



**UNJUK KERJA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT*
AXIAL FLUX 3 FASA STATOR GANDA TERHADAP PERBEDAAN
JENIS KAWAT ENAMEL PADA KUMPARAN STATOR**

SKRIPSI

Oleh

M. Faisal Alif Hidayat

NIM 161910201051

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2020**



**UNJUK KERJA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT*
AXIAL FLUX 3 FASA STATOR GANDA TERHADAP PERBEDAAN
JENIS KAWAT ENAMEL PADA KUMPARAN STATOR**

SKRIPSI

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

Oleh

M. Faisal Alif Hidayat

NIM 161910201051

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

2020

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. Allah SWT, Tuhan semesta alam tempatku kembali.
2. Nabi Muhammad SAW, Nabi junjungan umat Islam yang telah menarik kami dari zaman jahiliyah ke zaman yang lebih baik.
3. Kedua orang tua saya, bapak Mukhlis S,Sos dan ibu Rusida Kurniawati.
4. Keluarga besar alm. bapak Qodiri dan alm. bapak Usnaini.
5. Guru-guru saya yang telah menemani dari taman kanak-kanak sampai dengan perguruan tinggi.
6. Dosen pembimbing saya, bapak Ir.Widyono Hadi, M.T dan bapak Arizal Mujibtamala S.T.,M.T.
7. Alumni tercinta Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

“Jika Terjadi Maka Terjadilah”

(QS. Ibrahim : 7)

“Boleh jadi kamu bencikan sesuatu, padahal ia baik bagimu, dan boleh jadi kamu sukakan sesuatu, tetapi ia tidak baik buatmu. Allah mengetahui, sedangkan kamu tidak mengetahui”

(QS. Al-Baqarah : 216)

“Semua yang kamu inginkan belum tentu apa yang kamu dapat maka biarkanlah semesta bekerja”

(M. Faisal Alif Hidayat)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : M. Faisal Alif Hidayat

NIM : 161910201051

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul: “**Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda Terhadap Perbedaan Jenis Kawat Enamel Pada Kumparan Stator**” adalah benar-benar karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun, serta bukan karya jiplakan. Saya berani bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Jember, 14 Juli 2020

Yang menyatakan,

M. Faisal Alif Hidayat

NIM.161910201051

SKRIPSI

**UNJUK KERJA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT*
AXIAL FLUX 3 FASA STATOR GANDA TERHADAP PERBEDAAN
JENIS KAWAT ENAMEL PADA KUMPARAN STATOR**

Oleh

M. Faisal Alif Hidayat
NIM 161910201051

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Arizal Mujibtamala, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda Terhadap Perbedaan Jenis Kawat Enamel Pada Kumparan Stator” karya M. Faisal Alif Hidayat telah diuji dan disahkan pada:

Hari, tanggal : Selasa, 14 Juli 2020
Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji :

Ketua,

Anggota I,

Ir. Widyono Hadi, M.T
NIP 196104141989021001

Arizal Mujibtamala Nanda Imron,
S.T., M.T.
NIP. 760017099

Anggota II

Anggota III

Dr. Ir. Satriyo Budi Utomo, S.T., M.T.
NIP 198501262008011002

Widya Cahyadi, S.T., M.T.
NIP. 198511102014041001

Mengesahkan
Dekan,

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.
NIP 197008261997021001

RINGKASAN

Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda Terhadap Perbedaan Jenis Kawat Enamel Pada Kumparan Stator; M. Faisal Alif Hidayat, 161910201051; 2020; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Pada fenomena dewasa ini, krisis energi merupakan suatu bentuk masalah yang paling menjadi perbincangan khalayak, termasuk di Indonesia. Berdasarkan masalah tersebut, perlu adanya sistem pengembangan dan perbaikan terhadap teknologi yang sudah maupun belum ada untuk masyarakat.. Salah satu yang terus dilakukan dalam pengembangan sektor teknologi berupa mesin DC yang sangat penting pada segala aspek kehidupan dan sudah banyak pada kehidupan sehari-hari . Beberapa peralatan mesin DC yang terus dilakukan pengembangan yaitu berupa motor BLDC (*Brushless Direct Current Motor*). Kelebihan motor brushless dibandingkan motor brush adalah daya tinggi terhadap torsi tinggi, kecepatan tinggi, kontrol elektronik, dan perawatan yang rendah.(Usattmotor, 2017) Dewasa ini semakin banyak jenis motor BLDC yang digunakan dalam membantu optimasi kinerja peralatan lain, diantaranya motor BLDC tipe fluks aksial.

Pengujian unjuk kerja dilakukan menggunakan motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dengan jumlah kutub sebanyak 12 kutub pada kedua stator. Pengujian dilakukan dengan dua kawat enamel yang berbeda jenis (Hellenic dan Supreme) 0,3 mm. Setiap kumparan pada kawat enamel memiliki panjang 13,5 m yang terpasang pada stator. Memiliki rotor sebesar 7,1 cm. pada rotor dipasang 8 buah magnet neodmium 15 x 2mm. Untuk mengetahui hasil unjuk kerja motor digunakan bantuan driver motor 3 fasa yang diberi tegangan 24 volt. Hal ini dikarenakan untuk mendapatkan unjuk kerja maksimum dari motor sehingga dapat diukur arus, tegangan, maupun kecepatan motor.

Sistem pengujian dilakukan tiga kali untuk mengetahui unjuk kerja motor dengan kawat enamel yang telah digunakan sekaligus mengetahui perubahan

resistansi pada jenis kawat enamel tersebut. Setelah dilakukan pengumpulan data, maka dilakukan kembali pengujian kembali dengan mengganti menggunakan kawat enamel yang berbeda. Selanjutnya dapat dibandingkan hasil pengujian tersebut dengan hasil pengujian yang sebelumnya dengan membandingkan kecepatan, torsi, dan perubahan kawat enamel.

Dari hasil pengujian, dengan menggunakan perbedaan jenis kawat enamel (*Hellenic* dan *Supreme*) memiliki kelebihan maupun kekurangan pada masing-masing pada kecepatan maupun torsi yang dihasilkan. Begitu pula diketahui perubahan resistansi pada kawat enamel sangat signifikan berubah pada percobaan pertama dan kedua yang dipengaruhi perubahan suhu saat pertama motor bekerja.

SUMMARY

Brushless Direct Current Axial Flux 3 Phase Stator Motor Performance Of Different Types Of Enameled Wire In Stator Coils; M. Faisal Alif Hidayat, 161910201051; 2020; Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering University of Jember

In today's adult phenomenon, the energy crisis is the most problematic form of public discussion, including in Indonesia. Based on these problems, the need for a system of development and improvement of technology that is or does not exist for the community. Some DC machine tools that are continuously being developed are BLDC (Brushless Direct Current Motor) motors. The advantages of brushless motors compared to brush motors are high power against high torque, high speed, electronic control, and low maintenance. (Usattmotor, 2017) Today more and more types of BLDC motors are used in helping to optimize the performance of other equipment, including flux type BLDC motors axial.

Performance testing was performed using a Brushless Direct Current Axial Flux 3 phase double stator motor with a total of 12 poles on both stators. Tests were carried out with two different types of enameled wire (Hellenic and Supreme) 0.3 mm. Each coil on the enameled wire has a length of 13.5 m mounted on the stator. Has a rotor of 7.1 cm. 8 rotor neodymium 15 x 2mm magnets were installed on the rotor. To find out the results of the performance of the motor used 3-phase motor driver assistance with a voltage of 24 volts. This is due to get the maximum performance from the motor so that the current, voltage, and speed of the motor can be measured.

The testing system is carried out three times to determine the performance of the motor with enameled wire that has been used as well as to know the change in resistance in the type of enameled wire. After data collection, the test is repeated again by replacing it using a different enameled wire. Furthermore, the test results can be compared with the results of previous tests by comparing the speed, torque, and changes in enameled wire.

From the test results, using different types of enameled wire (Hellenic and Supreme) has advantages and disadvantages in each of the speed and torque produced. Similarly, it is known that changes in resistance in enameled wire are very significant changes in the first and second experiments that are affected by changes in temperature when the first motor works.



PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda Terhadap Perbedaan Jenis Kawat Enamel Pada Kumparan Stator”. Skripsi ini disusun guna memenuhi salah satu syarat menuntaskan pendidikan Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

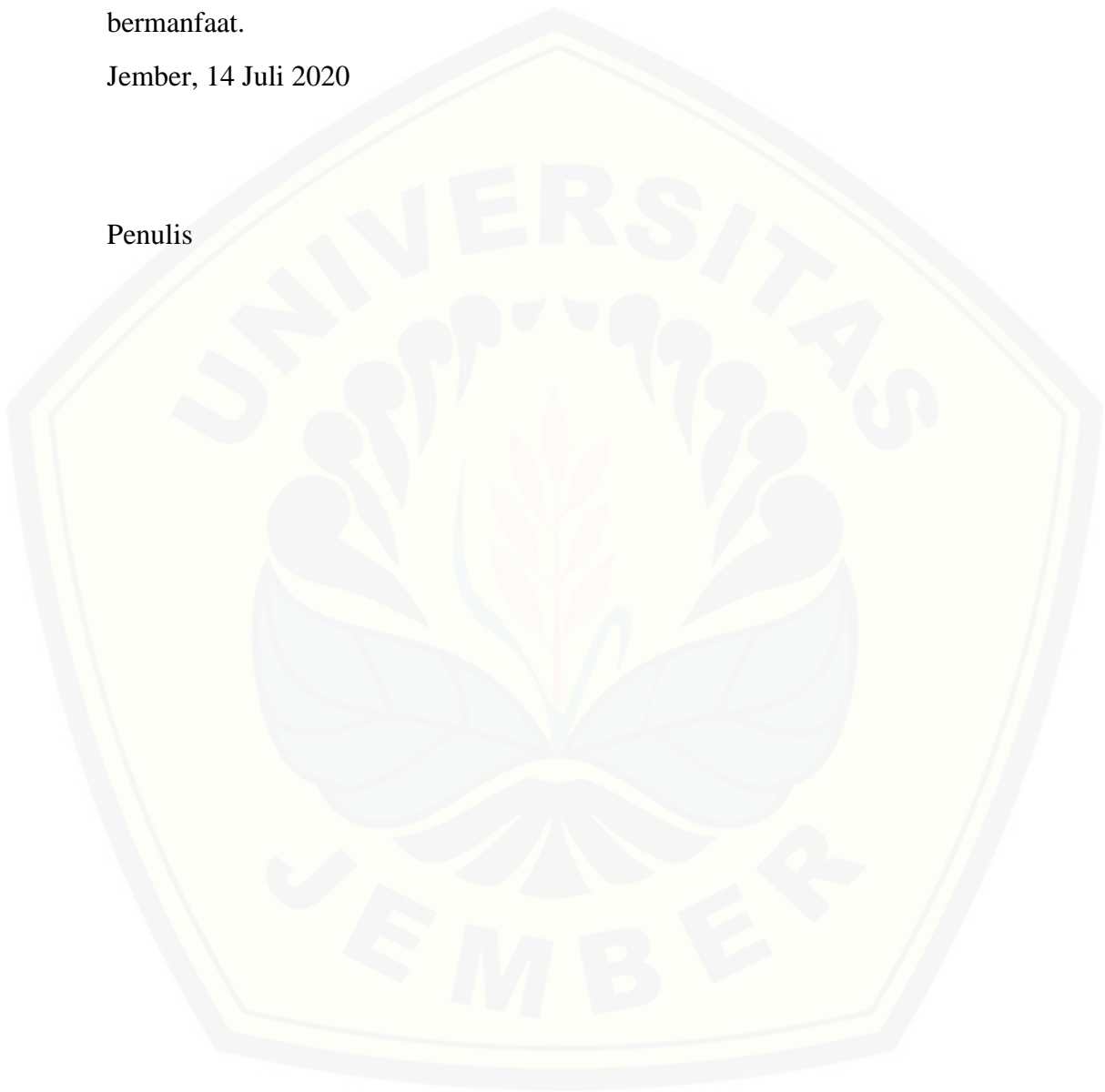
1. Allah SWT, atas kemurahan-Nya saya dapat menuntaskan skripsi ini.
2. Nabi Muhammad SAW, Nabi besar junjungan umat Islam yang telah menarik kami dari zaman jahiliyah ke zaman yang lebih baik.
3. Kedua orang tua saya, bapak Mukhlis S,Sos dan ibu Rusida Kurniawati yang telah membantu baik moral atau materil serta doa yang tidak pernah putus.
4. Dosen pembimbing utama bapak Ir. Widyono Hadi, M. T. serta bapak Arizal Mujibtamala, S.T., M.T. Dosen penguji bapak Dr. Satryo Budi Utomo, S.T., M.T. dan bapak Widya Cahyadi, S.T., M.T. yang selalu memberikan arahan dalam penelitian ini.
5. Bapak Alfredo Bayu Satriya, S.T., M.T.selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing selama penulis menjadi mahasiswa. Serta jajaran dosen jurusan Teknik Elektro Universitas Jember yang telah memberikan ilmu selama penulis menempuh perkuliahan.
6. Keluarga Besar Teknik Elektro 2016 yang sudah menemani saya berproses selama menjadi mahasiswa Teknik Elektro Universitas Jember.
7. Kepala Laboratorium, dan PLP Laboratorium Konversi Energi Listrik yang sudah sangat membantu pembuatan alat pada penelitian ini.
8. Teman-teman Asisten Laboratorium Teknik “Patrang” Universitas Jember sudah menemani selama saya di Laboratorium.

