – ujungnya.

Tabel 2.2 Kemampuan Hantar Arus Kawat Email berdasarkan American wire gauge (AWG)

No	Diameter Kawat (mm)	Kemampuan Hantar Arus (kA) (Ampere)
1.	0,1	0,016 s/d 0,024
2.	0,2	0,064 s/d 0,094
3.	0,3	0,141 s/d 0,212
4.	0,4	0,251 s/d 0,377
5.	0,5	0,390 s/d 0,588
6.	0,6	0,566 s/d 0,849
7.	0,7	0,770 s/d 1,160
8.	0,8	1,010 s/d 1,510
9.	0,9	1,270 s/d 1,910
10.	1,0	1,570 s/d 2,360
11.	1,5	3,530 s/d 5,300
12.	2,0	6,280 s/d 9,420

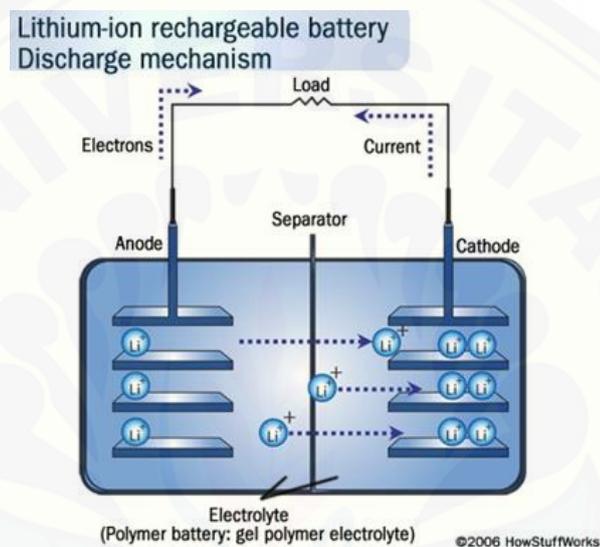
Sumber : Mustofa, 2014

2.8 Baterai Lithium

Baterai atau *accumulator* merupakan suatu alat yang berfungsi menyimpan energy listrik dalam energi kimia, dimana akan mengeluarkan energy listrik bila diperlukan (mustofa, 2014). Salah satu jenis dari baterai adalah baterai lithium-ion yang 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 faktor safety berbeda-beda diantara tipe baterai lithium. 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.

Baterai lithium 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.



Gambar 2.11 Mekanisme Baterai Lithium-Ion

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.

2.7 Magnet Permanen

Magnet permanen merupakan magnet yang memiliki sifat kemagnetan yang sukar hilang. Contohnya baja yang dibuat magnet ataupun dari besi yang dibuat magnet. Jika membongkar alat-alat elektronika misalnya radio, maka pada speakernya akan terdapat sebuah magnet yang berbentuk silinder dengan ukuran yang menyesuaikan dengan ukuran speaker itu sendiri. Ada

dua jenis magnet yaitu magnet permanen dan magnet sementara. Magnet permanen merupakan sebuah magnet yang memiliki sifat kemagnetan bisa sampai beberapa tahun, sedangkan magnet sementara sifat kemagnetannya mudah hilang. Dan dari jenis bahannya magnet terdiri dari magnet ferrite dan magnet neodmium.



Gambar 2.12 Magnet Permanen Neodymium

Sumber : <https://dir.indiamart.com/impcat/neodymium-magnets.html>

Pada gambar 2.12 merupakan magnet permanen neodmium yang terbuat dari perpaduan neodmium, besi, dan boron untuk membentuk struktur kristal tetragonal NdFe_{14}B . Magnet neodmium adalah magnet tipe terkuat yang mempunyai ketahanan terhadap kehilangan sifat kemagnetan yang sangat tinggi. Magnet ini juga mempunyai potensi untuk menyimpan energi magnet dalam jumlah yang sangat besar, lebih baik dari pada magnet samarium cobalt. Sedangkan magnet permanen ferrite merupakan magnet yang memiliki kerapatan fluks yang rendah tapi memiliki kekuatan koersif yang tinggi. Oleh karena itu, mungkin untuk menarik benda di daerah sekitarnya karena magnet ini memiliki kekuatan koersif yang tinggi. Magnet ferrite banyak digunakan karena bahan dan biaya produksi keduanya rendah (T. Kenjo dan S. Nagamori, 1985).

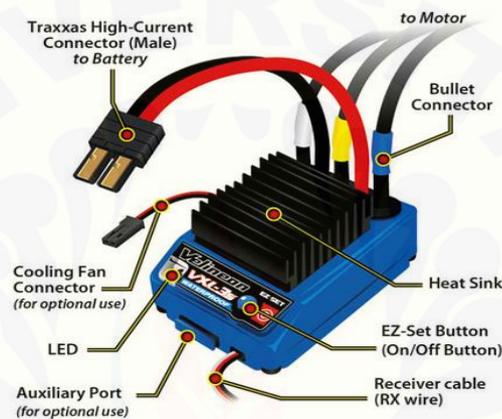


Gambar 2.13 Magnet Permanen Ferrite

Sumber : <http://www.fuke-magnet.com/?cat=18>

2.11 ESC (*Electronic Speed Controller*)

ESC adalah sirkuit elektronik dengan tujuan untuk bervariasi kecepatan sebuah servo-motor, arah dan mungkin juga bertindak sebagai rem dinamis. ESC (*Electronic Speed Control*) adalah driver penggerak untuk jenis motor *brushless*, biasanya digunakan pada bidang *aeronautical* atau RC. Dengan memberikan pulsa pada pin input ESC, maka akan berpengaruh pada kecepatan motor *brushless*. Kemudian ESC menyediakan tiga fasa listrik dengan sumber tegangan elektronik yang rendah yang berasal dari energi utama untuk motor.



Gambar 2.14 *Electronic Speed Controller (ESC)*

Sumber : <https://traxxas.com/products/parts/escs/vxl3s>

2.12 *Bearing*

Dalam ilmu mekanika *bearing* adalah sebuah elemen mesin yang berfungsi untuk membatasi gerak relatif antara dua atau lebih komponen mesin agar selalu bergerak pada arah yang diinginkan. *Bearing* menjaga poros (*shaft*) agar selalu berputar terhadap sumbu porosnya, atau juga menjaga suatu komponen yang bergerak linier agar selalu berada pada jalurnya. Fungsi *bearing* antara lain :

- Mengurangi gesekan, panas dan aus.
- Menahan beban *shaft* dan *machine*.
- Menahan *radial load* dan *thrust load*.
- Menjaga toleransi kekencangan.
- Mempermudah pergantian dan mengurangi biaya operasional.



Gambar 2.15 *Bearing*

Sumber : <http://www.aep.co.in/bearings.php>

Bearing terbagi menjadi beberapa aspek sebagai berikut :

1. Jika berdasarkan gesekan yang terjadi pada bearing, maka bearing terbagi menjadi dua jenis yaitu :

- *Anti-friction bearing* : yaitu bearing yang tidak akan menimbulkan gesekan. Contoh: roller dan ball bearing.
- *Friction bearing* : yaitu bearing yang mana kerjanya dapat menimbulkan gesekan. Contoh: *bush* dan *plain bearing*.

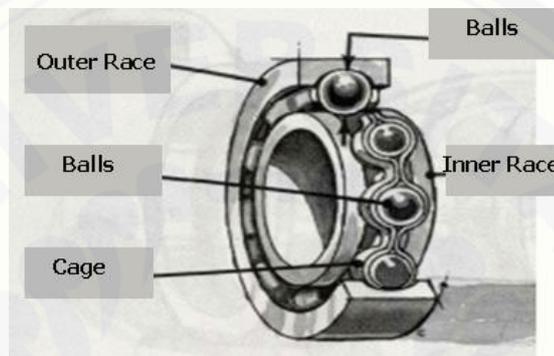
2. Jika dilihat dari beban yang ditahan oleh bearing, maka berikut adalah jenis-jenisnya:

- *Journal Bearing*: adalah bearing yang didesain untuk menahan beban yang tegak lurus terhadap sumbu *shaft* horisontal.
- *Foot step* atau *pivot bearing*: adalah bearing yang didesain pada poros vertikal untuk menahan beban yang paralel terhadap sumbu poros tersebut.
- *Thrust bearing*: adalah bearing yang didesain untuk menahan beban horisontal yang paralel dengan sumbu poros horisontal.

Pada *Anti friction bearing* tersusun dari beberapa komponen yaitu:

- ***Inner race* atau *Cone*** : cincin baja yang dikeraskan dengan diberi alur untuk pergerakan *roller* atau *ball* di bagian luarnya, sering dipasang pada *shaft* yang berputar sebagai penyangga *bearing*.
- ***Outer race*** : *Outer race* hampir sama dengan *Inner race*, *outer race* adalah cincin baja yang dikeraskan dengan alur untuk pergerakan *ball* atau *roller* di bagian dalam.

