



**PENGARUH JARAK OPTIMUM ANTARA MAGNET
DENGAN KUTUB PADA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT
CURRENT AXIAL FLUX***

SKRIPSI

Oleh

**Victor Trisula Pamungkas
NIM 151910201119**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**



**PENGARUH JARAK OPTIMUM ANTARA MAGNET
DENGAN KUTUB PADA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT
CURRENT AXIAL FLUX***

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Strata 1 Jurusan Teknik Elektro
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Victor Trisula Pamungkas
NIM 151910201119**

**PROGRAM STUDI STRATA 1 JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Victor Trisula Pamungkas

NIM : 151910201119

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul “Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor *Brushless Direct Current Axial Flux*” adalah benar – benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Jember, 15 Januari 2018

Yang menyatakan,

Victor Trisula Pamungkas

NIM. 151910201119

SKRIPSI

**PENGARUH JARAK OPTIMUM ANTARA MAGNET DENGAN KUTUB
PADA MOTOR *BRUSHLESS DIRECT CURRENT AXIAL FLUX***

Oleh

Victor Trisula Pamungkas

NIM 151910201119

Pembimbing

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

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Triwahju Hardianto, S.T, M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor *Brushless Direct Current Axial Flux*” karya Victor Trisula Pamungkas telah diuji dan disahkan pada:

Hari, Tanggal : Senin, 15 Januari 2018

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tim Penguji:

Ketua,

Anggota I,

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

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

Anggota II,

Anggota III,

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP.197004041996011001

H. Samsul Bachri M, S.T., M.MT.
NIP.196403171998021001

Mengesahkan
Dekan,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM
NIP. 196612151995032001

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Skripsi ini merupakan langkah awal kesuksesan yang saya raih sebelum menuju kepada kesuksesan yang selanjutnya dalam hidup saya. Dengan perjuangan dan pengorbanan selama ini saya persembahkan skripsi ini kepada :

1. Kedua orang tua saya Ayahanda Yanes Sutrisno Hadi dan Ibunda Diana Hendarwati yang tercinta. Terima kasih yang berlimpah karena telah membesarkan, mendidik, memberi cinta dan kasih sayang serta doa yang tiada putus sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini, dan saya persembahkan gelar yang saya dapatkan untuk beliau.
2. Saudara kandung saya Iwan Firmandi, Adhitya Frahmadiyan, dan Tedy Andriansyah Farlas yang tercinta. Terima kasih doa, kasih sayang, motivasi, semangat, dan dukungan yang telah diberikan selama ini.
3. Nenek saya Uti Yono yang tercinta. Terima kasih dengan kasih sayangnya yang selalu mendoakan cucunya ini.
4. Wanitaku Risya Ervina Putri yang tercinta. Terima kasih atas semangat, dukungan, motivasi, dan kasih sayang yang diberikan selama ini.
5. Dosen Pembimbing Bapak Widyono Hadi dan Bapak Triwahju Hardianto. Terima kasih atas kesabaran dan keikhlasan dalam membimbing saya, sehingga skripsi saya dapat terselesaikan.
6. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.
Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”
(Al-Insyirah Ayat: 5-6)

“Boleh jadi kamu membenci sesuatu padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi
pula kamu menyukai sesuatu, padahal ia amat buruk bagimu, Allah mengetahui
sedang kamu tidak mengetahui.”
(Surah Al-Baqarah Ayat: 216)

“Ringkas saja. Hidup ini tidak usah terlalu engkau rencanakan. Kalau hatimu
isinya niat baik, niat baik, niat baik, Insha Allah jadi.”
(Emha Ainun Nadjib)

“Gantungkan cita-cita mu setinggi langit! Bermimpilah setinggi langit. Jika
engkau jatuh, engkau akan jatuh di antara bintang-bintang.”
(Ir. Soekarno)

“Semua orang dilahirkan tidak wajib untuk sukses, tetapi semuanya
dilahirkan berhak untuk merebut kesuksesannya.”
“Kita itu jatuh bukan karena batu yang besar, tapi karena kerikil.”
(Victor Trisula Pamungkas)