9. Guru-guru yang telah membimbing saya mulai dari taman kanak-kanak sampai sekolah menengah.

Penulis juga menerima semua kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, 14 Juli 2020

Penulis

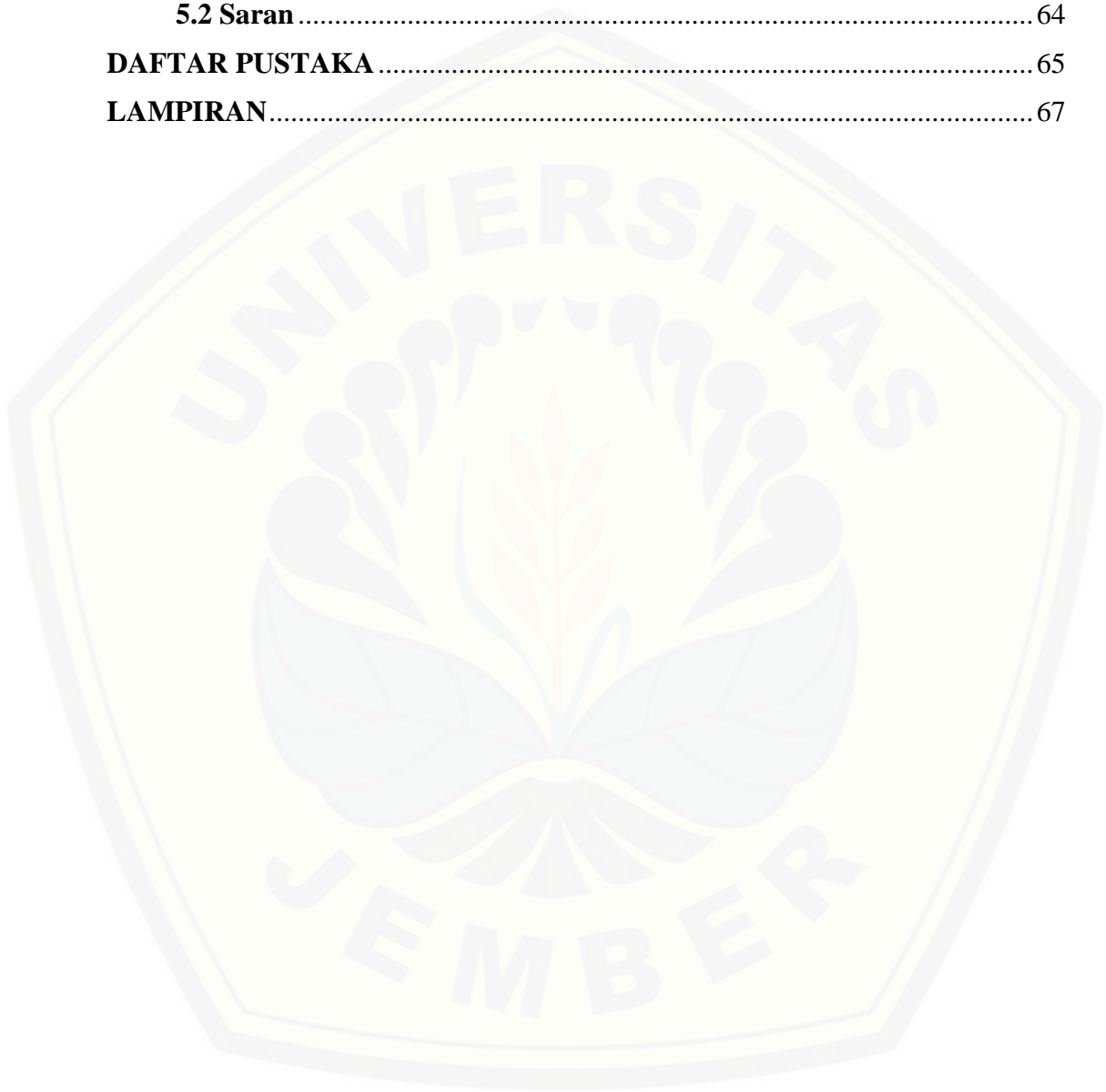


DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xxi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pengertian Motor Listrik	5
2.2 Pengertian Motor DC	5
2.3 Motor Brushless DC	7
2.3.1 Prinsip Dasar Motor BLDC.....	8
2.3.2 Konstruksi Motor BLDC.....	9
2.4 Kecepatan Motor	11
2.5 Torsi Motor	12
2.6 Gaya Putar Motor	14
2.7 Magnet Permanen	16

2.8 <i>Axial Flux</i>	16
2.9 Sensor Hall Effect	17
2.10 Kawat Tembaga Enamel	18
BAB 3. METODE PENELITIAN	25
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	25
3.2 Alat dan Bahan	25
3.3 Tahapan Penelitian	27
3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem	29
3.5 Desain Alat	30
3.6 Alur Perancangan Alat	31
3.7 Metode Pengambilan Data	33
3.7.1 Pemberian Tegangan Pada Motor	33
3.7.2 Pengukuran Kuat Medan Magnet	33
3.7.3 Pengukuran Unjuk Kerja Motor (Kecepatan, Tegangan, dan Arus)	34
3.7.4 Pengukuran resistansi dalam kawat enamel	34
3.7.5 Perhitungan	34
BAB 4. ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1 Pengujian Unjuk Kerja motor <i>Brushless Direct Current Axial Flux</i> 3 Fasa Stator Ganda Terhadap Perbedaan Jenis Kawat Enamel Pada Kumputan Stator	38
4.1.1 Hasil unjuk kerja motor Brushles Direct Current Axial Fllx 3 Fasa Stator Ganda Dengan Kawat Enamel Hellenic	38
4.1.2 Hasil unjuk kerja motor Brushles Direct Current Axial Fllx 3 Fasa Stator Ganda Dengan Kawat Enamel Supreme.	50
4.2 Perbandingan Unjuk Kerja Motor <i>Brushless Direct Current 3 Fasa Stator Ganda Terhadap Perbedaan Kawat Enamel</i>	58
4.2.1 Perbandingan Kecepatan Dalam Perbedaan Kawat Enamel Hellenic dan Kawat Enamel Supreme	59
4.2.2 Perbandingan Torsi Dalam Perbedaan Kawat Enamel Supreme dan Kawat Enamel Hellenic	61

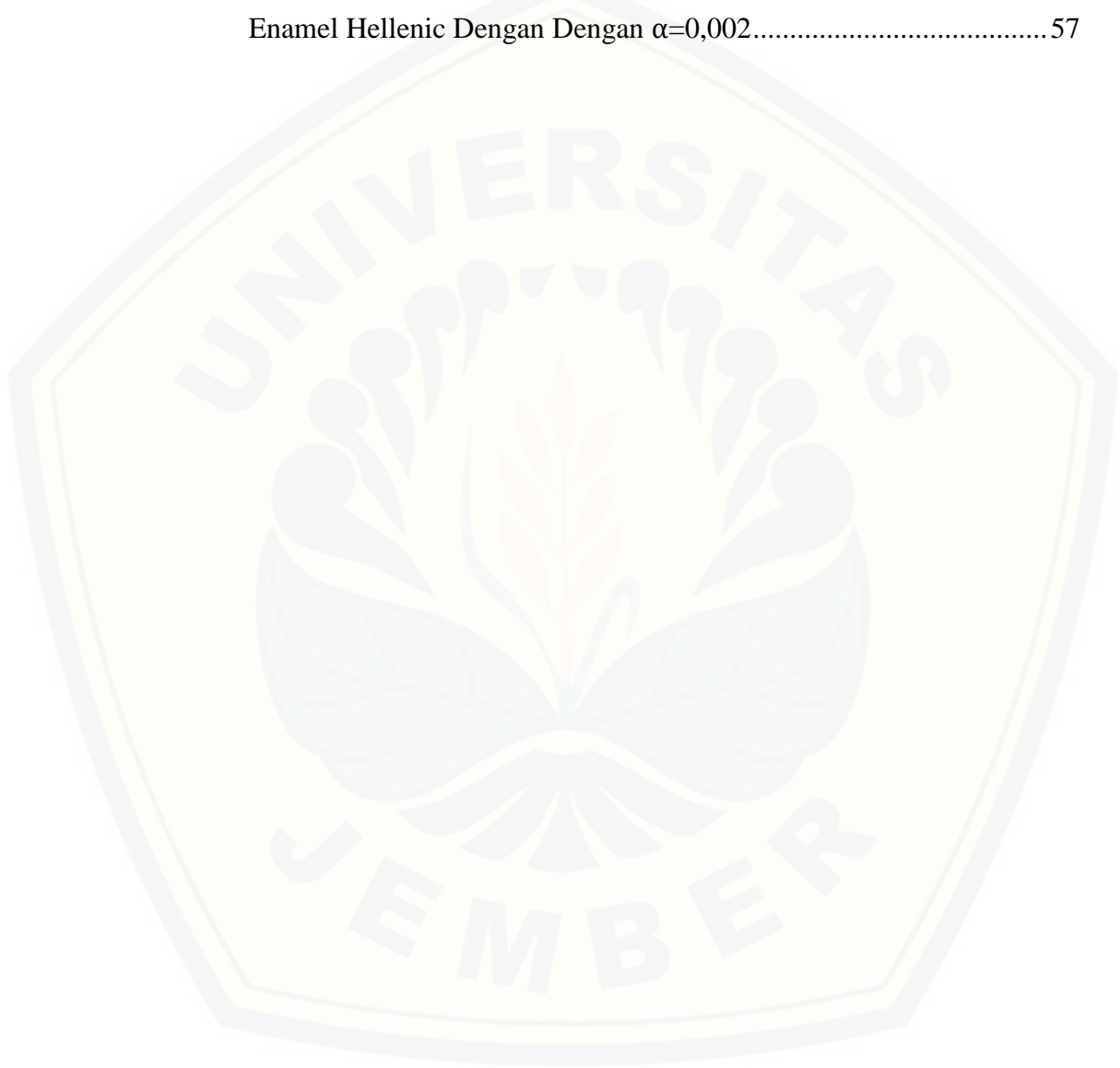
4.2.3 Perbandingan Perubahan Resistansi Dalam Perbedaan Kawat Enamel Supreme dan Kawat Enamel Hellenic.	62
BAB 5. PENUTUP	63
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	65
LAMPIRAN	67



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Standar produk kawat Supreme Bentuk Lingkaran Padat	20
Tabel 2.2 Rincian Kawat Hellenic Mediotherm	21
Tabel 2.3 Konduktivitas Suhu Dalam Berbagai Bahan.	22
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	25
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Unjuk kerja Motor <i>Brushless Direct Current</i> Dengan Menggunakan Kawat Enamel Hellenic.	39
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Uji Tahanan Kawat Enamel Hellenic dengan selang waktu 5 Menit Kerja.	40
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Uji Suhu Kawat Enamel Hellenic dengan selang waktu 5 Menit Kerja.....	42
Tabel 4.4 Pengujian Kecepatan Putaran Motor <i>Brushless Direct Current</i> 3 Fasa Stator Ganda.....	44
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Gaya dan Torsi Motor <i>Brushless Direct Current</i> 3 Fasa Stator Ganda dengan Kawat Enamel Hellenic.....	45
Tabel 4.6 Perhitungan Resistansi Dalam Pada Kutub Stator Sisi R Kawat Enamel Hellenic Dengan $\alpha=0,002$	47
Tabel 4.7 Perhitungan Resistansi Dalam Pada Kutub Stator Sisi L Kawat Enamel Hellenic Dengan Dengan $\alpha=0,002$	48
Tabel 4.8 Perbandingan Nilai Hasil Pengukuran Dengan Nilai Hasil Perhitungan Pada sisi R.....	48
Tabel 4.9 Hasil Pengukuran Unjuk kerja Motor <i>Brushless Direct Current</i> Dengan Menggunakan Kawat Enamel Supreme.....	50
Tabel 4.10 Hasil Pengukuran Uji Tahanan Kawat Enamel Hellenic dengan selang waktu 5 Menit Kerja.	51
Tabel 4.11 Hasil Pengukuran Uji Suhu Kawat Enamel Hellenic dengan selang waktu 5 Menit Kerja.....	52
Tabel 4.12 Perhitungan Kecepatan Putaran Motor <i>Brushless Direct Current</i> 3 Fasa Stator Ganda.....	54

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Gaya dan Torsi Motor <i>Brushless Direct Current</i> 3 Fasa Stator Ganda dengan Kawat Enamel Supreme.	55
Tabel 4.14 Perhitungan Resistansi Dalam Pada Kutub Stator Sisi R Kawat Enamel Supreme Dengan $\alpha=0,002$	57
Tabel 4.15 Perhitungan Resistansi Dalam Pada Kutub Stator Sisi L Kawat Enamel Hellenic Dengan Dengan $\alpha=0,002$	57