- **Balls atau Rollers** : Di antara *Inner race* dan *outer race* ada komponen yang berfungsi mengurangi gesekan yang dilakukan oleh *balls*, *rollers* atau *tapered rollers*. *Balls dan Rollers* ini terbuat baja yang dikeraskan. *Balls* atau *rollers* bergerak bebas di antara *inner* dan *outer race*.
- **Cage** : Letak *cage* antara *inner race* dan *outer race* yang digunakan untuk menjaga jarak *ball* atau *roller* yang satu dengan yang lainnya.



Gambar 2.16 Komponen Penyusun *Anti-Friction Bearing*

Sumber : <https://otomotif7danelektronika.files.wordpress.com/2011/04/konstruksi-anti-friction-bearings.png>

Keuntungan dari jenis *Anti-Friction Bearing* ini adalah :

- Tidak ada keausan pada *shaft*
- Memperkecil tenaga yang terbuang.
- Memungkinkan kecepatan yang lebih tinggi.

2.13 Hambatan pada Kawat

Sebuah kawat penghantar yang digulung menjadi sebuah kumparan dan kumparan tersebut memiliki hambatan. Besar hambatan atau tahanan (resistansi) dari sebuah kawat penghantar atau konduktor adalah berbanding lurus dengan luas area. Resistansi juga berbanding lurus dengan resistivitas (besar tahanan tertentu) (Royen, 2015). Resistansi sebuah konduktor (kawat) dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$R = \left(\frac{\rho l}{A}\right) \dots \dots \dots (2.17)$$

Untuk mencari nilai hambatan diperlukan data panjang kawat (l), hambatan jenis (ρ), dan luas penampang kawat. Hambatan jenis dapat diperoleh dari table 4.2:

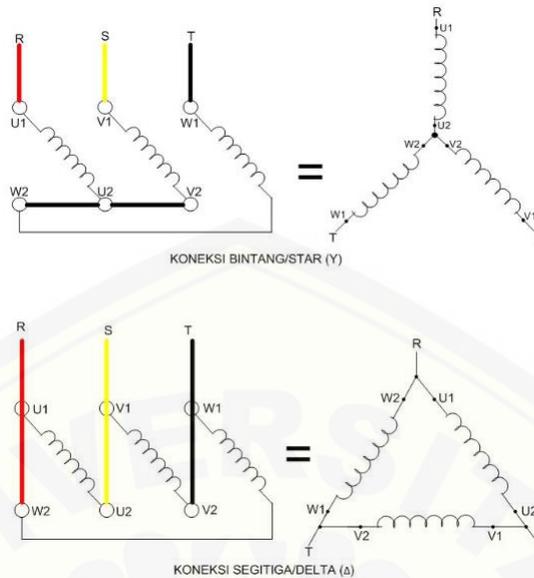
Tabel 2.3 Hambatan Jenis dari Beberapa Material pada Suhu 20° C

Bahan	Hambatan Jenis ($\Omega \cdot m$)
Konduktor	
Perak	$1,59 \times 10^{-8}$
Tembaga	$1,68 \times 10^{-8}$
Emas	$2,44 \times 10^{-8}$
Aluminium	$2,65 \times 10^{-8}$
Tungsten	$5,6 \times 10^{-8}$
Besi	$9,71 \times 10^{-8}$
Platina	$10,6 \times 10^{-8}$
Raksa	98×10^{-8}
Nikrom	100×10^{-8}
Semikonduktor	
Karbon	$(3-60) \times 10^{-3}$
Germanium	$(1-500) \times 10^{-3}$
Silikon	$0,1-60$
Isolator	
Kaca	10^3-10^{12}
Karet padatan	$10^{13}-10^{15}$

Sumber : Nanang Masudi, 2014

2.14 Rangkaian *Star* dan *Delta*

Sebuah motor listrik 3 fasa dapat digunakan dalam hubungan bintang (Y) atau hubungan segitiga (Δ) tergantung pada tegangan jaringannya (jala-jala). Tegangan yang harus dihubungkan ke motor biasanya ditentukan oleh papan nama (name plate) pada motor tersebut, misalnya 220V/380V. Untuk motor 3 fasa yang diberi tanda tegangan 220V / 380V, hubungan yang harus digunakan adalah sebagai berikut :



Gambar 2.17 Rangkaian Star dan Delta

- Kalau sistem tegangan jala-jala 220V / 380V, motor ini harus digunakan dalam hubungan bintang (Y), karena kumparan-kumparannya harus mendapat tegangan 220V
- Kalau system tegangan jala-jala 127V / 220V, motor ini harus digunakan dalam hubungan segitiga (Δ).
- Starting bintang segitiga dimaksudkan untuk mengurangi arus starting dari motor 3 fasa, karena pada motor yang berdaya besar, arus start berpengaruh besar.

Dengan starting ini dimaksudkan untuk menjaga agar lebih terkontrol, karena setelah beberapa detik kemudian akan terjadi perpindahan hubungan dari bintang ke segitiga. Dengan dihubungkan segitiga, maka tegangan fase motor berkisar 58% dari tegangan jala-jala motor dan arus startnya sekitar 1/3X arus start bila motor dihubungkan langsung (DOL).

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian tentang perancangan dan pembuatan motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi Listrik dan Laboratorium Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Slamet Riyadi No. 62 Patrang, Jember 68111. Dan di Laboratorium Optoelektronika dan Fisika Modern jurusan Fisika MIPA. Waktu penelitian dilaksanakan pada bulan Februari 2017 sampai Mei 2017.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian tentang motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* ini adalah sebagai berikut:

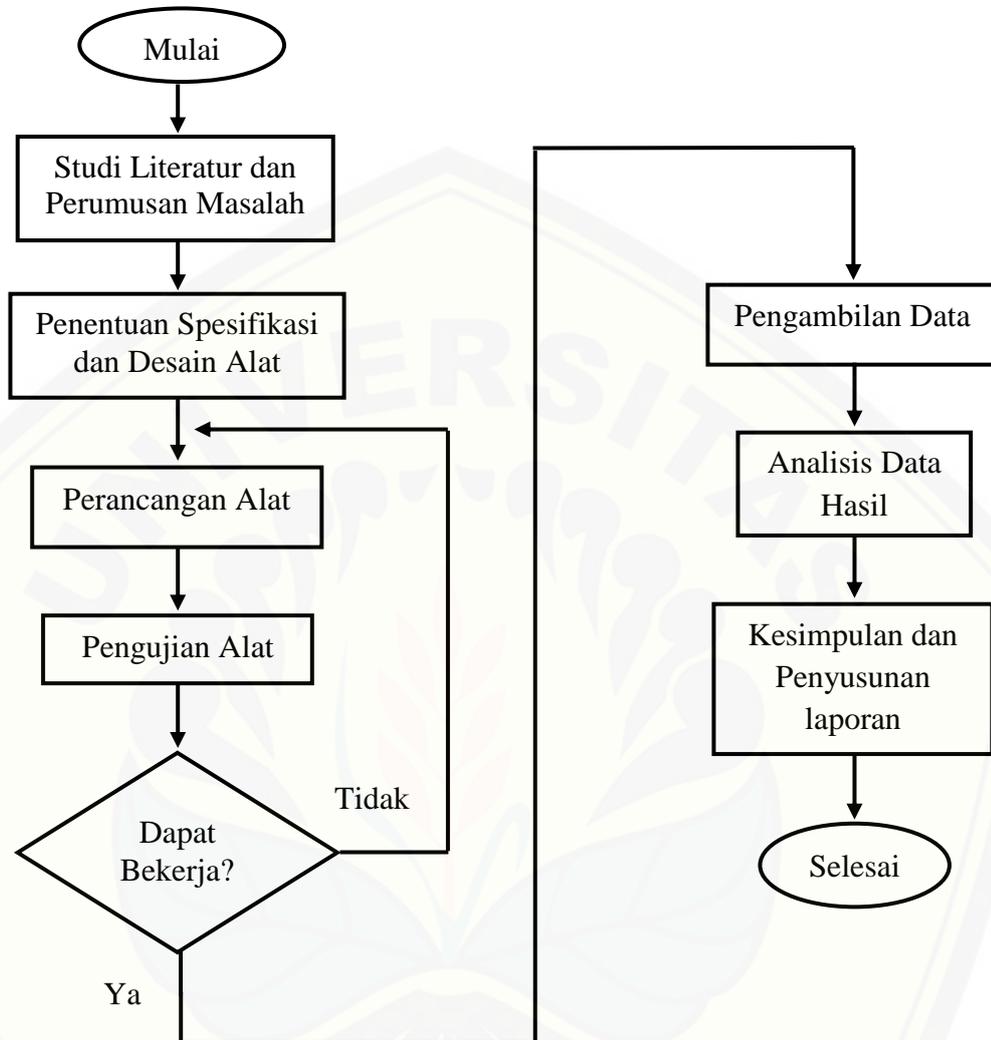
Alat

1. Multimeter
2. Tachometer
3. Teslameter
4. Osiloskop

Bahan

1. *Servo CCPM tester*
2. Motor *brushed* DC tipe konstruksi *in-runner*
3. Baterai Li-Po (Zippy Flightmax 2S 1800 mAh, 7,4 V)
4. Driver motor BLDC 3 fasa (ESC Hobbywing Skywalker 20 A)
5. Kawat tembaga dengan ukuran diameter sebesar 0,2 mm
6. Besi berbentuk seperti tabung berdiameter 2,35 cm
7. *Bearing (anti-friction bearing)*
8. Magnet permanen ferrite
9. Antena radio
10. Acrylic
11. Ring, mur, dan baut

3.3 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

Beberapa tahapan-tahapan yang dilakukan di dalam penelitian perancangan dan pembuatan motor BLDC tiga fasa *sensorless* tipe *out-runner* sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Tahap awal dari penelitian ini mencari literatur dari hasil penelitian sebelumnya, di buku, internet, tesis maupun jurnal untuk mengetahui karakteristik komponen, prinsip kerja serta teori yang menunjang di dalam perancangan dan

pembuatan alat ini. Diharapkan dengan literatur yang didapat bisa memberikan arahan atau acuan untuk mengurangi kesalahan di dalam penelitian ini.