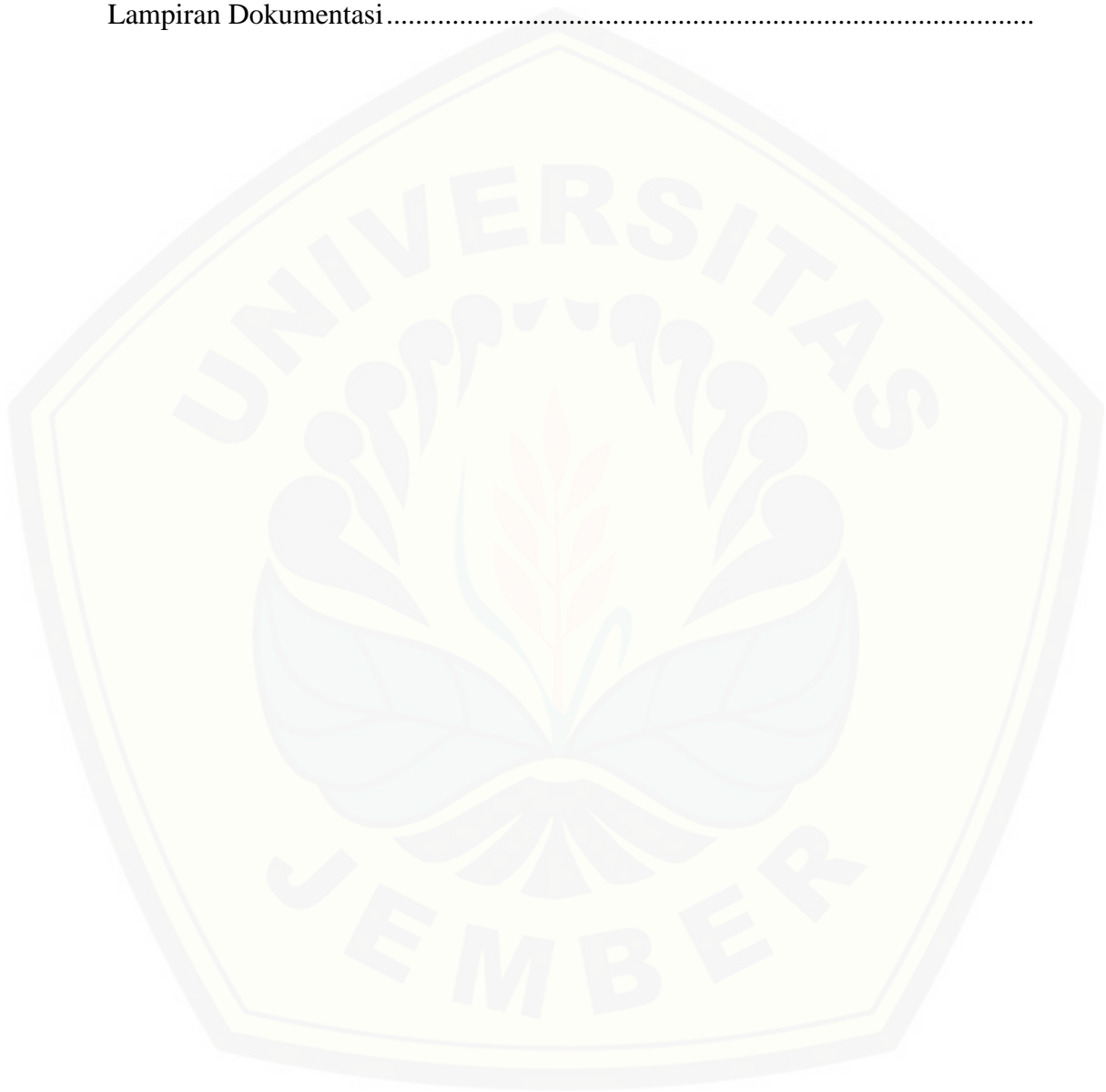
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Prinsip Gerak Putar Pada Motor DC	6
Gambar 2.2 Motor <i>Brushless Direct Current</i>	7
Gambar 2.3 Prinsip Kerja Motor <i>Brushless Direct Current</i>	8
Gambar 2.4 Stator Motor <i>Brushless Direct Current</i>	11
Gambar 2.5 Magnet <i>Neodymium</i>	16
Gambar 2.6 Desain Bentuk Tipe <i>Axial Flux</i>	17
Gambar 2.7 Sensor <i>Hall Effect</i> A3144	19
Gambar 2.8 Kawat Enamel	19
Gambar 3.1 Flowchart Tahap Penelitian	27
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem	28
Gambar 3.3 Perancangan Rotor <i>Brushless Direct Current Axial Flux</i> 3 fasa 8 Kutub	29
Gambar 3.4 Rancangan Keseluruhan Dari Stator dan Rotor 8 Kutub Tiga Fasa..	29
Gambar 3.5 Rancangan Keseluruhan Dari Stator dan Rotor 8 Kutub Tiga Fasa tampak samping	29
Gambar 4.1 Motor <i>Brushless Direct Current Axial Flux</i> 3 Fasa Stator Ganda	36
Gambar 4.2 Pengujian ukur magnet <i>Neodymium</i>	36
Gambar 4.3 Grafik peningkatan resistansi pada kutub yang digunakan pada kawat enamel Hellenic Sisi R	41
Gambar 4.4 Grafik peningkatan resistansi pada kutub yang digunakan pada kawat enamel Hellenic	41
Gambar 4.5 Grafik Perbandingan Nilai Pengukuran Kecepatan Dengan Nilai Perhitungan Kecepatan	45
Gambar 4.6 Grafik kenaikan torsi pada nilai kondisi pengujian berulang menggunakan kawat hellenic	47
Gambar 4.7 Grafik Error Persen Perbandingan Nilai Hasil Pengukuran Dengan Nilai Hasil Perhitungan Pada Enamel Hellenic.	49
Gambar 4.8 Grafik kenaikan suhu pada kumparan R1 dan L1 menggunakan kawat Supreme	54

Gambar 4.9 Grafik kenaikan torsi pada nilai kondisi pengujian berulang menggunakan kawat Supreme	56
Gambar 4.10 Grafik Error Persen Perbandingan Nilai Hasil Pengukuran Dengan Nilai Hasil Perhitungan Pada Enamel Supreme.	58
Gambar 4.11 Grafik Perbandingan Pengukuran Kecepatan Antara Kawat Jenis Hellenic dan Kawat Jenis Supreme	60
Gambar 4.12 Grafik Perbandingan Torsi Berdasarkan Kecepatan Pada Saat Motor Menggunakan Kawat Enamel Jenis Hellenic dan Kawat Enamel Jenis Supreme.	61
Gambar 4.13 Grafik Perbandingan Perubahan Resistansi Terhadap Perubahan Suhu Pada Enamel Hellenic dan Enamel Supreme Pada Kutub R1.....	63

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran Perhitungan.....	
Lampiran Dokumentasi.....	



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada fenomena dewasa ini, krisis energi merupakan suatu bentuk masalah yang paling menjadi perbincangan khalayak, termasuk di Indonesia. Berdasarkan masalah tersebut, perlu adanya sistem pengembangan dan perbaikan terhadap teknologi yang sudah maupun belum ada untuk masyarakat. Salah satu yang terus dilakukan dalam pengembangan sektor teknologi berupa mesin DC yang sangat penting pada segala aspek kehidupan dan sudah banyak pada kehidupan sehari-hari. Beberapa peralatan mesin DC yang terus dilakukan pengembangan yaitu berupa motor BLDC (*Brushless Direct Current Motor*). Kelebihan motor *brushless* dibandingkan motor brush adalah daya tinggi terhadap torsi tinggi, kecepatan tinggi, kontrol elektronik, dan perawatan yang rendah. (Usattmotor, 2017) Dewasa ini semakin banyak jenis motor BLDC yang digunakan dalam membantu optimasi kinerja peralatan lain, diantaranya motor BLDC tipe fluks aksial. Motor ini merupakan motor yang umum digunakan dengan pada peralatan fan dengan *blade*.

Motor fluks aksial merupakan salah satu jenis penggunaan aplikasi dari desain mesin-mesin listrik yang memiliki arah aliran fluks secara aksial. Hal ini tidak menutup sebuah kemungkinan seiring dengan perkembangan zaman, motor BLDC ini terus dilakukan perkembangan dengan berbagai macam variasi dari tipe-tipe mulai dari bentuk stator, rotor, desain hingga banyaknya jumlah rotor dan stator dalam generator tersebut termasuk pengaruh perubahan pada jenis kawat enamel yang digunakan dalam perancangan stator pada motor BLDC.

Pada tugas akhir ini akan dirancang sebuah motor *brushless* DC tiga fasa *Axial Flux* stator ganda. Penelitian terkait mengenai motor *Brushless* DC tiga fasa *Axial Flux* sudah pernah dilakukan oleh Raja Nor Firdaus, dkk mengenai unjuk kerja motor *Brushless* DC tiga fasa dengan *Axial Flux*. Motor yang telah dibuat menggunakan double stator dan stator tunggal. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa dengan penambahan stator ganda maka dapat

menambah torsi putaran (Nm) pada motor BLDC. Selain itu dalam penelitian lain yang telah dilakukan oleh Nazaruddin Sinaga dan Marsono H. Sonda dari UNDIP Semarang mengenai Pemilihan Kawat Enamel Untuk Pembuatan Solenoid Dinamometer Arus Eddy Dengan Torsi Maksimum 496 Nm. Beliau menyebutkan bahwa perbandingan medan magnet pada kumparan ini juga berpengaruh terhadap gaya tarik menarik maupun tolak menolak antara rotor dan stator. Sehingga dengan mengkombinasikan keduanya dan difokuskan terhadap perbedaan jenis kawat enamel yang digunakan akan menghasilkan suatu penelitian yang baru.

Pada penelitian ini akan dirancang sebuah motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dengan magnet neodmium pada rotor motor. Karena motor listrik dengan fluks magnetik *axial* ini dapat didesain *coreless* (tanpa armatur) sehingga sesuai dengan prinsip konstruksi motor *Brushless Direct Current*. Pada penelitian ini digunakan 6 buah kutub kumparan pada stator. Kawat tembaga yang digunakan dalam pembuatan kumparan pada stator berukuran 0.3 mm. Pada tengah stator terdapat rotor yang terdapat 8 buah magnet permanen. Pada pemasangan magnet dilakukan uji kutub terlebih dahulu sehingga magnet dapat dipasang secara bergantian pada setiap posisi kutubnya hingga 8 buah magnet terpasang pada rotor. Rotor tersebut akan berputar dengan adanya sensor *hall effect*. Pada motor BLDC 3 fasa, sensor *hall effect* berjumlah 3 buah sensor dengan kondisi pemasangan hall sensor A, hall sensor B, hall sensor C, bekerja ketika kutub utara sensor *hall effect* bertemu dengan magnet yang berkutub utara maka kumparan akan bersifat positif sehingga menghasilkan tegangan yang berbentuk sinyal kotak sebanyak 3 dikarenakan motor BLDC 3 fasa. Ketika motor ingin berputar searah jarum jam maka *hall effect* yang akan bekerja yaitu hall sensor A akan bertemu dengan magnet utara dan C akan bertemu dengan kutub selatan dan kutub B tidak aktif. Setelah berputar, maka berganti dengan *hall effect* C akan bertemu magnet dengan berkutub utara dan *hall effect* B akan bertemu selatan dan hall sensor A tidak bekerja kemudian berganti lagi hall sensor B akan bertemu utara sedangkan hall sensor A akan bertemu dengan selatan dan hall

sensor C tidak bekerja maka dengan kondisi tersebut motor akan berputar terus menerus dengan kondisi pertemuan sensor *hall effect* dan kutub magnet secara bergantian. Selanjutnya dalam perbandingan unjuk kerja, dilakukan penggantian pada kawat enamel pada kumparan dengan perbedaan jenis kawat enamel sehingga didapatkan hasil penelitian yang objektif

1.2 Rumusan Masalah

Adapun beberapa rumusan masalah yang dibuat dalam melakukan penelitian ini diantaranya adalah :

1. Bagaimana perancangan dan pembuatan motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa dengan stator ganda ?
2. Bagaimana perbedaan hasil yang didapatkan dari perubahan jenis kawat enamel terhadap kecepatan dan torsi motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda ?
3. Bagaimana perbedaan perubahan nilai resistansi yang terjadi jika dilakukan dengan menggunakan dua kawat enamel dengan jenis berbeda ?

1.3 Batasan Masalah

Agar penulisan lebih terarah sesuai dengan tujuan penulisan, maka perlu dibatasi beberapa hal yaitu:

1. Pembahasan mengenai pembuatan dan pengujian unjuk kerja dari motor *Brushless Direct Current* aksial tiga fasa dengan stator ganda dan rotor internal dengan ukuran yang spesifik.
2. Menggunakan stator ganda dengan 6 kumparan pada setiap stator.
3. Menggunakan sensor *hall effect* sebagai *on off* pada motor.
4. Peletakan kutub magnet dilakukan secara berseling antara kutub utara dan selatan magnet.
5. Menggunakan magnet neodymuim berukuran 15 x 2 mm sebagai bagian dari rotor motor.
6. Menganalisis torsi dan kecepatan pada motor *Brushless Direct Current* tiga fasa.
7. Tidak membahas mengenai driver motor.

8. Tidak membahas mengenai bahan pembuat kawat enamel.
9. Menggunakan kawat Hellenic jenis Medhioterm dan kawat Supreme jenis EIW dengan diameter 0,3 mm.

1.4 Tujuan

Tujuan penulisan skripsi ini adalah:

1. Merancang dan membuat motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda.
2. Mengetahui perbandingan hasil keluaran motor *Brushless Direct Current Axial Flux* tiga fasa stator ganda yang telah dirancang dan dibuat dalam kecepatan dan torsi dengan perbedaan jenis kawat pada kumparan.
3. Mengetahui perbedaan perubahan nilai resistansi yang terjadi dengan menggunakan kawat enamel yang berbeda.

1.5 Manfaat

1. Dapat digunakan sebagai acuan dalam penelitian mendatang mengenai motor *Brushless Direct Current* tiga fasa.
2. Dapat dijadikan sebagai alternatif pemanfaatan motor *Brushless Direct Current* yang lebih mutakhir bagi masyarakat.

1.6 Sistematika Penulisan

Secara garis besar penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. BAB 1. PENDAHULUAN
Berisi tentang latar belakang, rumusan asalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penelitian.
2. BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA
Berisi tentang teori yang berhubungan dengan penelitian yang dituliskan.
3. BAB 3. METODE PENELITIAN
Menjelaskan tentang metode kajian yang digunakan untuk menyelesaikan skripsi.
4. BAB 4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN
Berisi hasil penelitian berupa data dan analisis hasil penelitian.
5. BAB 5. PENUTUP
Berisi tentang kesimpulan dan saran dari penulis.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Motor Listrik

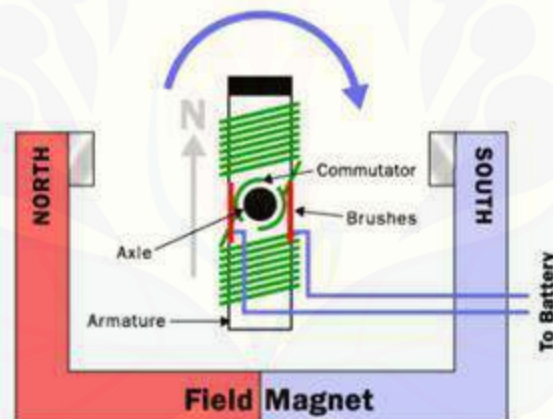
Motor listrik termasuk kedalam kategori mesin listrik dinamis dan merupakan sebuah perangkat elektromagnetik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya, memutar impeller pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, dll di industri dan digunakan juga pada peralatan listrik rumah tangga (seperti: mixer, bor listrik, kipas angin). Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri, sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri. (Hamdani, 2015)

Mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor listrik secara umum sama, yaitu arus listrik dalam medan magnet akan memberikan gaya, Jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran/loop, maka kedua sisi loop, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan. Dan pasangan gaya menghasilkan tenaga putar/ torsi untuk memutar kumparan. Motor-motor memiliki beberapa loop pada dinamanya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan. (HaGe, 2008)

2.2 Pengertian Motor DC

Motor listrik DC merupakan sebuah perangkat elektromagnetis yang dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik inilah yang akan digunakan untuk, misalnya memutar impeller pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, dll. Motor listrik digunakan juga di rumah (mixer, bor listrik, fan angin) dan di industri. Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri. (Wikipedia, 2019)

Pada gambar 2.1 dijelaskan bahwa motor DC memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam pada medan magnet, maka akan timbul tegangan (GGL) yang berubah-ubah arah pada setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan bolak-balik. Prinsip kerja dari arus searah adalah membalik fasa tegangan dari gelombang yang mempunyai nilai positif dengan menggunakan komutator, dengan demikian arus yang berbalik arah dengan kumparan jangkar yang berputar dalam medan magnet. Bentuk motor paling sederhana memiliki kumparan satu lilitan yang bisa berputar bebas di antara kutub-kutub magnet permanen.(simanjuntak, 2017)



Gambar 2.1 Prinsip Gerak Putar Pada Motor DC (Sumber: HowStuffWorks.com)

Motor DC tersedia dalam banyak ukuran, namun penggunaannya pada umumnya dibatasi untuk beberapa 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. Juga, motor tersebut 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.(Anang, 2018)

Keuntungan utama motor DC adalah kecepatannya mudah dikendalikan dan tidak mempengaruhi kualitas pasokan daya. Motor DC ini dapat dikendalikan

dengan meningkatkan tegangan dinamo akan meningkatkan kecepatan. Selain itu juga dapat menurunkan arus medan akan meningkatkan kecepatan.(Brian, 2013)

2.3 Motor *Brushless* DC

Motor *Brushless* DC (BLDC) merupakan salah satu jenis motor sinkron yang semakin banyak digunakan di banyak aplikasi karena efisien, bebas perawatan dan rasio daya terhadap beban yang baik. Namun pada pengoperasiannya motor BLDC memerlukan sensor posisi rotor (JITEKI, 2016). Motor BLDC atau dapat disebut juga dengan PMSM motor (Permanent Magnet Synchronous Motor) merupakan motor listrik synchronous AC 3 fasa . Synchronous berarti medan magnet yang dibangkitkan oleh stator dan medan magnet yang dibangkitkan oleh rotor berputar pada frekuensi yang sama. Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena BLDC memiliki BEMF berbentuk trapezoid sedangkan PMSM memiliki BEMF berbentuk sinusoidal. BLDC dan PMSM memiliki struktur yang sama dan dapat dikendalikan dengan metode six-step maupun metode PWM. Motor BLDC tidak mengalami Slip, seperti yang terjadi pada motor induksi biasa. Motor jenis ini mempunyai magnet permanent pada "rotor" sedangkan pada bagian stator-nya. Setelah itu, dengan menggunakan sebuah rangkaian sederhana (simple computer system), maka kita dapat merubah arus elektromagnet yang dihasilkan oleh motor ketika bagian rotor-nya berputar.

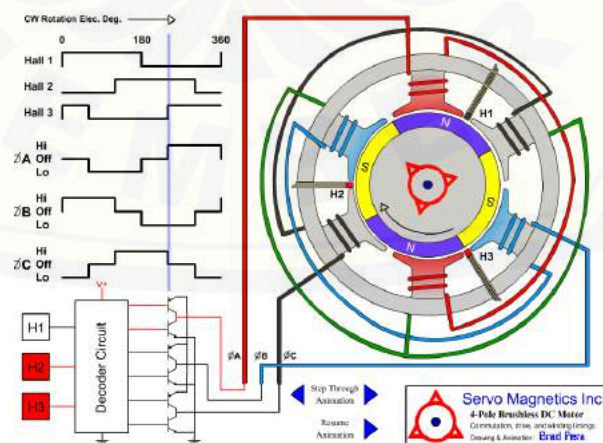


Gambar 2.2 Motor *Brushless* DC (Sumber: www.world.industries.com)

Pada gambar 2.2 dapat diketahui bahwa bentuk dari BLDC tidak jauh berbeda dengan motor DC jenis lainnya. Akan tetapi jika dibandingkan dengan motor DC jenis lainnya, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya brush. Dibandingkan dengan motor induksi, metode pengendalian motor BLDC jauh lebih rumit untuk kecepatan dan torsi yang konstan, karena tidak adanya brush yang menunjang proses komutasi dan harga untuk motor BLDC jauh lebih mahal. Motor BLDC banyak digunakan dalam banyak aplikasi, terutama untuk peralatan rumah tangga seperti blender, kipas, mixer dan vakum.. Rotor dari motor BLDC khas biasanya memiliki magnet permanen. Dengan menggunakan magnet permanen, tidak ada energi listrik yang diperlukan untuk menggairahkan medan, sehingga meningkatkan efisiensi, kepadatan torsi, dan kepadatan daya motor (IJPEDS, 2016).

2.3.1 Prinsip Dasar Motor BLDC

Prinsip kerja dari motor BLDC memiliki konstruksi yang berbeda dengan motor dc pada umumnya, dimana motor ini memiliki tiga fasa yang berbeda sehingga masing-masing fasa memiliki sudut sebesar 120° , sehingga motor BLDC menggunakan *hall* effect yang digunakan untuk mendeteksi posisi dimana rotor berada dengan menggunakan signal dari komutasi motor. (Onex, 2014)



Gambar 2.3 Prinsip Kerja Motor *Brushless* DC (Sumber : insinyoer.com)

Gambar 2.3 menjelaskan mengenai bagaimana komutasi menghasilkan medan dengan cara berprosesnya putaran fase U yang dihubungkan ke kutub positif pada bus motor DC *Brushless* lalu fase V dihubungkan ke ground netral(kutub negative baterai). 2 buah vektor fluks dihasilkan oleh fase U dan fase V. Jumlah kedua vektor tersebut menghasilkan vektor fluks pada stator dimana rotor akan berusaha mengikuti arah fluks stator tersebut. Pada kondisi ini motor sedang standby untuk berputar, ketika posisi rotor sudah mencapai posisi tertentu yang diberikan, maka nilai pernyataan logika pada *Hall* sensor 1 berubah dari “101” ke “001” dan pola tegangan baru tercipta pada motor DC *Brushless* (BLDC) dimana fase V sekarang tidak ter-energize tetapi fase W yang sekarang terhubung ke netralground dimana posisi vector fluks stator berada pada posisi yang berbeda pula. (Muhammadta, 2017)

2.3.2 Konstruksi Motor BLDC

Setiap motor BLDC memiliki dua bagian utama, rotor (bagian berputar) dan stator (bagian stasioner). Bagian penting lainnya dari motor adalah gulungan stator dan magnet rotor.

A. Rotor

Rotor merupakan bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor BLDC bagian rotor berbeda dengan rotor yang ada pada motor DC konvensional dimana hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara brushes (sikat) yang terhubung pada dua buah motor hingga delapan pasang kutub magnet permanen yang saling direkatkan menggunakan semacam perekat dan tidak ada brushes-nya. (onexperience, 2016)

Rotor terbuat dari magnet tetap dan dapat desain dari dua sampai delapan kutub Magnet Utara (N) atau Selatan (S). Material magnetis yang bagus sangat diperlukan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang bagus pula. Dengan kemajuan teknologi yang ada pada saat ini untuk jenis magnet sangatlah beragam, campuran logam sudah kurang populer untuk digunakan. Sedangkat banyak

magnet yang seringkali digunakan termasuk ferrit, neodimium, neodimium dan masih banyak yang lain dengan karakteristik terhadap kekurangan dan kelebihan masing-masing.

Adapun perhitungan untuk mengetahui diameter rotor adalah dengan rumus persamaan 2.1 berikut.

$$r = \frac{T}{B \cdot i \cdot l \cdot z} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan :

T = Torsi (Nm)

B = Medan Magnet (T)

i = Kuat Arus (A)

l = Jumlah lilitan

z = Kutub yang aktif

B. Stator

Stator merupakan bagian pada motor yang diam/statis dimanafungsinya adalah sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator maka akan timbul medan magnet. (alimahfudz, 2016). Rumus untuk mengetahui medan magnet secara umum dijelaskan pada rumus 2.2 berikut.

$$B = \frac{\Phi}{A} \dots\dots\dots (2.2)$$

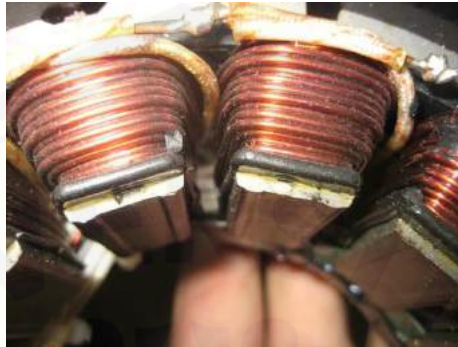
Keterangan :

B = Medan magnet (Wb/m^2)

Φ = Fluks Listrik (Weber)

A = Luas Bidang (m^2)

Pada motor *Brushless* DC statornya bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor *Brushless* DC terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol sedangkan pada motor DC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen.



Gambar 2.4 Stator Motor *Brushless* DC (Sumber: fab.cab.mit.edu)

Lilitan pada stator seperti pada gambar 2.4 untuk motor *Brushless* DC terdiri dari dua jenis, yaitu lilitan stator jenis trapezoidal dan jenis sinusoidal. Yang menjadi dasar perbedaan kedua jenis lilitan stator tersebut terletak pada hubungan antara koil dan lilitan stator yang bertujuan untuk memberikan EMF (Electro Motive Force) balik yang berbeda. EMF balik sendiri adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh lilitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Ketika motor BLDC sudah dibuat, jumlah lilitan pada 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. (Ridhwan, 2012)

Perubahan besarnya EMF balik ini mempengaruhi torsi motor BLDC, apabila kecepatan motor yang dihasilkan lebih besar dari tegangan potensial pada lilitan stator sehingga arus yang mengalir pada stator akan turun dan torsi pun akan ikut turun diarena berbanding lurus dengan faktor-faktor lain yang mempengaruhi torsi maka kenaikan dan penurunan arus sangat berpengaruh pada besarnya torsi yang dihasilkan motor BLDC. (IJCA, 2016)

2.4 Kecepatan Motor

Kecepatan motor didapatkan dari fungsi gerak pada rotor sehingga dapat menggerakkan sumbu penghubung antar motor dan stator. Fungsi dari kecepatan (misalnya dalam satuan metrik mNm RPM), gesekan dinamis karena gesekan kental bantalan bola, serta untuk arus eddy dalam stator berasal oleh Medan magnet berputar magnet. (Usatt, 2017). Sehingga untuk mengetahui nilai kecepatan yang ada pada motor secara teoritis maka dapat menggunakan rumus persamaan 2.3 berikut.

$$nr = \frac{\sqrt{3} \cdot Ia \cdot Ea \cdot 60}{2\pi \cdot T} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

nr = Kecepatan motor (rpm)

Ia = Arus Motor (A)

Ea = Tegangan Motor (V)

T = Torsi Motor

2.5 Torsi Motor

Torsi dalam fisika, juga disebut momen atau momen gaya, adalah bentuk ekuivalen rotasi dari gaya linear. Konsep torsi diawali dari kerja Archimedes dengan alat peraga tuas. Secara umum, torsi dapat dianggap sebagai gaya rotasi. Analog rotasi dari gaya, masa, dan percepatan adalah torsi, momen inersia dan percepatan sudut. Gaya yang bekerja pada tuas, dikalikan dengan jarak dari titik tengah tuas, adalah torsi. (Serway, R. A. and Jewett, Jr. J.W., 2003).

Untuk mengetahui nilai torsi maka harus mengetahui terlebih dahulu nilai yang ada pada daya yang diinginkan (P) dan kecepatan sudut (ω). Daya motor merupakan salah satu parameter dalam menentukan performa motor. Pengertian dari daya itu adalah besarnya kerja motor selama kurun waktu tertentu

(Arends&Berenschot 1980: 20). Dimana untuk mengetahui daya tiga fasa dari sisi input dapat diambil dari persamaan rumus 2.4 sebagai berikut :

$$P = V.I.\sqrt{3} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

P = Daya Motor (Watt)

V = Tegangan Input (Volt)

I = Arus Input (Ampere)

Sedangkan untuk menghitung nilai dari kecepatan sudut ω maka dapat diketahui dengan rumus 2.5 berikut:

$$\omega = \frac{2\pi.nr}{60} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

ω = kecepatan sudut

nr = Kecepatan motor (rpm)

Sehingga untuk mengetahui nilai torsi yang ada digunakan rumus persamaan 2.6 berikut.

$$T = \frac{P}{\omega} \dots\dots\dots(2.6)$$

Keterangan :

T = Torsi motor (Nm)

P = Daya Motor (Watt)

ω = Kecepatan sudut (RPS)

Persamaan lain yang dapat digunakan dalam perhitungan Torsi yaitu dapat menggunakan hasil perkalian gaya yang didapat pada 2.7 mengenai gaya putar

motor dengan lengan momen atau jari-jari rotor sehingga dapat dinyatakan dengan rumus 2.7 berikut.

$$T = F \times r \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan :

T = Torsi motor (Nm)

F = Gaya tarik menarik dan tolak menolak (N)

r = jari – jari rotor (m)

2.6 Gaya Putar Motor

Menurut Nugroho (2010), Gaya tolak menolak magnet terjadi pada saat magnet dengan kutub yang sejenis atau senama saling didekatkan. Dua kutub magnet U atau dua kutub magnet S yang saling berdekatan akan saling tolak menolak. Magnet permanen memiliki medan magnet (B). Besar nilai B dari sebuah magnet akan menentukan besarnya gaya tarik atau tolak terhadap benda lainnya. Pada posisi yang sama antar magnet dengan suatu titik akan dirasakan gaya tarik atau tolak yang berbeda apabila nilai B dari magnet berubah. Semakin rapat garis-garis medan magnet menunjukkan nilai B yang semakin besar begitu sebaliknya semakin renggang garis-garis medan magnet menunjukkan nilai B yang semakin kecil.