2. Menentukan Spesifikasi Motor BLDC 3 Fasa

Menentukan spesifikasi motor BLDC 3 fasa yaitu dengan menggunakan diameter statornya 1,8 cm dari rotor motor *brushed* DC dan rotornya 2,35 cm dari stator motor *brushed* DC yang juga menggunakan magnet permanen ferrite pada rotor motor. Dengan spesifikasi yang dimiliki oleh motor *brushed* DC yaitu pada tegangan 5,22 V dan arus 0,02 A motor berputar pada kecepatan 9.724 rpm. *Bearing* yang digunakan yaitu *anti-friction bearing* yang melekat pada stator dan rotor motor, seperti *roller bearing* agar tidak dapat menimbulkan gesekan ketika proses komutasi. Kemudian menggunakan tiga buah *coil* (kumparan) dengan masing-masing kumparan memiliki jumlah lilitan sebesar 150 lilit yang terdapat pada stator motor pertama. Sedangkan stator motor kedua menggunakan jumlah lilitan sebesar 100 lilit. Rangkaian hubung yang digunakan pada 3 buah kumparan statornya yaitu menggunakan rangkaian hubung delta (segitiga).

3. Perancangan Alat

Setelah semua spesifikasi pada motor BLDC 3 fasa ini sudah ditentukan, maka tahap selanjutnya yaitu memulai perancangan alat. Pada perancangan alat yaitu perancangan motor BLDC tiga fasa *sensorless* ini menggunakan tipe konstruksi *out-runner* yang mana letak rotor berada di luar stator. Dengan tipe konstruksi yang digunakan ini adalah untuk mendapatkan torsi yang tinggi. Melekatkan secara presisi dan permanen inti besi dengan rotor motor BLDC 3 fasa, lalu memasang bearing pada rotor dan stator motor untuk mengurangi gaya gesek. Kemudian membuat lilitan pada 3 buah kutub yang terdapat pada stator motor kemudian menghubungkan ketiga kumparan tersebut dengan menggunakan rangkaian hubung delta (segitiga).

4. Pengujian Alat

Pada tahap keempat, setelah dilakukan perancangan motor BLDC 3 fasa atau pembuatan motor BLDC 3 fasa, maka langkah selanjutnya adalah dilakukan pengujian pada motor BLDC 3 fasa untuk mendapatkan data sesuai yang diharapkan seperti data kecepatan, data kerapatan medan magnet pada rotor dan

medan elektromagnet pada stator motor, serta data nilai dari resistansi kumparan kawat tembaga yang terdapat pada kedua stator motor BLDC 3 fasa.

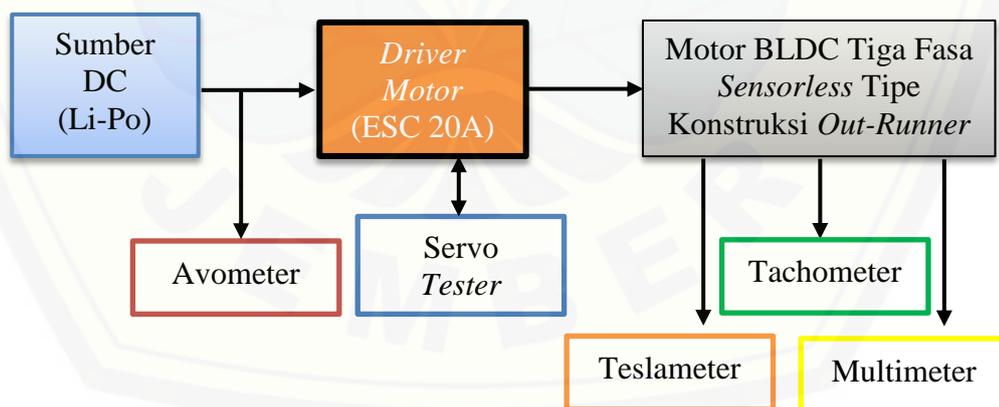
5. Pengambilan dan Analisis Data

Pada tahap ini, setelah melakukan tahap pengujian alat (motor BLDC 3 fasa) dan alat tersebut dapat bekerja dengan baik sehingga memenuhi target sesuai yang diharapkan, maka yang dilakukan selanjutnya yaitu pengambilan data yang diperlukan kemudian menganalisa data hasil untuk mengetahui beberapa karakteristik seperti kecepatan, torsi, frekuensi, dan kerapatan medan magnet dari pengujian motor BLDC tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*.

6. Kesimpulan dan Penyusunan laporan

Pada tahap akhir ini, secara keseluruhan hasil pengambilan data dan analisa data dimasukkan ke dalam pembahasan, lalu dapat ditarik beberapa kesimpulan yang menyangkut kinerja dari alat yang dibuat dan memberikan saran yang dimaksudkan untuk memperbaiki kekurangan yang ada. Kemungkinan dari pengembangan alat, serta penyempurnaan alat pada penelitian selanjutnya.

3.4 Blok Diagram Sistem



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

Konsep kerja dari penelitian ini dapat digambarkan pada blok diagram diatas. Sumber DC yang digunakan berasal dari baterai Li-Po 2S 1800 mAh, 7,4 volt sebagai sumber energi utama atau sebagai suplai tegangan pada *driver* ESC

sebelum ke motor BLDC tiga fasa. Kemudian sebelum sumber DC tersebut digunakan pada *driver*, maka sumber DC tersebut diukur menggunakan multimeter untuk mendapatkan nilai tegangan pada baterai lalu di-*inverter* agar menjadi tegangan AC oleh *driver* motor yaitu ESC (*Electronic Speed Controller*) yang juga berfungsi untuk mengontrol kecepatan motor agar konstan. Pada motor BLDC tiga fasa ini, harus menggunakan tegangan AC untuk mendapat perubahan polaritas secara terus – menerus yang juga akan menciptakan medan magnet putar stator sehingga terjadi gaya interaksi antara medan elektromagnet pada stator dengan medan magnet permanen pada rotor, sehingga membuat rotor motor bergerak atau berputar mengikuti kecepatan putar medan elektromagnet pada stator. Kemudian kecepatan pada motor BLDC 3 fasa juga dapat diatur dengan menggunakan *servo CCPM tester* karena pada *servo tester* berfungsi untuk menurunkan tegangan dan frekuensi yang mempengaruhi kecepatan motor BLDC 3 fasa *sensorless*.

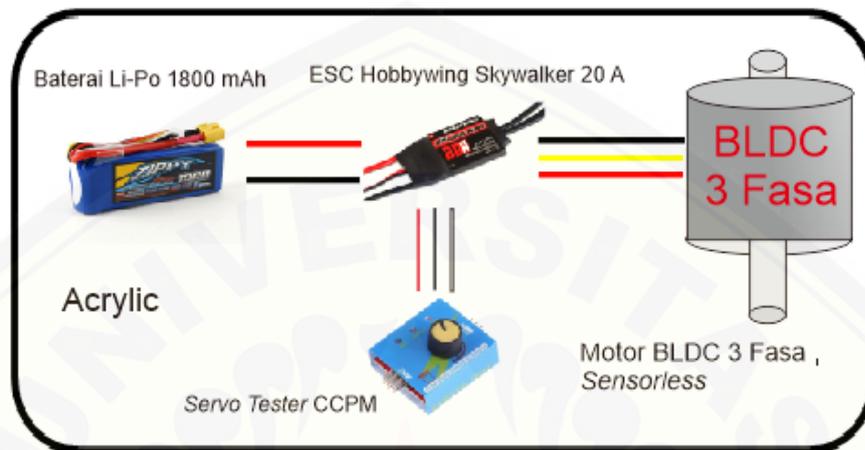
Ketika motor BLDC 3 fasa ini berada pada kecepatan maksimal, maka kecepatan motor ini akan diukur menggunakan tachometer yang mana berfungsi untuk mengukur kecepatan putar rotor motor. Kemudian juga mengukur nilai tegangan dan arus ketika motor berputar maksimal menggunakan multimeter, begitu juga nilai hambatan total pada kumparan stator menggunakan multimeter akan tetapi mengukurnya dalam keadaan motor tidak mendapat sumber tegangan. Pada alat yang bernama teslameter digunakan untuk mengukur nilai kerapatan fluks magnet pada magnet permanen yang terdapat pada rotor dan medan elektromagnet yang terdapat pada stator motor BLDC 3 fasa *sensorless*.