Sesuai dengan hukum Coulumb yang menyatakan bahwa besarnya gaya tolak-menolak atau gaya tarik-menarik antara kutub-kutub magnet, sebanding dengan kuat kutubnya masing-masing dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya.(Hajid,2018). Untuk menentukan gaya tolak menolak pada magnet maka dapat digunakan rumus 2.8 berikut:

$$F = k. \frac{m1. m2}{r^2} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

F = Gaya tarik menarik/ tolak menolak (N)

r = Jarak/gap antara magnet dan besi kumparan (meter)

m_1 = kuat kutub magnet permanen (A.m)

m_2 = kuat kutub magnet kumparan (A.m)

$k = 10^7$ (Weber/A.m)

Dalam menentukan kuat kutub magnet antara magnet permanen dengan kuat kutub pada kumparan memiliki rumus yang sama sesuai dengan hukum Gauss yaitu dengan mengalikan intensitas medan magnet (H) dengan luas penampang (A) dari magnet tersebut. Sehingga penentuan kuat kutub magnet pada magnet permanen dapat dilakukan konversi dari B (weber/ m^2) ke gauss sesuai dengan persamaan berikut:

$$m_1 = H \times A \dots\dots\dots (2.9)$$

$$m_1 = (B \times 10000) \times A$$

Keterangan:

m_1 = Kuat kutub magnet permanen

H = Intensitas medan magnet

B = Rapat garis gaya magnet

A = Luas penampang magnet

Sedangkan dalam kumparan juga memiliki medan magnet ketika dia aktif dimana pada rumus diatas dilambangkan dengan m_2 . Untuk menentukan kuat kutub magnet pada kumparan dapat diketahui dengan persamaan:

$$m_2 = \left(\frac{N \cdot I}{l} \right) \cdot A \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan:

m_2 = Kuat kutub magnet kumparan

N = Jumlah kumparan

I = Arus (A)

l = panjang kumparan (m)

2.7 Magnet Permanen (Neodymium)

Magnet permanen adalah magnet yang mempertahankan kekuatan magnet mereka dalam jangka waktu yang lama. Magnet permanen terbuat dari bahan feromagnetik keras. Mereka dapat termagnetisasi dengan menempatkan mereka di dalam medan magnet. Bahan feromagnetik menampilkan histeresis, yaitu: ketika medan magnet eksternal secara bertahap hilang, bahan tahan demagnetisasi pada rentang yang lebih panjang dari kekuatan medan magnet. (Budisma, 2016) Banyak magnet yang dapat digunakan sebagai rotor terhadap motor salah satunya adalah magnet neodimium.



Gambar 2.5 Magnet Neodymium (Sumber: ndigostruments.com)

Magnet neodimium merupakan magnet tetap yang paling kuat. Neodymium adalah kedua yang paling melimpah dari unsur tanah jarang (setelah cerium) yang hampir melimpah seperti tembaga. Hal ini ditemukan dalam mineral yang mencakup semua mineral lantanida, seperti monasit dan bastnasite. Magnet neodimium (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet

Neo), merupakan sejenis magnet tanah jarang, terbuat dari campuran logam neodymium. (Wikipedia 2019). Seperti halnya pada penelitian ini digunakan magnet tersebut dengan dimensi diameter panjang 15mm dan lebar 2 mm.

2.8 Axial Flux

Mesin *Axial Flux* Permanent Magnet (AFPM), yang biasa disebut mesin disc-type, merupakan sebuah mesin alternatif atas mesin Radial *Flux* Permanent Magnet (RFPM) berbentuk silinder, dikarenakan bentuknya seperti kue panekuk (*pancake*) yang terlihat rapi dan tersusun padat, sehingga menghasilkan berat jenis daya (daya keluaran per massa/volume mesin) yang lebih besar. (J Kamper, 2008)

desain mengenai bentuk tipe *Axial Flux* dijelaskan dalam gambar 2.6 dimana penempatan stator ganda pada tipe *axial* menjadikan rotor berada di tengah stator sehingga bentuk dari tipe *Axial Flux* magnet menjadikan kumparan pada sisi stator bernilai ganda. Hal ini akan membuat nilai dari torsi akan semakin berlipat ganda. Hal ini seiring pula dengan nilai kecepatan pada motor yang menjadikan sebuah perbedaan pula pada keluaran motor.



Gambar 2.6 Desain Bentuk Tipe *Axial Flux* (Sumber:

https://www.researchgate.net/figure/Topologic-of-Axial-flux-permanent-magnet-synchronous-motor-AFPMSM-and-radial-flux_fig2_312218959)

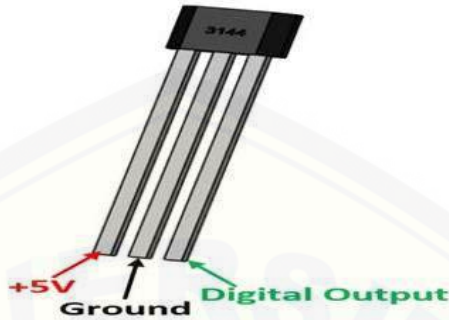
2.9 Sensor *Hall Effect*

Sensor efek *hall* adalah transduser yang bervariasi tegangan output sebagai respon terhadap medan magnet. Sensor efek *Hall* digunakan untuk beralih kedekatan, posisi, kecepatan deteksi, dan aplikasi penginderaan saat ini. Dalam bentuk yang paling sederhana, sensor beroperasi sebagai transduser analog, langsung kembali tegangan. Dengan medan magnet diketahui, jarak dari pelat Balai dapat ditentukan. Menggunakan kelompok sensor, posisi relatif dari magnet dapat disimpulkan.

Bahan semikonduktor yang digunakan biasanya adalah gallium arsenide (GaAs), indium antimonide (InSb), indium phosphide (InP) atau indium arsenide (InAs). Potongan tipis semikonduktor tersebut dilewati oleh arus listrik secara berkesinambungan (terus-menerus). Ketika didekatkan dengan medan magnet atau ditempatkan pada lokasi yang bermedan magnet, garis fluks magnetik akan menggunakan gaya pada semikonduktor tersebut untuk mengalihkan muatan pembawa (elektron dan *holes*) ke kedua sisi pelat semikonduktor. Gerakan pembawa muatan ini merupakan hasil dari gaya magnet yang melewati semikonduktor tersebut. (DicksonKho, 2019)

Karena Elektron dan *Holes* bergerak masing-masing ke kedua sisi semikonduktor, maka akan timbul perbedaan potensial diantara kedua sisi tersebut. Pergerakan elektron yang melalui bahan semikonduktor ini dipengaruhi oleh adanya medan magnet eksternal pada sudut atau posisi yang benar, *Hall* sensor biasanya digunakan untuk waktu kecepatan roda dan poros, seperti untuk mesin pembakaran internal yang waktu pengapian, takometer dan sistem pengereman anti-lock. Mereka digunakan dalam *Brushless* DC motor listrik untuk mendeteksi posisi magnet permanen. Sensor *Hall Effect* sangatlah beragam namun pada penelitian ini menggunakan sensor *Hall Effect* tipe 3144 sebagai sensornya karena tingkat pendeteksi magnet cukup tinggi sehingga mudah dalam penempatan magnetnya. Pada sensor *Hall* ini mempunyai tiga kaki dimana terdapat pada posisi kanan sensor sumber 5V, dan yang tengah dapat disbung

dengan ground, sedangkan untuk yang paling kiri sensor yaitu penempatan output digital sehingga bentuk pendeteksi magnet dapat langsung disampaikan melalui output digital yang terbentuk dalam sinyal pulsa. (DicksonKho, 2019)



Gambar 2.7 Sensor *Hall Effect* A3144 (Sumber: microcontrollerslab.com)

2.10 Kawat Tembaga Enamel

Kawat Enamel terbuat dari tembaga yang memiliki konduktivitas panas dan listrik yang baik. Selain itu unsur ini memiliki korosi yang cepat sekali. Tembaga murni sifatnya halus dan lunak, dengan permukaan berwarna jingga kemerahan. Tembaga dicampurkan dengan timah untuk membuat perunggu. Sifat lunak tembaga dapat dijelaskan oleh konduktivitas listriknya yang tinggi ($59,6 \times 10^6$ S/m) dan oleh karena itu juga mempunyai konduktivitas termal yang tinggi (kedua tertinggi) di antara semua logam murni pada suhu kamar.



Gambar 2.8 Kawat Enamel (Sumber: id.windingwirechina.com)

Kawat seperti pada gambar 2.8 ini yang akan dibuat sebagai kumparan pada stator. Kawat enamel yang banyak dijumpai di pasaran lokal adalah kawat

buatan Indonesia (PT. Sucaco, Tbk) dan buatan Jerman (Hellenic Cables, SA). Adapun buatan Malaysia dan China (Ningbo Jintian New Material Co, Ltd) tidak semua toko menjualnya. Kawat produksi PT Sucaco ini ada beberapa jenis diantaranya PVF (polyvinyl Formal) yang cocok untuk electricity meter, UEW (polyurethane), untuk alat-alat rumah tangga dan lainnya, SBUEW (polyurethane self bonding), untuk alat-alat rumah tangga, PEW (polyester), untuk alat-alat rumah tangga, motor, tranformator dll, PEWN (polyester nylon), untuk pompa air, blender, mixer, motor, tranformator, ignition coil, magnetic coil, EIW (polyesterimide), untuk alat-alat rumah tangga, motor, transformator, magnetic coil, PEW AI (polyester poliamideimide), untuk transformator, ignition coil. Kawat enamel lainnya yaitu produksi Hellenic Cable S.A. Jenis-jenisnya terdiri dari Adomin, Enoflex-B, Enoflex-F, Enoflex 180, Enoflex-H, Idiotherm, Mediotherm, Politherm, Enobond 180, Idiobond, Mediobond 200. (Sinaga,2013)

Pada penelitian ini menggunakan enamel Supreme EIW dari PT. Sucaco dan Mediotherm dari Hellenic yang nantinya akan dibandingkan pada kekuatan medan magnet pada masing-masing kumparan. Sehingga nantinya akan diperoleh gaya tarik menarik dan tolak menolak yang berbeda. Untuk standar produk yang digunakan pada enamel dari PT. Sucaco ini diantaranya:

Tabel 2.1 Standar produk kawat Supreme Bentuk Lingkaran Padat

Code	JIS	IEC	NEMA
PVF	C 3202-2	60317-1	M2 15
PEW	C 3202-5	60317-3	MW 5
UEW	C 3202-6	60317-4	MW 75
SBUEW	C 3202-7	60317-15	
EIW	-	60317-8	
PEWN/EIWN	C3202-8	60317-22	MW 30
PEW AI/EIW AI		60317-23	MW 76
UEW UI		-	MW 35
AIW		60317-26	MW 79

Sebagai pembanding digunakan produksi Hellenic tipe mediotherm dikarenakan standar yang digunakan tidak jauh beda dan fungsi dari masing masing kawat enamel tersebut sama-sama digunakan sebagai kumparan pada transformator. Penggunaan pada jenis Hellenic ini di kabupaten Jember terbilang lebih mahal jika dibandingkan dengan jenis kawat enamel yang lain.. Pada lain sisi, alasan penggunaan dari kedua kawat enamel tersebut banyak dijual dipasaran sehingga banyak ditemukan. Berikut tipe spesifikasi dari kawat Hellenic Mediotherm:

Tabel 2.2 Rincian Kawat Hellenic Mediotherm

Properties	
Standard	IEC 60317-13 NEMA MW 73-C, MW 35-C DIN 46416-6/7
Insulation Coatings	Modified Polyester (MDE) with Polyamide-MDE Overcoat
Availability	0,07-6,00 mm L 0,10-6,00 mm 2L
Mechanical Properties	For Ø1,00
- Elongation	>38%
- Springness	<40
- Adherence-flexibility	Excellent
- Resistance to Abrasion	>15,3 N
Electrical Properties	
Breakdown Voltage	10 kV
Thermal Properties	
- Temperature Index	200,210
- Cut Through	2 min \geq 360 ⁰ C
- Heat Shock	1d, 1/2 h \geq 220 ⁰ C

Chemical Properties	
- Solvent test	5H
- Solderability	-
- Resistance to Refrigerants	HFC 134-404-407 Freon 12-22

Hasil pengujian pada perubahan tahanan yang terjadi dilakukan pada setiap jenis kawat enamel dengan langkah dan kondisi yang sama. Pada kedua jenis kutub tersebut akan dibandingkan dengan koefisien hasil konduktivitas panas pada teori yang telah ada. Jenis konduktivitas panas pada masing-masing bahan sangatlah beragam dapat dilihat pada kutipan tabel berikut.

Tabel 2.3 Konduktivitas Suhu Dalam Berbagai Bahan.

Materials	Thermal Conductivity	
	Cal/sec/cm²/ (°C/cm)	J/sec/cm²(°C/cm)
NONMETALS		
Gypsum	0,0031	0,013
Zinc phosphate cement	0,0028	0,012
Composite resin	0,0026	0,011
Porcelain	0,0025	0,010
Enamel	0,0022	0,0092
Dentin	0,0015	0,0063
Zinc oxide-eugenol cement	0,0011	0,0046
Arcylic Resin	0,0005	0,0021
Beeswax	0,00009	0,0004

Sumber : Craig's restorative dental materials. Powers, J. M., Sakaguchi, R. L., & Craig, R. G. (2012).

Pada tabel diatas dapat diketahui untuk nilai koefisien dari konduktivitas thermal dalam C yaitu sebesar $0,002^{\circ}\text{C}/\text{cm}$. Sehingga nilai koefisien tersebut dapat digunakan sebagai perhitungan teori pembanding yang digunakan untuk membandingkan perhitungan hasil praktik maupun dengan hasil teori. Pada hasil perhitungan pembanding digunakan rumus resistansi dengan aproksimasi suhu linear. Aproksimasi linear dapat dikembangkan untuk aproksimasi resistansi dengan suhu (R-T). Persamaan garis lurus merupakan aproksimasi linear untuk kurva dari T_1 ke T_2 . Maka didapatkan persamaan:

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T] \dots\dots\dots(2.11)$$

Keterangan :

$R(T)$ = aproksimasi dari resistan pada suhu T

$R(T_0)$ = resistansi pada suhu T_0

ΔT = $T - T_0$

α = perubahan fraksi dalam resistansi.

Resistansi atau nilai hambatan dalam sebuah kawat penghantar dapat terpengaruh oleh perubahan suhu lingkungannya. (Al Hawari, 2011). Dikarenakan Hal tersebut kawat tembaga yang digunakan juga dipengaruhi oleh suhu lingkungan dan kuat kerja kawat yang digunakan sebagai kawat penghantar yang digunakan sebagai koil tersebut. Selain itu untuk koefisien panas tersebut pada kawat enamel terbilang sama dikarenakan standar dari kedua kawat enamel yang digunakan memiliki standar spesifikasi yang sama dan tentunya telah dipercaya kualitas bahan penghantarnya.