3.5 Rencana Perancangan Motor BLDC 3 Fasa

3.5.1 Perancangan Model Sistem Motor BLDC 3 Fasa

Pada perancangan model sistem motor BLDC 3 fasa *sensorless* yang meliputi perancangan jenis dan tipe dari *driver*, baterai, *servo tester*, dan spesifikasi motor BLDC yang digunakan. Motor BLDC 3 fasa yang dirancang ini menggunakan sumber energi utama dari baterai Li-Po (*lithium polymer*) Zippy Flightmax 2 sel dengan kapasitas baterai 1800 mAh. Sumber energi utama yang

berupa DC (*direct current*) ini menyuplai *driver* motor ESC Hobbywing Skywalker 20 A lalu sumber energi yang berupa AC (*alternating current*) tiga fasa dari *driver* ESC ini menyuplai langsung ke motor BLDC 3 fasa *sensorless* yang mana motor ini berasal dari motor *brushed* DC yang diubah.



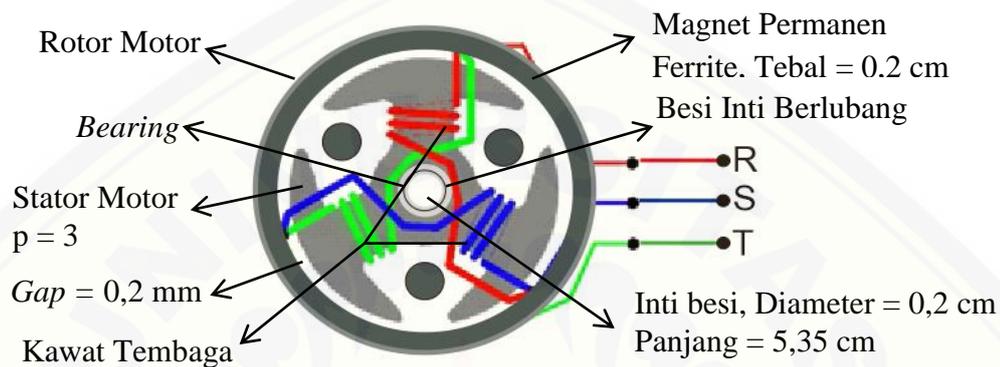
Gambar 3.3 Perancangan Model Sistem Motor BLDC 3 Fasa

Kemudian pada gambar 3.3 terdapat *servo tester* CCPM yang terhubung dengan *driver* motor (ESC) berguna untuk menaikkan maupun menurunkan kecepatan motor BLDC 3 fasa dengan membangkitkan sinyal yang berupa frekuensi dan tegangan yang akan mempengaruhi kecepatan motor, sehingga dapat mengetahui berapa kecepatan motor ketika potensio pada servo dalam keadaan maksimal (potensio diputar ke arah paling kanan).

3.5.1.1 Perancangan Konstruksi Motor BLDC 3 Fasa

Pada rotor motor menggunakan inti besi yang berasal dari antenna radio dengan panjang 5,35 cm dan berdiameter 0,2 cm terpasang tepat di pusat rotor motor yang berbentuk lingkaran secara pemanen karena tipe konstruksi motor BLDC 3 fasa ini menggunakan tipe konstruksi *out-runner*. Untuk rotor motor juga menggunakan magnet permanen ferrite yang berwarna hitam dengan ketebalan magnet sebesar 0,2 cm. Penentuan ukuran diameter bentuk rotor dan diameter bentuk stator yang terdiri dari tiga kutub adalah 2,35 cm dan 1,8 cm yang mana terdapat jarak (*gap*) antara manget permanen rotor dan kutub-kutub pada stator

yaitu 0,2 mm. Pada stator motor yang pertama yang terdiri dari 3 buah *coil* (kumparan) dibuat jumlah lilitan yaitu sebesar 150 lilit, sedangkan pada stator motor yang kedua yang terdiri dari 3 buah *coil* (kumparan) dibuat dengan jumlah lilitan yaitu sebesar 100 lilit. Berikut gambar rancangan secara keseluruhan dari motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*:



Gambar 3.4 Perancangan Konstruksi Motor BLDC 3 Fasa *Sensorless*

Pada gambar 3.4 merupakan perancangan motor BLDC 3 fasa *sensorless* secara keseluruhan yang mana pada statornya menggunakan lilitan kawat tembaga diameter sebesar 0,2 mm. Kemudian terdapat *bearing* dengan ukuran diameter dalam 2 mm dan diameter luar 5 mm yang berguna untuk menjaga agar rotor motor berputar tetap berada pada sumbu porosnya (berada pada jalurnya).

3.5.1.2 Baterai Li-Po Zippy Flightmax 1800 mAh

Pada penelitian ini menggunakan baterai Li-Po yang terdiri dari 2 *cell* dengan kapasitas total 1800 mAh dan memiliki tegangan 7,4 V sebagai sumber energi utama yang berupa arus DC (*direct current*) untuk menyuplai *driver* (ESC) motor dan *servo* CCPM *tester* serta menyuplai motor BLDC 3 fasa melalui ESC.



Gambar 3.5 Baterai Li-Po Zippy Flightmax 1800 mAh 2 S1P 20 C

Baterai pada gambar 3.5 memiliki beberapa spesifikasi yang mana spesifikasi tersebut digunakan untuk menentukan masukan tegangan pada *driver* motor BLDC 3 fasa yang akan digunakan. Spesifikasi dari baterai Li-Po Zippy Flightmax adalah sebagai berikut :

Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai Li-Po Zippy Flightmax 1800 mAh 2 S1P 20 C

Capacity	: 1800 mAh
Voltages	: 2S1P / 2 Cell / 7.4 V
Discharge	: 20 C Constant / 25-30 C Burst
Weight	: 109 g (including wire, plug & shrink wrap)
Dimensions	: 104x34x16mm
Balance Plug	: JST-XH
Discharge plug	: XT60

3.5.1.3 ESC Hobbywing Skywalker 20 A

Penelitian ini menggunakan *driver* motor (ESC) yang berfungsi sebagai penggerak motor BLDC 3 fasa agar dapat berputar. Dan agar motor BLDC 3 fasa dapat bekerja, maka *driver* ini dihubungkan dengan konektor R, S, dan T pada motor BLDC 3 fasa. Pada driver ESC (Electronic Speed Controller) ini menyebabkan motor menjadi berputar, karena pada driver ini mengeluarkan tegangan, arus, dan frekuensi. Lalu tegangan, arus, dan frekuensi tersebut diatur oleh *servo* CCPM *tester* untuk menentukan kecepatan motor BLDC 3 fasa.



Gambar 3.6 ESC Hobbywing Skywalker 20 A

Pada gambar 3.6 merupakan *Electronic Speed Controller* (ESC) Hobbywing Skywalker 20 A yang memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 3.2 Spesifikasi ESC Hobbywing Skywalker 20 A

Output	: Continuous 20 A, Burst 25A up to 10 Secs
Input Voltage	: 2-3 S Li-po (7,4 V – 11,1 V)
BEC mode	: Linear
BEC output	: 5 V / 2 A
Max Speed	: 210,000rpm for 2 Poles BLM, 70,000rpm for 6 poles BLM, 35,000rpm for 12 poles BLM
Size	: 42 mm (L) * 25 mm (W) * 8 mm (H)
Weight	: 19 g

3.5.1.4 Servo Tester CCPM

Multi CCPM *Servo Consistency Master Servo Tester* dapat digunakan sebagai pembangkit sinyal untuk pengendali kecepatan listrik (ESC), sehingga dapat diuji sistem motor tersebut tanpa menggunakan pemancar dan penerima. *Servo tester* CCPM ini dapat menurunkan maupun menaikkan kecepatan motor.