BAB 3. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian mengenai “Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda Terhadap Perbedaan Jenis Kawat Enamel Pada Kumbaran Stator” ini bertempat di Laboratorium Konversi Energi Listrik Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Jember, Jalan Slamet Riyadi No. 62 Patrang Jember 6811. Sedangkan untuk jadwal kegiatan penelitian berdasarkan tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Kegiatan	BULAN					
		I	II	III	IV	V	VI
1	Studi Literatur	■	■				
2	Perancangan dan Pengujian Alat		■	■	■		
3	Pengujian Alat		■	■	■		
4	Analisis Hasil Data			■	■	■	
5	Penulisan Laporan				■	■	■

Keterangan :

■ : Pelaksanaan kegiatan

3.2 Alat dan Bahan

Pada pembuatan motor BLDC tiga fasa ini menggunakan beberapa alat dan bahan yang dapat menunjang keberhasilan penelitian ini diantaranya adalah :

a. Spesifikasi Alat

Alat yang digunakan dalam pembuatan motor *Axial Flux Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda yaitu :

Power supply DC “CELLKIT 150DD”

Multimeter “Krisbow”

Set Driver Motor BLDC 500W with hall sensor

Obeng

Tang Potong

Tang Kombinasi

Bor mesin duduk "Benz BZ-8113"

Solder listrik "Kenmaster"

Tachometer "Krisbow"

Vernier Caliper "Kenmaster"

Alat Gulung Kawat Enamel

"Extech" IR Thermometer

b. Bahan

Bahan yang digunakan dalam pembuatan motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda yaitu :

Magnet Neodymium tipe koin 15 mm x 2 mm.

Sensor *Hall Effect* tipe 3144 A

Bearing 635RS

Encoder

Mur dan Baut

Spul jahit besi ukuran 2,0 x 1,1 cm

Kabel jumper

Kawat Enamel Hellenic 0,3 mm

Kawat Enamel Supreme 0,3 mm

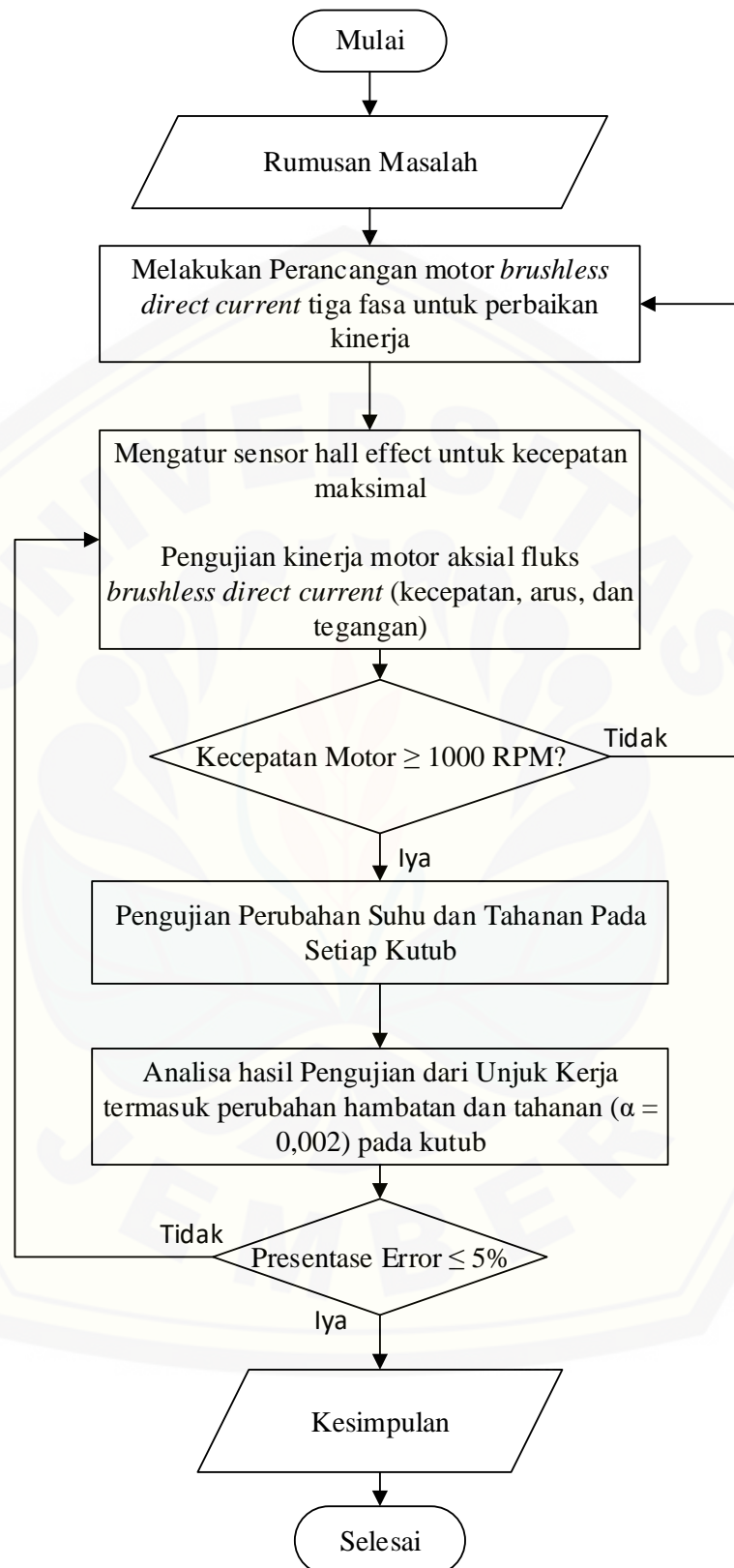
Akrilik 2 mm dan 3 mm

Timah

3.3 Tahapan Penelitian

Dalam melakukan penelitian yang dilakukan mulai saat perancangan maupun pengujian alat dari penelitian ini, dilakukan beberapa tahapan penelitian diantaranya adalah :

1. Menentukan Alat dan Bahan yang nantinya akan digunakan dalam penelitian.
2. Menentukan spesifikasi motor yang akan dibuat yaitu berupa motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda 8 kutub yang terdiri dari kawat *enamel* dengan diameter 0,3 mm, lilitan kawat untuk setiap kumparan sepanjang 13,5 m dengan dimensi magnet 15 x 2 mm serta diameter rotor sebesar 7,1 cm.
3. Melakukan desain motor yang sesuai dengan *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda 8 kutub.
4. Melakukan pengujian alat dan beriringan dengan pengambilan *sampling data*.
5. Menganalisis hasil yang didapat pada saat proses pengujian dengan menggunakan perbandingan antara dua jenis kawat yang berbeda dengan diameter yang sama, selanjutnya akan dituliskan dalam sebuah bentuk pembahasan dan membuat kesimpulan dari penelitian tersebut.

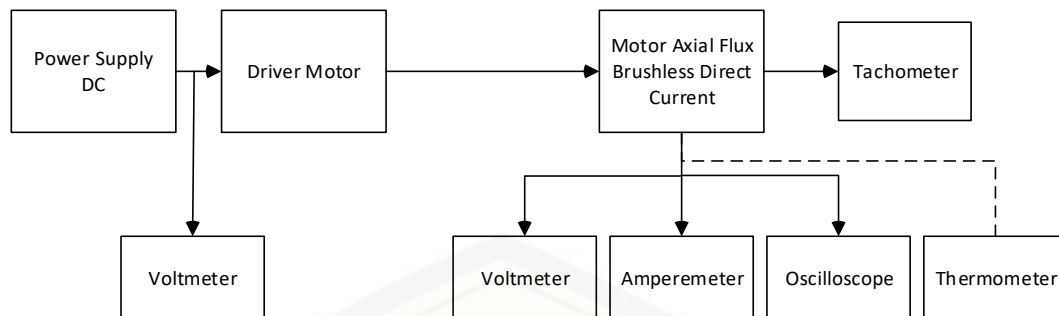


Gambar 3.1 Flowchart Tahap Penelitian

Pada gambar 3.1 dijelaskan mengenai flowchart penelitian dimana dapat diawali dari inisialisasi dalam penentuan parameter kecepatan diatas 1000 RPM. Selanjutnya dilakukan perancangan desain motor *Axial Flux Brushless Direct Current* Tiga Fasa Stator Ganda sebagai bentuk perbaikan kinerja pada motor. 1000 RPM didapat dari rumus N_r dimana dilakukan perkalian 120 dengan frekuensi dan dibagi 6 kutub. Selanjutnya mengatur sensor *hall effect* untuk mengatur kecepatan semaksimal mungkin. Dilakukan pula bentuk pengujian pada kinerja motor untuk mengetahui kecepatan arus maupun tegangan dan dilihat apakah sesuai dengan parameter. Jika didapatkan hasil yang tidak sesuai maka kembali lagi perancangan motor *Axial Flux Brushless Direct Current* tiga fasa stator ganda untuk dilakukan perbaikan kinerja kembali. Namun jika dianggap telah sesuai maka dilakukan pengujian terhadap perubahan suhu dan tahanan pada setiap kutub. Selanjutnya dilakukan analisa hasil pengujian terhadap hasil data yang telah didapatkan dan ditarik kesimpulan. Tahapan ini dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap jenis kawat enamel.

3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem

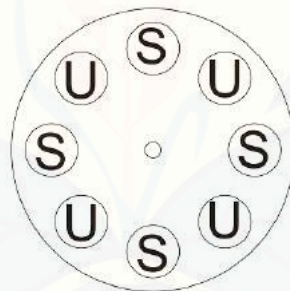
Pada penelitian ini mengutamakan prinsip bentuk unjuk kerja sehingga dapat digambarkan dalam diagram blok pada gambar 3.2. Untuk sumber yang digunakan yaitu sumber DC dari power supply meskipun nantinya akan dikonversi menjadi tiga fasa oleh set driver motor tiga fasa. Pada motor *Axial Flux Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda ini menggunakan 8 buah magnet permanen yang diletakkan pada rotor dan dibagi berdasar sudut secara seimbang. Sedangkan untuk stator yang digunakan yaitu stator ganda yang terletak pada sisi kanan dan kiri rotor dengan 6 buah kumparan pada setiap statornya. Pengujian yang dilakukan pada *Axial Flux Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda ini dapat digunakan untuk mengetahui kecepatan, torsi dan kerapatan pada medan magnet.



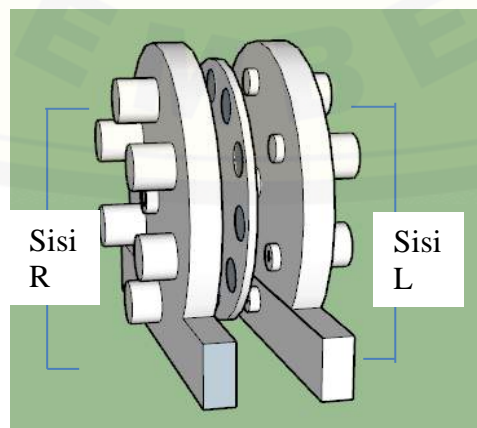
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

3.5 Desain Alat

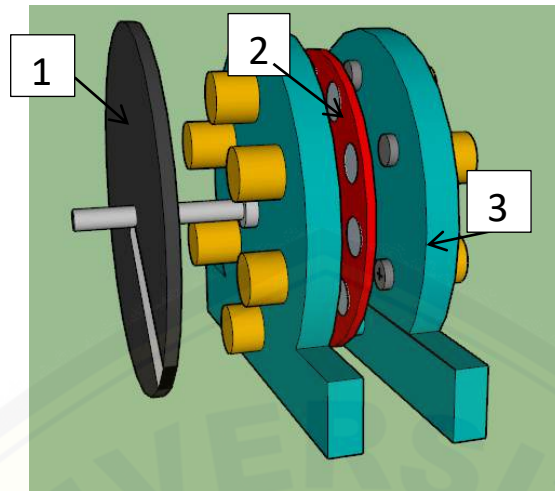
Bentuk perancangan motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa ini memiliki stator ganda. Tegangan yang digunakan terhadap motor ini yaitu sebesar 24 volt. Berikut adalah desain rotor pada motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda pada tampak atas maupun tampak keseluruhan pada desain motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda :



Gambar 3.3 Perancangan Rotor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa 8 Kutub



Gambar 3.4 Rancangan Keseluruhan Dari Stator dan Rotor 8 Kutub Tiga Fasa



Gambar 3.5 Rancangan Keseluruhan Dari Stator dan Rotor
8 Kutub Tiga Fasa tampak samping

Keterangan :

1. Encoder
2. Rotor
3. Stator

Pada Gambar 3.3 merupakan desain rotor motor *Brushless Direct Current* yang akan digunakan pengujian. Peletakan magnet dilakukan secara bergantian antara kutub utara dan kutub selatan magnet dengan diameter 15 mm pada setiap magnet. Sehingga terjadi pergerakan yang diakibatkan oleh perbedaan kedua kutub magnet dengan kumparan aktif. Sedangkan untuk gambar 3.4 dijelaskan pula mengenai pembagian sisi R atau sisi L kumparan yang bertujuan untuk mempermudah pengujian pada kumparan kawat enamel. Sedangkan untuk penomoran diawali dari posisi atas stator yang mana dilakukan penomoran sesuai gerak jarum jam hingga nomor 6 pada setiap sisi. Pemasangan rotor dan stator disesuaikan dengan gambar 3.5 rancangan keseluruhan rotor dan stator. Pada gambar tersebut juga terlihat peletakan encoder sesuai dengan posisi pada rotor maupun stator

3.6 Alur Perancangan Alat.

a. Pembuatan Rotor

Desain rotor yang dibuat pada alat ini yaitu sebuah lingkaran dengan tebal 2 mm yang menggunakan bahan akrilik. Rotor ini diletakkan diantara kedua stator sehingga membentuk pola pancake menyerupai desain motor *Axial Flux* rotor dalam. Diameter pada rotor ini sebesar 8 cm dengan lubang sebanyak 8 buah untuk menempatkan magnet *neodymium* ukuran 15 mm x 2 mm. Posisi pada magnet diletakkan sesuai dengan 8 lubang yang telah tersedia pada rotor dengan aturan peletakan pada jenis kutub yang saling bergantian, sehingga jika magnet yang pertama kutub selatan menghadap ke atas maka magnet yang kedua kutub utara menghadap ke bawah (gambar 3.3) sehingga urutan yang bergantian sesuai hingga peletakan pada magnet yang ke delapan.

b. Pembuatan Kumparan

Kumparan berguna sebagai magnet non permanen yang ada pada stator dimana pada alat ini menggunakan stator ganda. Setiap stator memiliki 6 kumparan, dimana setiap kumparan memiliki panjang 13,5 m. Kawat enamel yang digunakan pada lilitan ini berupa kawat enamel berdiameter 0,3 mm jenis helenic dan kawat enamel dengan diameter 0,3 mm jenis supreme sebagai pembanding. Kumparan pada stator diletakkan di bagian luar dari stator sehingga tidak mengganggu kerja dari rotor.

c. Pemasangan Rotor dan Stator

Cara pemasangan yang dilakukan untuk memasang rotor dan stator dilakukan seara bergantian. Pertama yang perlu dilakukan adalah memasang bagian kumparan pada stator terlebih dahulu dengan konfigurasi 6 kumparan pada setiap stator. Kedua dilakukan pemasangan bearing sebagai pusat putaran yang nantinya akan dipasang poros pada bagian tengah bearing. Setelah itu dapat dilakukan pemasangan rotor yang nantinya akan diletakkan pada poros dan ditambahkan perekat agar rotor tidak bergeser dari tempatnya. Terakhir yaitu pemasangan stator yang kedua sehingga 6 kumparan pada masing - masing stator dirangkai sesuai dengan konfigurasi 3 fasa dan bentuk hubungan kumparan pada

masing masing stator terhubung secara *star* (Y) setelah itu pada ujung hubungan tersebut diparalel dengan ujung dari hubung star pada stator yang lain.

d. Pemasangan Sensor *Hall Effect*

Peletakan Sensor *hall effect* dilakukan diatas magnet sebanyak 3 buah sensor namun sebelum diletakkan diatas magnet, sensor harus diletakkan sesuai dengan pemasangan aturan pada BLDC 3 Fasa yaitu dengan meletakkan *hall effect* yang pertama diatas magnet selatan dan peletakan *hall effect* yang berikutnya diletakkan diantara antara magnet utara dan selatan. Hal ini dilakukan agar rotor dapat berputar dan peletakan *hall effect* berikutnya juga seperti itu sehingga motor dapat berputar secara terus menerus.