Gambar 3.7 Servo Tester CCPM

Pada gambar 3.7 merupakan *servo tester* CCPM yang akan digunakan untuk pengontrol kecepatan motor BLDC 3 fasa dan dihubungkan ke *driver* motor

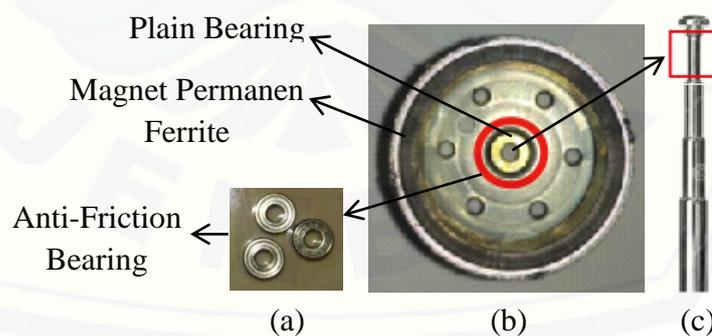
ESC (*Electronic Speed Controller*) Hobbywing Skywalker 20 A. *Servo tester* ini memiliki spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 3.3 Spesifikasi Servo *Tester* CCPM

Voltage consumption	: DC 4,8-6 V
Size	: 48 x 42 x 17 mm
Original box	: No
Color	: Blue
Net weight	: 7 gr

3.5.2 Perancangan Rotor Motor BLDC 3 Fasa

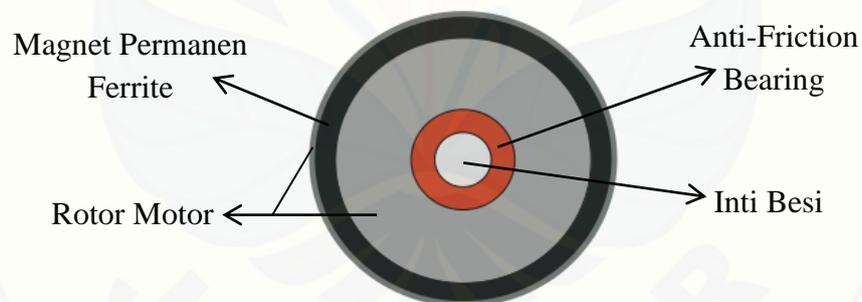
Pada pembuatan rotor motor BLDC 3 fasa dengan tipe konstruksi *out-runner* (rotor berada di luar stator motor) yaitu menggunakan stator motor dari motor *brushed* DC yang kemudian akan diubah menjadi rotor motor BLDC 3 fasa. Magnet permanen pada rotor motor BLDC 3 fasa yang akan digunakan yaitu magnet permanen ferrite yang memiliki warna hitam. Seperti yang terdapat pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 Anti-Friction Bearing (a), Stator Motor *Brushed* DC (b), dan Antena Radio (c)

Pada gambar 3.8 (b), merupakan stator motor *brushed* DC yang akan diubah menjadi rotor motor BLDC 3 fasa dan terdapat garis lingkaran merah yang

mana wilayah yang dilingkari tersebut akan dipasang dan dilekatkan inti besi secara permanen yang terbuat dari antena radio itu yang sudah dipotong. Setelah inti besi dipasang presisi dan melekat secara permanen pada stator motor *brushed* DC yang akan diubah menjadi rotor motor BLDC 3 fasa, maka *bearing* juga dipasang pada lingkaran merah itu yang mana berguna untuk mengurangi gesekan terhadap stator motor. Kemudian pada gambar 3.8 (a), merupakan jenis *bearing* yang digunakan pada rotor motor yang memiliki ukuran 5x2 mm dengan jumlah yang digunakan hanya 1 buah *bearing*. Dan pada gambar 3.8 (c), merupakan antena radio dan terdapat garis kotak merah yang mana bagian tersebut yang diambil atau dipotong untuk digunakan sebagai inti besi pada rotor motor. Pada bagian yang diambil atau dipotong tersebut memiliki panjang 5,35 cm dan berdiameter 0,2 cm. Karena tipe konstruksi motor BLDC 3 fasa ini menggunakan tipe konstruksi *out – runner*. Sehingga rotor motor (bagian yang berputar) berada di luar stator (bagian yang diam) motor BLDC 3 fasa. Sehingga dari gambar 3.8 akan menjadi sebuah rancangan rotor motor BLDC 3 fasa *sensorless* sebagai berikut :

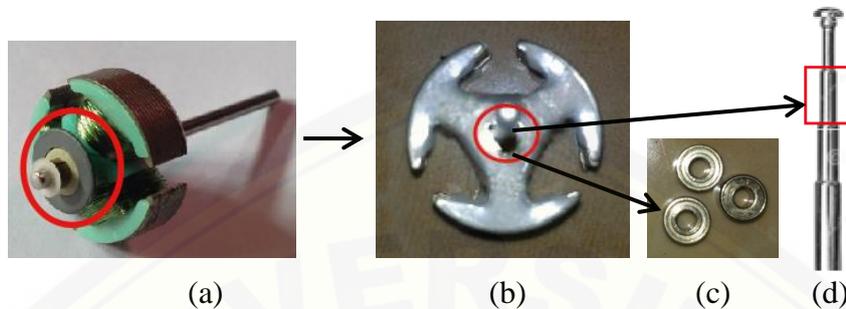


Gambar 3.9 Rencana Perancangan Rotor Motor BLDC 3 Fasa

3.5.3 Perancangan Stator Motor BLDC 3 Fasa

Pada pembuatan 2 buah stator motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* yaitu menggunakan rotor motor *brushed* DC yang kemudian akan diubah menjadi stator motor BLDC 3 fasa, lalu kawat tembaga yang akan digunakan memiliki ukuran diameter sebesar 0,2 mm dan jumlah lilitan yang digunakan pada 3 buah *coil* (kumparan) stator motor pertama masing – masingnya adalah 150 lilit, sedangkan untuk stator motor kedua pada masing –

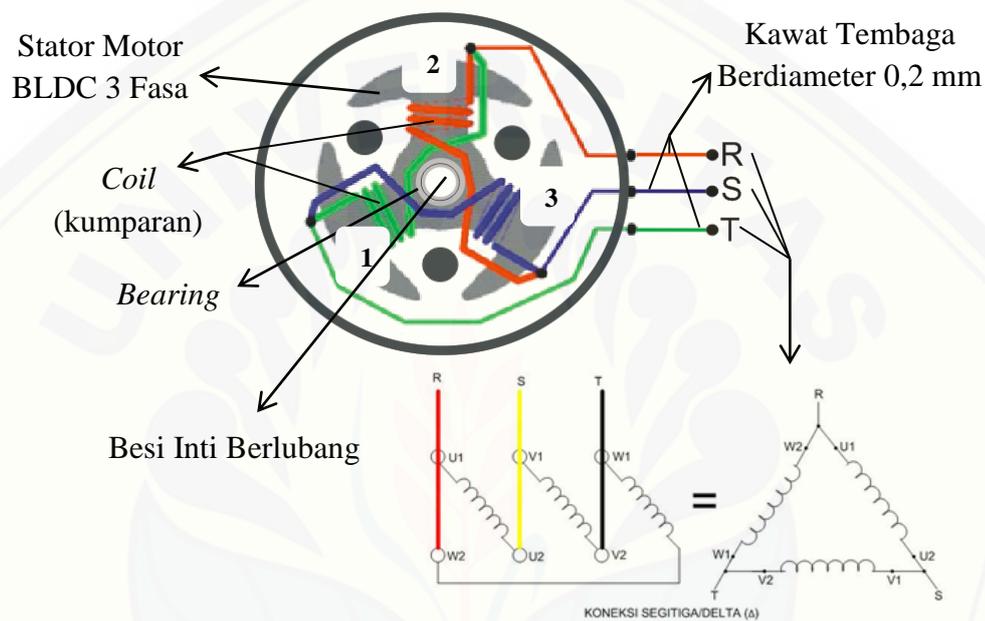
masing 3 buah *coil* (kumparan) yang terdapat pada stator motor BLDC 3 fasa menggunakan jumlah lilitan sebesar 100 lilit. Kemudian rangkaian hubung antar kumparan menggunakan rangkaian hubung delta (segitiga).



Gambar 3.10 Rotor Motor *Brushed* DC (a) dan (b), *Anti-Friction Bearing* (c), dan Antena Radio (d)

Pada gambar 3.10 (a), merupakan rotor motor *brushed* DC yang memiliki jumlah kutub sebanyak 3 kutub kemudian terdapat garis lingkaran merah pada gambar tersebut yang mana garis lingkaran merah tersebut merupakan bagian yang akan dihilangkan, seperti komutator mekanik dan belitan kawat tembaga. Sehingga dari gambar 3.10 (a) akan menjadi gambar 3.10 (b). Pada gambar 3.10 (b) terdapat garis lingkaran merah yang mana bagian tersebut akan dibor menyesuaikan ukuran diameter dari antena radio yang sudah dipotong yang mempunyai diameter 0,3 cm. Lalu dipasang besi ataupun aluminium dengan inti berlubang yang berasal dari antena radio. Setelah itu, *bearing* juga dipasang presisi pada bagian yang dilingkari tersebut. Bagian stator ini memiliki 3 buah kutub, lalu setiap kutubnya memiliki kumparan yang mana kumparan tersebut memiliki jumlah lilitan yang berbeda dari kedua stator motor. Dengan stator pertama memiliki jumlah lilitan total sebanyak 450 lilit dan stator kedua memiliki jumlah lilitan total sebanyak 300 lilit. Kemudian pada gambar 3.8 (c), merupakan *bearing* yang menggunakan jenis *anti-friction bearing* dan hanya 1 buah *bearing* yang digunakan. Karena fungsi *bearing* ini yaitu menjaga agar rotor motor berputar terhadap stator motor berada pada jalurnya dan juga agar tidak menimbulkan gesekan yang akan mempengaruhi kecepatan putar motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* (rotor terletak di luar stator) ini.

Pada gambar 3.10 (d) merupakan gambar dari antenna radio yang mana terdapat garis kotak merah, dari garis kotak merah tersebut bagian itu yang akan diambil. Bagian yang diambil atau dipotong dari antenna radio memiliki panjang 2 cm dan memiliki diameter dalam 0,3 cm. Kedua stator motor tersebut nantinya akan digunakan untuk perbandingan. Sehingga dari gambar 3.10 akan menjadi sebuah rancangan stator motor BLDC 3 fasa *sensorless* sebagai berikut:



Gambar 3.11 Rencana Perancangan Stator Motor BLDC 3 Fasa

3.6 Rencana Pengujian Motor BLDC 3 Fasa

Pada penelitian ini menggunakan rencana pengujian motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* untuk mendapatkan berbagai macam parameter data sesuai yang diharapkan.

3.6.1 Pengukuran Tahanan pada Stator Motor

Pada pengukuran tahanan (resistansi) kumparan pada stator motor dilakukan pada saat motor dalam keadaan kondisi tidak mendapat sumber tegangan. Terdapat 3 ujung kawat (a, b, dan c) pada belitan stator, cara pengukurannya pada 2 ujung kawat (a dan b) pada belitan stator dihubungkan dengan menggunakan multimeter sehingga dapat diketahui nilai tahanan.

Begitu juga dengan pengukuran tahanan pada ujung kawat (a dan c) dan (b dan c) dihubungkan pada multimeter sehingga nilai tahanan akan diketahui.

3.6.2 Pengukuran Kecepatan Putar Motor

Pengukuran kecepatan putar motor dapat dilakukan dengan mudah dengan menggunakan tachometer yaitu alat pengukur kecepatan motor. Pada sisi luar rotor motor diberikan isolasi berwarna hitam lalu diberikan sedikit isolasi berwarna putih berupa sebuah garis putih. Tujuannya agar tachometer dapat mendeteksi kecepatan motor. Ketika motor berputar terdapat tombol untuk mengeluarkan sinar merah pada tachometer kemudian sinar tersebut diarahkan ke garis putih yang berputar pada rotor motor sehingga kecepatan dapat diketahui dalam rpm.

3.6.3 Pengukuran Kerapatan Fluks Magnet

Pada pengukuran kerapatan fluks magnet pada stator motor dilakukan ketika stator motor diberi sumber tegangan. Saat kumparan pada stator motor mendapat tegangan AC maka akan timbul medan elektromagnet pada penampang stator motor yang mana pada penampang itu nantinya diukur menggunakan teslameter yaitu alat pengukur kerapatan fluks magnet. Dengan mendekatkan teslameter tersebut ke penampang stator motor sehingga akan diketahui nilai kerapatan fluks magnetnya.

3.6.4 Perhitungan Kerapatan Fluks Magnet, Resistansi, Kecepatan, dan Torsi pada Motor BLDC 3 Fasa

a. Menghitung kerapatan fluks magnet

Pada rotor menggunakan magnet ferrite yang mana bentuk dan ukurannya menyesuaikan dengan bentuk dan ukuran rotor motor. Karena pada kawat melingkar dengan jumlah N lilitan, maka untuk menentukan besar kerapatan fluks magnet pada motor BLDC tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* tersebut dapat menggunakan persamaan 2.6 yaitu:

$$B = \frac{\mu N i}{2l} \dots\dots\dots (3.1)$$

Dimana : B = kerapatan fluks magnet (T),

μ = permeabilitas

N = jumlah lilitan

i = arus (A)

l = panjang penampang (m)

b. Menghitung resistansi

Untuk mendapatkan nilai resistansi yang terdapat pada kumparan stator motor melalui perhitungan dapat menggunakan persamaan 2.17 yaitu:

$$R = \frac{\rho_{cu} l}{A} \dots\dots\dots (3.2)$$

Dimana : R = resistansi atau tahanan (ohm)

l = panjang kawat penghantar (m)

A = luas penampang kawat (m²)

ρ_{cu} = hambatan jenis kawat tembaga ($\Omega \cdot m$)

c. Menghitung kecepatan motor

Untuk mendapatkan kecepatan motor ketika proses komutasi dengan menggunakan nilai EMF pada motor dapat menggunakan persamaan 2.9 yaitu:

$$n_r = \left(\frac{120}{2\pi p N} \right) \left(\frac{E_a}{\Phi} \right) \dots\dots\dots (3.4)$$

Dimana : n_r = kecepatan motor (rpm)

p = jumlah kutub

N = jumlah lilitan

E_a = ggl induksi (volt)

Φ = fluks magnet (Wb)

d. Menghitung torsi motor

Pada perancangan motor BLDC 3 fasa ini, untuk mendapatkan torsi harus mengetahui tegangan, arus, kecepatan rotor dan jumlah kutub karena pada motor BLDC 3 fasa, maka dapat menggunakan persamaan 2.15 dikalikan $\sqrt{3}$ yaitu:

$$T = \left(\frac{120}{p} \right) \left(\frac{\sqrt{3} E_a I_a}{n_r} \right) \dots\dots\dots (3.5)$$

Dimana : T = torsi motor (N-m)

p = jumlah kutub

n_r = kecepatan motor (rpm)

E_a = ggl induksi (volt)

I_a = arus (A)

Parameter data-data diatas diperlukan untuk mendapatkan beberapa data hasil setelah melakukan pengujian, sehingga diperlukan rencana pengujian untuk motor BLDC 3 fasa *sensorless* seperti resistansi total (ohm) pada kumparan stator motor, tegangan *input* (V), arus *input* (I), kerapatan fluks magnet (B), frekuensi *input* (f), dan kecepatan motor (n_r) BLDC 3 fasa *sensorless*. Seperti pada tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3.4 Rencana Pengujian Motor BLDC 3 Fasa

Jumlah Lilitan Total	V (Volt)	R (Ω)	I (A)	B (T)	n_r (Rpm)	f (Hz)
450 lilit	xx	xx	xx	xx	xx	xx
300 lilit	xx	xx	xx	xx	xx	xx

Dari rencana pengujian tersebut, untuk mendapatkan kecepatan putar motor (rpm) menggunakan tachometer, lalu dilakukan rencana pengujian pengukuran resistansi, arus dan tegangan masukan pada motor BLDC 3 fasa menggunakan multimeter dan untuk mendapatkan nilai kerapatan fluks magnet dilakukan pengujian dengan menggunakan teslameter. Sehingga akan didapatkan beberapa karakteristik dari pengujian tersebut seperti karakteristik kecepatan, frekuensi, torsi, dan kerapatan fluks magnet dari magnet permanen ferrite yang terdapat pada rotor motor dan elektromagnet yang terdapat pada stator motor. Jadi, akan dapat diketahui hal-hal apa saja yang akan mempengaruhi kecepatan putar motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner* ini.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. 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.
2. Dalam pengujian kerapatan fluks magnet yang dilakukan dengan menggunakan alat yang bernama teslameter dan hasil perhitungan menurut teori, dimana nilai resistansi sangat berpengaruh terhadap kerapatan fluks magnet. Sehingga semakin besar nilai resistansi, maka semakin besar pula nilai kerapatan fluks magnet yang dihasilkan. Hal ini dibuktikan ketika nilai resistansi total kumparan stator pertama 8,7 ohm, maka nilai kerapatan fluks magnetnya yaitu sebesar 0,0894 T dan ketika nilai resistansi total kumparan stator kedua 6,3 ohm, maka nilai kerapatan fluks magnetnya yaitu sebesar 0,067 T.
3. Kecepatan putar motor dapat mempengaruhi torsi dan daya pada motor, jika kecepatan motor semakin besar maka torsi motor akan semakin kecil lalu jika kecepatan motor semakin besar, maka daya pada motor juga akan meningkat. Hal ini dibuktikan pada tabel 4.2, yaitu pada stator pertama memiliki kecepatan 20.258 rpm yang mana torsi dan dayanya adalah 0,0063 Nm dan 3,713 W lalu pada stator kedua memiliki kecepatan 13.884 rpm yang mana torsi dan dayanya adalah 0,00763 Nm dan 2,664 W.