3.7 Metode Pengambilan Data

Pada penelitian ini dilakukan menggunakan metode penelitian dengan menguji motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dengan melakukan pengujian berulang pada motor dengan waktu yang berkala atau diberikan waktu kerja selama 5 menit setelah itu motor akan didiamkan selama 10 menit dan akan dilakukan pengujian kembali. Tegangan yang diberikan dalam driver motor yaitu sebesar 24 volt, dikarenakan datasheet yang ada pada driver motor hanya mampu diberikan tegangan hingga 24 volt. Maka nanti akan mendapatkan unjuk kerja dari motor pada tegangan, arus, kecepatan, serta nilai penurunan resistansi maupun suhu kawat enamel pada saat motor dihentikan. Setelah itu dapat dilakukan penggantian pada kawat enamel guna mencari nilai unjuk kerja motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dalam perbedaan kawat enamel.

3.7.1 Pemberian Tegangan Pada Motor

Pada motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda penelitian ini, tegangan yang diberikan tetap yaitu 24 volt. Pemberian tegangan pada motor dilakukan secara berkala. Hal ini dimaksudkan ketika pertama kali motor diberikan tegangan 24 volt maka motor akan berputar. Setelah motor berputar selama 5 menit, maka motor akan dihentikan sementara untuk dilakukan

pengukuran suhu dan resistansi dalam dari kawat enamel. Tegangan pada motor didapatkan dari *power supply* yang dihubungkan ke driver motor, selanjutnya pada luaran driver motor terdapat 3 buah kabel yang disambungkan ke motor sehingga motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dapat bekerja.

3.7.2 Pengukuran Kuat Medan Magnet

Pengukuran medan magnet yang digunakan (*neodymium magnet*) yang digunakan pada motor motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda diukur dengan menggunakan alat *Tesla Meter*. Magnet *neodymium* akan didekatkan dengan *Gauss Meter* setelah itu akan mendapatkan besaran medan magnet pada magnet *neodymium*.

3.7.3 Pengukuran Unjuk Kerja Motor (Kecepatan, Tegangan, dan Arus)

Pengukuran yang dilakukan pada motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dilakukan secara berkala sesuai dengan waktu kerja dari motor tersebut. Untuk mengukur besar arus maupun tegangan dilakukan dengan menggunakan multimeter. Kemudian pada saat motor berputar maka akan diukur kecepatannya menggunakan tacho meter yang dihadapkan pada encoder yang telah terpasang di motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda. Setelah mendapatkan data RPM, tegangan dan arus maka dapat menghitung daya dan torsi.

3.7.4 Pengukuran resistansi dalam kawat enamel

Pengukuran ini dilaukan sebelum dan setelah motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda bekerja sehingga tidak mengganggu sistem kerja motor. pengukuran dilakukan guna mengetahui dampak yang dihasilkan setelah motor “lelah” bekerja, yaitu dengan cara melepas bagian ujung dari kawat enamel dan diukur resistansi dalam pada kawat enamel tersebut. Langkah ini dilakukan secara berkala pada masing masing jenis kawat enamel.

3.7.5 Perhitungan

- a) Menghitung Torsi motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda.

Untuk menghitung torsi motor motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dilakukan dengan dua perhitungan torsi. Dimana yang pertama dilakukan dengan menghitung hasil dari praktik sesuai dengan rumus 2.6 sebagai berikut.

$$T = \frac{P}{\omega} \dots\dots\dots(2.6)$$

Dan selanjutnya dibandingkan dengan mengetahui torsi dari nilai gaya tarik menarik atau tolak menolak antar magnet permanen dengan kutub magnet kumparan yang didekatkan. Perhitungan torsi motor motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 2.7

$$T = F \times r \dots\dots\dots(2.7)$$

- b) Menghitung kecepatan motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda.

Untuk mendapatkan kecepatan motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda didapatkan dari perhitungan keluaran motor yaitu tegangan dan arus kemudian dengan torsi sesuai dengan rumus 2.3 berikut.

$$nr = \frac{\sqrt{3}.Ia.Ea.60}{2\pi.T} \dots\dots\dots(2.3)$$

- c) Menghitung perubahan nilai resistansi pada kawat enamel.

Perhitungan yang digunakan dalam menghitung perubahan nilai resistansi menggunakan konstanta dari perubahan fraksi resistansi dari literatur yaitu 0,002 sebagai nilai pembanding yang selanjutnya akan dimasukkan kedalam rumus perubahan pada nilai resistansi dalam rumus 2.11 sebagai berikut.

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T] \dots\dots\dots(2.11)$$

d) Membandingkan hasil pengukuran dan perhitungan kecepatan motor.

Dalam melakukan pembandingan yaitu dilakukan setelah menghitung kecepatan motor (RPM) sesuai teori. Selanjutnya, hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan data hasil pengujian kecepatan motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda. Selanjutnya, kedua data ini dibandingkan antara pengukuran kecepatan dari motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dan perhitungan kecepatan motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda. Hal ini dilakukan dengan mengurangi nilai hitung dengan nilai ukur dan dibagi dengan nilai hitung dan dikalikan 100%. Atau dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Error persen} = \left| \frac{\text{Hasil perhitungan} - \text{Hasil Pengukuran}}{\text{Hasil Perhitungan}} \right| \times 100\% \dots \dots \dots (3.1)$$

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan dengan judul “Unjuk Kerja Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda Terhadap Perbedaan Jenis Kawat Enamel Pada Kumbaran Stator” ini dapat disimpulkan bahwa :

1. Perancangan yang dilakukan pada motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda dilakukan guna mendapatkan nilai torsi yang lebih tinggi ($\geq 0,3$ Nm). Dimensi pada stator maupun rotor antara dua jenis motor adalah sama dikarenakan perubahan dilakukan hanya pada kumbaran kawat enamel dengan diameter dan panjang yang sama pada masing-masing kumbaran.
2. Torsi dan kecepatan pada kedua jenis pengujian dengan panjang tiap kumbaran yang sama dengan perbedaan kawat enamel memiliki hasil yang berbeda. Penggunaan kumbaran kawat enamel hellenic memiliki torsi 0,334 Nm yang lebih besar daripada kumbaran yang menggunakan kawat enamel supreme dengan torsi 0,262 Nm. Perbedaan terjadi dikarenakan banyak faktor, termasuk kualitas kuat hantar pada kawat masing-masing jenis kawat enamel. Namun berbanding terbalik dengan nilai kecepatan dimana pada kawat enamel Supreme memiliki nilai kecepatan 300 RPM lebih tinggi. Dengan tingginya kecepatan yang didapatkan maka nilai torsi pada kawat enamel jenis Supreme memiliki nilai yang lebih rendah pada alat tersebut dengan panjang kawat enamel yang sama. Motor yang memiliki torsi tinggi maka memiliki kecepatan yang rendah. Begitupula sebaliknya, dengan motor yang memiliki kecepatan yang tinggi memiliki torsi yang lebih rendah salah satu faktornya bergantung terhadap jenis kawat enamel yang digunakan.
3. Dengan dilakukan pengujian secara berulang maka perubahan nilai resistansi pada setiap kawat enamel berbeda. Perbedaan perubahan terjadi secara signifikan terjadi pada pengujian pertama dan kedua. Dimana pada *sampling* data pada Gambar 4.13 dapat dilihat bahwa pada kawat enamel Hellenic terjadi kenaikan yang besar (2,26%) saat pengujian yang kedua. Sedangkan untuk kawat enamel supreme terjadi penurunan *error persen* yang besar juga (1,77%) dengan teori pada pengujian yang pertama. Hal ini dipengaruhi oleh kenaikan nilai suhu pada saat dilakukan pengujian berulang.

5.2 Saran

Diperlukan adanya penelitian lebih lanjut mengenai unjuk kerja unjuk kerja motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 fasa stator ganda terhadap perbedaan jenis kawat enamel dengan metode lain. Pengujian Torsi hanya dilakukan dengan menggunakan perhitungan sehingga diharapkan untuk penelitian mendatang diperlukan alat pengukur torsi yang sesuai untuk motor *Brushless Direct Current*. Kemudian perlu dibandingkan dengan pengaruh perbedaan kuat tarik dari kawat enamel yang kemungkinan berpengaruh terhadap kekuatan hantar kawat enamel.



DAFTAR PUSTAKA

- Academia. (2019). Diambil kembali dari Motor Listrik:
https://www.academia.edu/17276683/Motor_Listrik
- Academia. (2019). Diambil kembali dari Torsi Motor:
https://www.academia.edu/22411954/Torsi_torque_Pada_Motor
- Hajid Muhammad, dkk. 2018. “*Buku Master Smp/Mts: Ringkasan Materi & Kumpulan Rumus Lengkap*”, Penerbit mediapusindo
- Halliday, David., Resnick, Robert., Walker, Jearl.,2001, Fundamentals of Physics (edisi ke-6th). John Wiley & Sons, Inc
- Hamdani, Indrawan Andi W. 2015. “Programmable Logic Controller dan Scada Teori, Pemrograman dan Aplikasinya”, Yogyakarta: Penerbit Deepublish
- Hellenic Cable.S.A., http://www.cablel.gr/dyn/dw_pr/112_60940330_gr.pdf., 3 Desember 2019
- M. Aydin, S. Huang and T.A. Lipo, “*Torque Quality and Comparison of Internal and External Rotor Axial Flux Surface Magnet Disc Machine*”, IEEE IECON2001, 27th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Denver, CO, Nov 29-Dec, 2001
- Maarten J. Kamper, dkk, “*Analysis and Performance of Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Air-Cored Nonoverlapping Concentrated Stator Windings*”, IEEE, 2004
- Othman Kashfi F.K.R.O, dkk, “*Torque Constant Density in Different Type of Double Stator Permanent Magnet Brushless DC Motor*”, Electromagnetics Research, 2018
- Powers, J. M., Sakaguchi, R. L., & Craig, R. G. (2012). Craig's restorative dental materials/edited by Ronald L. Sakaguchi, John M. Powers. Philadelphia, PA: Elsevier/Mosby,.
- Saleh, Anang, dkk. 2018. “*Energi & Elektrifikasi Pertanian*”. Yogyakarta: Penerbit Deepublish
- Sinaga Nazaruddin, Sonda H. Marsono, “*Pemilihan Kawat Enamel Untuk Pembuatan Solenoid Dinamometer Arus Eddy Dengan Torsi Maksimum 496 Nm*”, Jurnal Teknik Energi, 2013
- Simanjuntak, Vanessa Victor. “*Analisis Dc Motor Pada Aplikasi Parkir Vertikal Otomatis Menggunakan RFID*”, Thesis Politeknik Negeri Sriwijaya, 2017

Supreme Enamelled wire., <http://www.sucaco.com/pdf/Enamel.pdf>, 3 Desember 2019;

Wikipedia. (2016, September 19). Dipetik Oktober 20, 2019, dari Hall_effect_sensor: https://id.wikipedia.org/wiki/Hall_effect_sensor



Lampiran

1. Perhitungan

a. Motor Brushless Direct Current Axial Flux 3 Fasa Stator Ganda Dengan Kawat Enamel Hellenic.

➤ Perhitungan Kecepatan dan Torsi Motor *Brushless Direct Current*.

❖ Pengujian 5 Menit Pertama.

▪ Torsi Motor.

$$T = \frac{\sqrt{3}.V.I.60}{2.\pi.RPM} = \frac{\sqrt{3}.16,443.1,226.60}{2.3,14.1023} = 0,3258 \text{ Nm}$$

▪ Torsi Dari Gaya Magnet

$$T = \frac{10^{-7}.m1.m2}{x^2} . rO = \frac{10^{-7}.10,6365.80,84244}{0,003^2} . 0,036$$

$$= 9,039(0,036) = 0,3254 \text{ Nm}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{0,3254-0,3258}{0,3254} \right| \times 100\% = 0,126538 \%$$

▪ Kecepatan Motor.

$$RPM = \frac{\sqrt{3}.V.I.60}{2.\pi.T} = \frac{\sqrt{3}.16,443.1,226.60}{2.3,14.0,3254} = 1024,296 \text{ RPM}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{1024,296-1023}{1024,296} \right| \times 100\% = 0,127 \%$$

❖ Pengujian 5 Menit Kedua.