5.2 Saran

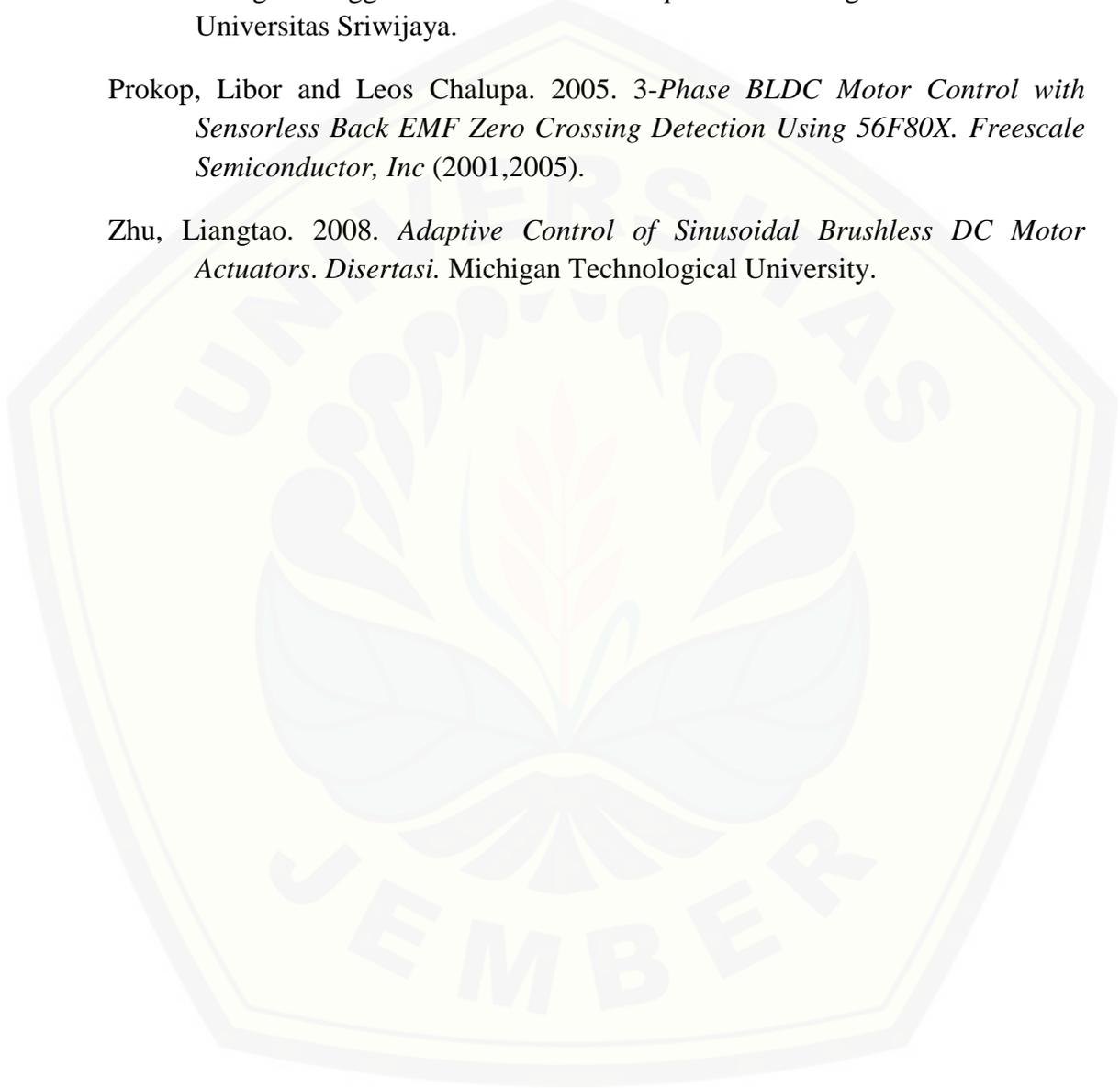
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada tugas akhir ini, maka dapat diambil beberapa saran antara lain:

1. Perlu diperhatikan dalam pembuatan *three-phase motor brushless direct current*, terutama *gap* (celah) antara rotor dan stator motor, ketika melilit menggunakan kawat tembaga, serta kerapatan medan magnet pada magnet permanen yang digunakan untuk rotor motor.
2. Pada penelitian selanjutnya diharapkan lebih teliti dalam pembuatan maupun perancangan *three-phase sensorless brushless direct current motor* 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.
- Azzumar, Muhammad. 2012. Pemodelan dan Desain Kendali Sistem Aktuator Kendali Sirip Berbasis *Brushless DC Motor*. *Skripsi*. Depok : Teknik Elektro Universitas Indonesia.
- 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.
- 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.

- Nagamori, S. 1985. Tokyo : Sogo Electronics Publishing Company. Terjemahan oleh T. Kenjo. 1985. *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*. New York : Oxford University Press.
- Nugroho, Nalaprana dan Sri Agustina. 2015. Analisa Motor DC (*Direct Current*) Sebagai Penggerak Mobil Listrik. *Paper*. Palembang : Teknik Elektro Universitas Sriwijaya.
- Prokop, Libor and Leos Chalupa. 2005. *3-Phase BLDC Motor Control with Sensorless Back EMF Zero Crossing Detection Using 56F80X*. Freescale Semiconductor, Inc (2001,2005).
- Zhu, Liangtao. 2008. *Adaptive Control of Sinusoidal Brushless DC Motor Actuators*. *Disertasi*. Michigan Technological University.





LAMPIRAN

LAMPIRAN 1
TEKNIK ELEKTRO UNIVERSITAS JEMBER

1. Perhitungan Daya ($V_{450}=E_{a1}=4,1 \text{ V}$ & $V_{300}=E_{a2}=2,8\text{V}$)

$$P_{450} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{450} = \sqrt{3} \times 4,1 \times 0,45$$

$$P_{450} = 3,192 \text{ W}$$

$$P_{300} = \sqrt{3} \times V \times i$$

$$P_{300} = \sqrt{3} \times 2,8 \times 0,55$$

$$P_{300} = 2,664 \text{ W}$$

2. Perhitungan Kerapatan Fluks Magnet ($l=1,5 \text{ cm} = 0,015 \text{ m}$)

$$B_{450} = \frac{\mu N i}{2 l}$$

$$B_{450} = \frac{4 \times 10^{-7} \times 3,14 \times 450 \times 0,45}{2 \times 0,015}$$

$$B_{450} = 0,0848 \text{ T}$$

$$B_{300} = \frac{\mu N i}{2 l}$$

$$B_{300} = \frac{4 \times 10^{-7} \times 3,14 \times 300 \times 0,55}{2 \times 0,015}$$

$$B_{300} = 0,069 \text{ T}$$

3. Perhitungan Fluks Magnet

$$\Phi_{450} = B \times A$$

$$\Phi_{450} = B \times \pi r^2$$

$$\Phi_{450} = 0,0894 \times 3,14 \times (0,003)^2$$

$$\Phi_{450} = 2,53 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$\Phi_{300} = B \times A$$

$$\Phi_{300} = B \times \pi r^2$$

$$\Phi_{300} = 0,0672 \times 3,14 \times (0,003)^2$$

$$\Phi_{300} = 1,9 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

4. Perhitungan Kecepatan Motor ($V_{450}=E_{a1}=4,1$ v & $V_{300}=E_{a2}=2,8$ V)

$$n_{r(450)} = \left(\frac{120}{2 \pi p N} \right) \left(\frac{E_{a(450)}}{\phi_{450}} \right)$$

$$n_{r(450)} = \left(\frac{120}{2 \times 3,14 \times 3 \times 450} \right) \left(\frac{4,1}{2,53 \times 10^{-6}} \right)$$

$$n_{r(450)} = 22.934 \text{ rpm}$$

$$n_{r(300)} = \left(\frac{120}{2 \pi p N} \right) \left(\frac{E_{a(300)}}{\phi_{300}} \right)$$

$$n_{r(300)} = \left(\frac{120}{2 \times 3,14 \times 3 \times 300} \right) \left(\frac{2,8}{1,9 \times 10^{-6}} \right)$$

$$n_{r(300)} = 14.635 \text{ rpm}$$

5. Perhitungan Torsi

$$T_{450} = \left(\frac{120}{p} \right) \left(\frac{\sqrt{3} E_a I_a}{n_r} \right)$$

$$T_{450} = \left(\frac{120}{3} \right) \left(\frac{\sqrt{3} \times 4,1 \times 0,45}{20.258} \right)$$

$$T_{450} = 0,0063 \text{ Nm}$$

$$T_{300} = \left(\frac{120}{p} \right) \left(\frac{\sqrt{3} E_a I_a}{n_r} \right)$$

$$T_{300} = \left(\frac{120}{3} \right) \left(\frac{\sqrt{3} \times 2,8 \times 0,55}{13.884} \right)$$

$$T_{300} = 0,00763 \text{ Nm}$$

6. Perhitungan Resistansi

$$R = \frac{\rho_{cu} l}{A}$$

$$R_{450} = \frac{\rho_{cu} l}{A}$$

$$R_{450} = \frac{1,68 \times 10^{-8} \times 5,66}{\pi r^2}$$

$$R_{450} = \frac{1,68 \times 10^{-8} \times 5,66}{3,14 (0,1 \times 10^{-3})^2} = 3,03 \text{ ohm} \times 3 = 9,09 \text{ ohm}$$

$$R_{300} = \frac{\rho_{cu} l}{A}$$

$$R_{300} = \frac{1,68 \times 10^{-8} \times 4,25}{\pi r^2}$$

$$R_{300} = \frac{1,68 \times 10^{-8} \times 4,25}{3,14 (0,1 \times 10^{-3})^2} = 2,27 \text{ ohm} \times 3 = 6,81 \text{ ohm}$$