▪ Torsi Motor.

$$T = \frac{\sqrt{3}.V.I.60}{2.\pi.RPM} = \frac{\sqrt{3}.16,8.1,259.60}{2.3,14.1043} = 0,3356 \text{ Nm}$$

▪ Torsi Dari Gaya Magnet

$$T = \frac{10^{-7}.m1.m2}{x^2} . rO = \frac{10^{-7}.10,6365.83,0185}{0,003^2} . 0,036$$

$$= 9,2830(0,036) = 0,3342 \text{ Nm}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{0,3342-0,3254}{0,3342} \right| \times 100\% = 0,416575 \%$$

▪ Kecepatan Motor.

$$RPM = \frac{\sqrt{3}.V.I.60}{2.\pi.T} = \frac{\sqrt{3}.16,8.1,259.60}{2.3,14.0,3342} = 1047,363 \text{ RPM}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{1047,363-1043}{1047,363} \right| \times 100\% = 0,418 \%$$

❖ Pengujian 5 Menit Ketiga.

▪ Torsi Motor.

$$T = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot RPM} = \frac{\sqrt{3} \cdot 16,52 \cdot 1,287 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 1046} = 0,3364 \text{ Nm}$$

▪ Torsi Dari Gaya Magnet

$$T = \frac{10^{-7} \cdot m_1 \cdot m_2}{x^2} \cdot r_0 = \frac{10^{-7} \cdot 10,6365 \cdot 84,86478}{0,003^2} \cdot 0,036$$

$$= 9,4894(0,036) = 0,34162 \text{ Nm}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{0,34162-0,3364}{0,34162} \right| \times 100\% = 1,538528 \%$$

▪ Kecepatan Motor.

$$RPM = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot T} = \frac{\sqrt{3} \cdot 16,52 \cdot 1,287 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,34162} = 1029,907 \text{ RPM}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{1029,907-1046}{1029,907} \right| \times 100\% = 1,539 \%$$

➤ Perhitungan Perubahan Resistansi.

❖ Pengujian 5 Menit Pertama

▪ RT-R1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,84[1 + 0,002(40,56 - 31,11)] = 2,894 \ \Omega$$

▪ RT-R2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(37,78 - 31,11)] = 2,888 \ \Omega$$

▪ RT-R3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(38,33 - 31,11)] = 2,891 \ \Omega$$

▪ RT-R4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,83[1 + 0,002(42,78 - 31,11)] = 2,896 \ \Omega$$

▪ RT-R5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,88[1 + 0,002(44,44 - 31,11)] = 2,957 \ \Omega$$

▪ RT-R6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(43,89 - 31,11)] = 2,933 \ \Omega$$

▪ RT-L1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(40,56 - 31,11)] = 2,904 \ \Omega$$

▪ RT-L2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(40,56 - 31,11)] = 2,904 \ \Omega$$

▪ RT-L3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,8[1 + 0,002(37,22 - 31,11)] = 2,834 \ \Omega$$

▪ RT-L4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,84[1 + 0,002(35,56 - 31,11)] = 2,865 \ \Omega$$

▪ RT-L5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(40,56 - 31,11)] = 2,914 \ \Omega$$

▪ RT-L6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(40,56 - 31,11)] = 2,904 \ \Omega$$

❖ Pengujian 5 Menit Kedua

• RT-R1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,9[1 + 0,002(46,67 - 40,56)] = 2,935 \ \Omega$$

• RT-R2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,94[1 + 0,002(40,56 - 37,78)] = 2,956 \ \Omega$$

• RT-R3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,93[1 + 0,002(40,56 - 38,33)] = 2,943 \ \Omega$$

• RT-R4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,92[1 + 0,002(41,11 - 42,78)] = 2,910 \ \Omega$$

• RT-R5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,95[1 + 0,002(45,00 - 44,00)] = 2,953 \ \Omega$$

• RT-R6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,89[1 + 0,002(41,11 - 43,89)] = 2,874 \ \Omega$$

• RT-L1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,93[1 + 0,002(42,22 - 40,56)] = 2,940 \Omega$$

• RT-L2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,89[1 + 0,002(42,78 - 40,56)] = 2,903 \Omega$$

• RT-L3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,92[1 + 0,002(44,44 - 37,22)] = 2,962 \Omega$$

• RT-L4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,93[1 + 0,002(41,67 - 35,56)] = 2,966 \Omega$$

• RT-L5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,95[1 + 0,002(45,00 - 40,56)] = 2,976 \Omega$$

• RT-L6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,89[1 + 0,002(39,44 - 40,56)] = 2,844 \Omega$$

❖ Pengujian 5 Menit Ketiga

• RT-R1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 3,01[1 + 0,002(51,67 - 46,67)] = 3,040 \Omega$$

• RT-R2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 3,03[1 + 0,002(40,00 - 40,56)] = 3,027 \Omega$$

• RT-R3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 3,04[1 + 0,002(45,11 - 40,56)] = 3,047 \Omega$$

• RT-R4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 3,01[1 + 0,002(47,22 - 41,11)] = 3,047 \Omega$$

• RT-R5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,98[1 + 0,002(47,78 - 45,00)] = 2,997 \Omega$$

• RT-R6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,93[1 + 0,002(49,44 - 41,11)] = 2,979 \Omega$$

• RT-L1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,99[1 + 0,002(47,78 - 42,22)] = 3,023 \Omega$$

- RT-L2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,95[1 + 0,002(47,78 - 42,78)] = 2,980 \Omega$$

- RT-L3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,99[1 + 0,002(46,67 - 44,44)] = 3,003 \Omega$$

- RT-L4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,95[1 + 0,002(42,22 - 41,67)] = 2,953 \Omega$$

- RT-L5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,99[1 + 0,002(43,33 - 45,00)] = 2,980 \Omega$$

- RT-L6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,9[1 + 0,002(39,44 - 39,44)] = 2,900 \Omega$$

b. Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda Dengan Kawat Enamel Supreme.

➤ Perhitungan Tegangan Kecepatan dan Torsi.

❖ Pengujian 5 Menit Pertama.

▪ Torsi Motor.

$$T = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot RPM} = \frac{\sqrt{3} \cdot 17,033 \cdot 1,25 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 1378} = 0,2557 \text{ Nm}$$

▪ Torsi Dari Gaya Magnet

$$T = \frac{10^{-7} \cdot m \cdot I \cdot m^2}{x^2} \cdot r_0 = \frac{10^{-7} \cdot 10,6365 \cdot 66,13625}{0,003^2} \cdot 0,036$$

$$= 7,3952(0,036) = 0,266229 \text{ Nm}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{0,266229 - 0,2557}{0,266229} \right| \times 100\% = 3,9588 \%$$

▪ Kecepatan Motor.

$$RPM = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot T} = \frac{\sqrt{3} \cdot 17,033 \cdot 1,25 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,26623} = 1323,45 \text{ RPM}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{1323,45 - 1378}{1323,45} \right| \times 100\% = 3,95 \%$$

❖ Pengujian 5 Menit Kedua.

▪ Torsi Motor.

$$T = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot RPM} = \frac{\sqrt{3} \cdot 17,137 \cdot 1,22 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 1387} = 0,2494 \text{ Nm}$$

▪ Torsi Dari Gaya Magnet

$$T = \frac{10^{-7} \cdot m_1 \cdot m_2}{x^2} \cdot r_0 = \frac{10^{-7} \cdot 10,6365 \cdot 64,54898}{0,003^2} \cdot 0,036$$

$$= 7,2178(0,036) = 0,2598 \text{ Nm}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{0,2598 - 0,2494}{0,2598} \right| \times 100\% = 4,0031 \%$$

▪ Kecepatan Motor.

$$RPM = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot T} = \frac{\sqrt{3} \cdot 17,137 \cdot 1,22 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2598} = 1331,477 \text{ RPM}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{1331,477 - 1387}{1331,477} \right| \times 100\% = 4 \%$$

❖ Pengujian 5 Menit Ketiga.

▪ Torsi Motor.

$$T = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot RPM} = \frac{\sqrt{3} \cdot 16,9 \cdot 1,225 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 1388} = 0,2468 \text{ Nm}$$

▪ Torsi Dari Gaya Magnet

$$T = \frac{10^{-7} \cdot m_1 \cdot m_2}{x^2} \cdot r_0 = \frac{10^{-7} \cdot 10,6365 \cdot 64,8135}{0,003^2} \cdot 0,036$$

$$= 7,2473(0,036) = 0,2609 \text{ Nm}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{0,260904 - 0,2468}{0,260904} \right| \times 100\% = 5,3971 \%$$

▪ Kecepatan Motor.

$$RPM = \frac{\sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot T} = \frac{\sqrt{3} \cdot 16,9 \cdot 1,225 \cdot 60}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,2609} = 1313,089 \text{ RPM}$$

$$E\% = \left| \frac{HT-HP}{HT} \right| \times 100\% = \left| \frac{1313,089 - 1388}{1313,089} \right| \times 100\% = 5,40 \%$$

➤ Perhitungan Perubahan Resistansi.

❖ Pengujian 5 Menit Pertama

▪ RT-R1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha \Delta T]$$

$$R(T) = 2,82[1 + 0,002(41,67 - 31,11)] = 2,886 \ \Omega$$

▪ RT-R2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,79[1 + 0,002(45,56 - 31,11)] = 2,871 \Omega$$

▪ RT-R3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,82[1 + 0,002(39,44 - 31,11)] = 2,867 \Omega$$

▪ RT-R4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,75[1 + 0,002(42,22 - 31,11)] = 2,811 \Omega$$

▪ RT-R5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,77[1 + 0,002(41,11 - 31,11)] = 2,825 \Omega$$

▪ RT-R6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,76[1 + 0,002(40,56 - 31,11)] = 2,812 \Omega$$

▪ RT-L1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,79[1 + 0,002(37,78 - 31,11)] = 2,827 \Omega$$

▪ RT-L2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,82[1 + 0,002(39,44 - 31,11)] = 2,867 \Omega$$

▪ RT-L3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,76[1 + 0,002(44,44 - 31,11)] = 2,834 \Omega$$

▪ RT-L4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,78[1 + 0,002(37,22 - 31,11)] = 2,814 \Omega$$

▪ RT-L5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,81[1 + 0,002(44,44 - 31,11)] = 2,885 \Omega$$

▪ RT-L6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,81[1 + 0,002(42,78 - 31,11)] = 2,876 \Omega$$

❖ Pengujian 5 Menit Kedua

• RT-R1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$

$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(44,44 - 41,67)] = 2,876 \Omega$$

• RT-R2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(42,78 - 45,56)] = 2,834 \Omega$$

• RT-R3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(38,89 - 39,44)] = 2,847 \Omega$$

• RT-R4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(46,11 - 42,22)] = 2,882 \Omega$$

• RT-R5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,81[1 + 0,002(43,89 - 41,11)] = 2,826 \Omega$$

• RT-R6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(45,56 - 40,56)] = 2,889 \Omega$$

• RT-L1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,84[1 + 0,002(46,67 - 37,78)] = 2,890 \Omega$$

• RT-L2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,82[1 + 0,002(43,89 - 39,44)] = 2,845 \Omega$$

• RT-L3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(47,78 - 44,44)] = 2,879 \Omega$$

• RT-L4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,92[1 + 0,002(48,89 - 37,22)] = 2,988 \Omega$$

• RT-L5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(42,22 - 44,44)] = 2,837 \Omega$$

• RT-L6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,84[1 + 0,002(46,11 - 42,78)] = 2,859 \Omega$$

❖ Pengujian 5 Menit Ketiga

• RT-R1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,85[1 + 0,002(47,22 - 44,44)] = 2,886 \Omega$$

• RT-R2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,88[1 + 0,002(47,22 - 42,78)] = 2,906 \Omega$$

- RT-R3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(38,33 - 38,89)] = 2,857 \Omega$$

- RT-R4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(42,22 - 46,11)] = 2,838 \Omega$$

- RT-R5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,8[1 + 0,002(47,22 - 43,89)] = 2,819 \Omega$$

- RT-R6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,83[1 + 0,002(45,00 - 45,56)] = 2,827 \Omega$$

- RT-L1

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,83[1 + 0,002(45,56 - 46,67)] = 2,824 \Omega$$

- RT-L2

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,87[1 + 0,002(45,00 - 43,89)] = 2,876 \Omega$$

- RT-L3

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,88[1 + 0,002(48,89 - 47,78)] = 2,886 \Omega$$

- RT-L4

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 3,01[1 + 0,002(48,89 - 48,89)] = 3,010 \Omega$$

- RT-L5

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,86[1 + 0,002(43,33 - 42,22)] = 2,886 \Omega$$

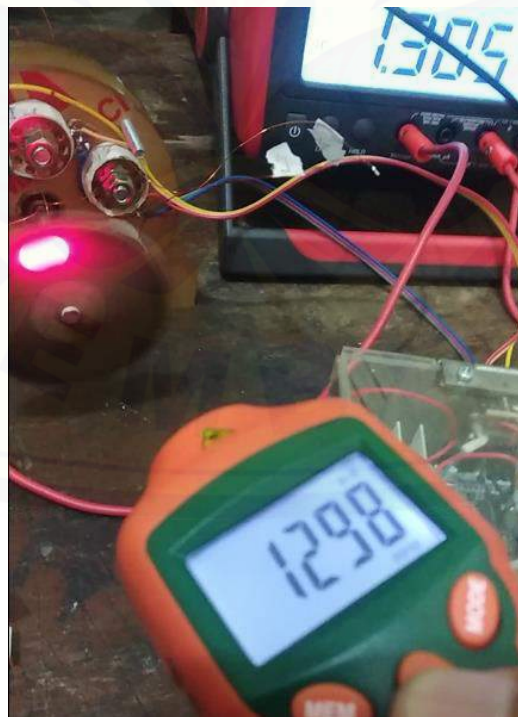
- RT-L6

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha\Delta T]$$
$$R(T) = 2,88[1 + 0,002(47,78 - 46,11)] = 2,890 \Omega$$

2. Dokumentasi



Pengukuran Suhu Setiap Kutub Enamel Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda



Pengukuran RPM Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* 3 Fasa Stator Ganda



Pengukuran Medan Magnet Dengan Menggunakan Tesla Meter



Driver Motor *Brushless Direct Current* 3 Fasa



Pengukuran R_0 Pada Kumparan Kawat Enamel



Pengukuran Suhu Pada Kawat Enamel Dengan Menggunakan IR Thermometer