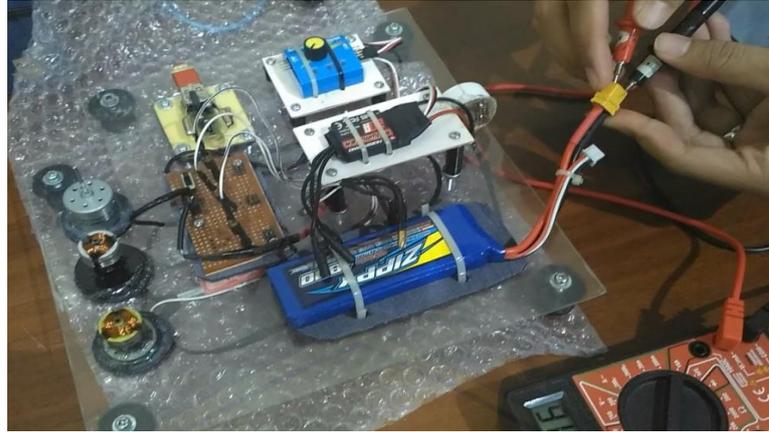
LAMPIRAN 2
TEKNIK ELEKTRO UNIVERSITAS JEMBER



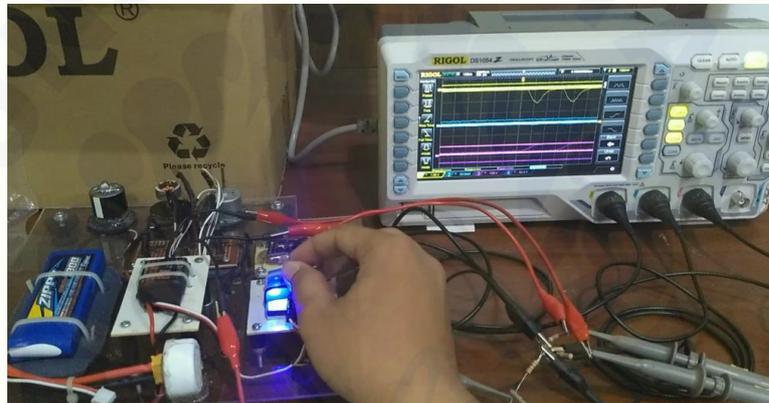
Gambar 1. Pengujian motor BLDC tiga fasa *sensorless* dengan tipe konstruksi *out-runner*



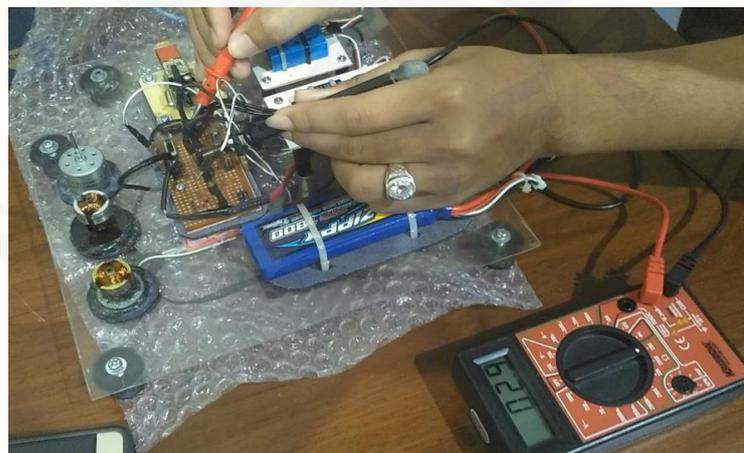
Gambar 2. Pengujian pengaturan tegangan menggunakan Servo CCPM (Cyclic Collective Pitch Mixing)



Gambar 3. Pengujian tegangan pada baterai Li-Po Zippy Flightmax 1800 mAh 2S / 7,4 V 20 C menggunakan multimeter



Gambar 4. Pengujian bentuk gelombang dan frekuensi pada driver ESC Hobbywing Skywalker 20 A menggunakan osiloskop



Gambar 5. Pengujian resistansi kawat tembaga pada stator pertama dengan jumlah lilitan sebesar 150 lilit menggunakan multimeter



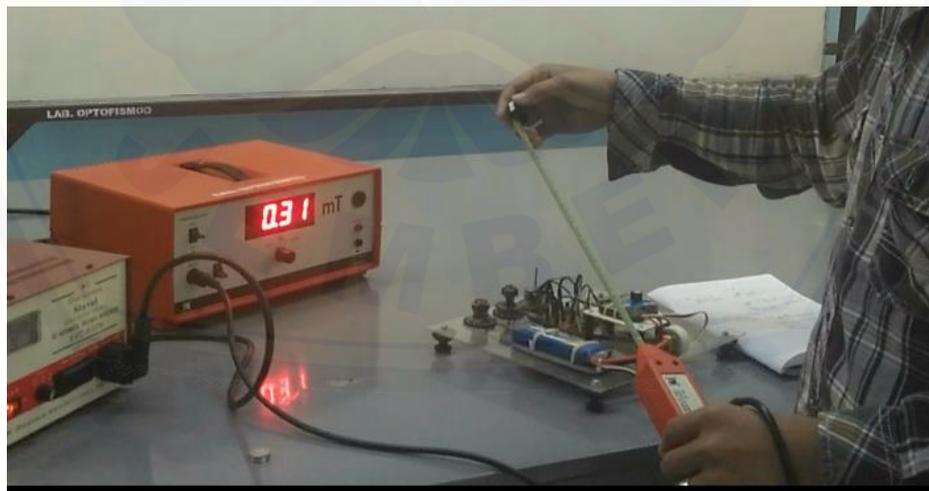
Gambar 6. Pengujian resistansi kawat tembaga pada stator kedua dengan jumlah lilitan sebesar 100 lilit menggunakan multimeter



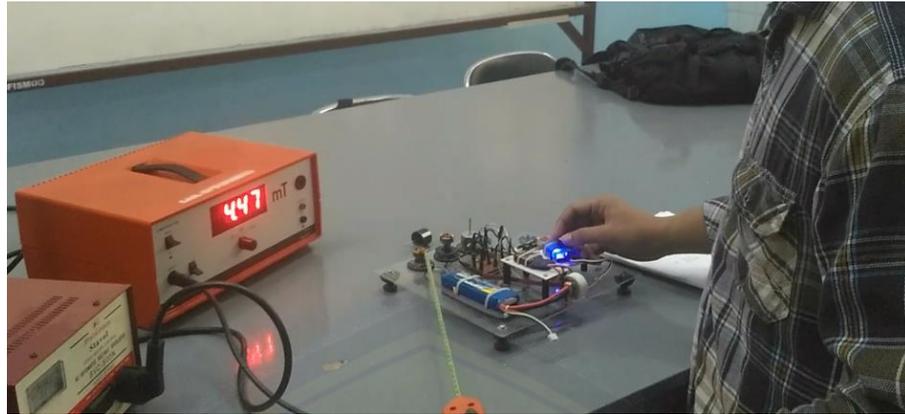
Gambar 7. Pengujian kecepatan motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan jumlah lilitan sebesar 100 lilit menggunakan tachometer



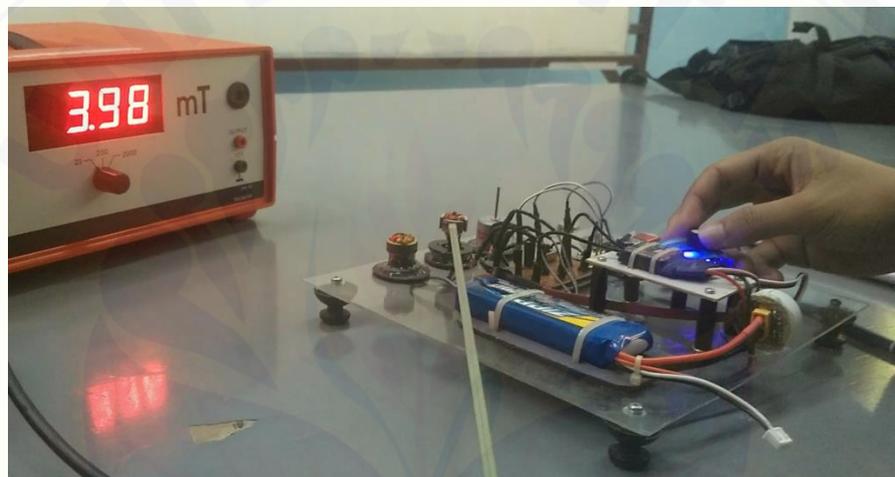
Gambar 8. Pengujian kecepatan motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan jumlah lilitan sebesar 150 lilit menggunakan tachometer



Gambar 9. Pengujian medan magnet pada rotor motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan menggunakan teslameter



Gambar 10. Pengujian medan magnet dengan jumlah lilitan 150 lilit pada stator motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan menggunakan teslameter



Gambar 11. Pengujian medan magnet dengan jumlah lilitan 100 lilit pada stator motor BLDC 3 fasa *sensorless* dengan menggunakan teslameter