PRAKATA

Bismillahirrohmanirrohim

Puji syukur kehadirat Allah SWT. atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga skripsi yang berjudul “Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor *Brushless Direct Current Axial Flux*” dapat terselesaikan dengan baik. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan pendidikan program studi Strata Satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Terselesainya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah, M.UM., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember;
3. Bapak Ir. Widyono Hadi, M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
4. Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji I dan Bapak H. Samsul Bachri M, S.T., M.MT., selaku Dosen Penguji II;
5. Bapak H. R. B. Moch. Gozali, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik dan seluruh Dosen Teknik Elektro yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan bimbingan selama mengikuti pendidikan di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember;
6. Para Staf karyawan dan karyawan serta teknisi Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah memberikan bantuan selama mengikuti pendidikan di Fakultas Teknik Universitas Jember;
7. Ayahanda Yanes Sutrisno Hadi dan Ibunda Diana Hendarwati yang tercinta yang telah memberikan motivasi, semangat, kasih sayang, kesabaran, dan doa yang tidak pernah putus demi mempermudah saya mencapai kesuksesan awal dalam perguruan tinggi serta terselesainya skripsi ini;

8. Kakakku Iwan Firmandi, dan Adhitya Frahmadiyan serta adikku Tedy Andriyansyah Farlas yang telah memberikan semangat, motivasi, dan kasih sayangnya;
9. Wanitaku Risyah Ervina Putri yang selalu memberikan dukungan, semangat, kasih sayang, dan doa sehingga menjadikanku selalu berusaha dan tidak putus asa;
10. Saudara-saudaraku Rival Christianto, Agung Hari Darmawan, Rahmad Hadi Wijaya, Maulana Muhammad Firdaus, Radix Fahry, Ahmad Rizaldi Hidayatullah, Fachrul Rozy Afandy, Fathur Rahman Alfarizi, Akil Misbahul Ulum, dan Muhammad Jumali yang selalu memberikan semangat, motivasi, serta meluangkan, menyempatkan waktu untuk berkumpul;
11. Teman seperjuangan Dian Agus Prayitno, Roin Nur Zainal sebagai pihak yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini;
12. Dulur-dulur Teknik Elektro Angkatan 2012, D3 sampai S1 yang sangat membantu, menjadi keluarga, dan memberi semangat dari awal, semoga kekompakan tetap terjaga dan dapat mencapai sukses bersama;
13. Guru-guru tercinta TK PERTIWI, SDN 1 Genteng, SMPN 3 Genteng, dan SMAN 2 Genteng, terima kasih atas ilmu pengetahuan dan kasih sayang yang telah diberikan;
14. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember yang telah mengantarkan menuju masa depan;

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat berguna bagi pembaca dan bagi penulis sendiri, pada khususnya semoga Allah SWT memberikan yang terbaik untuk kita semua. Amin

Jember, 15 Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN	iv
HALAMAN PENGESAHAN	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
HALAMAN MOTTO	vii
PRAKATA	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR GRAFIK	xvii
ABSTRAK	xix
ABSTRACT	xx
RINGKASAN	xxi
SUMMARY	xxiii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Sistematika Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5

2.1 Motor <i>Brushless Direct Current</i>	5
2.1.1 Kelebihan Motor <i>Brushless Direct Current</i>	
Dibandingkan Motor <i>Brushed Direct Current</i>	6
2.2 Prinsip Kerja Motor <i>Brushless Direct Current</i>.....	7
2.3 Konstruksi Motor <i>Brushless Direct Current</i>.....	9
2.3.1 Stator.....	9
2.3.2 Rotor.....	10
2.4 Kuat Medan Magnet.....	11
2.5 EMF.....	11
2.6 Kecepatan Motor.....	12
2.7 Kemagnetan.....	12
2.7.1 Hukum Coulomb.....	13
2.7.2 Garis Gaya Magnet.....	13
2.7.3 Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi.....	14
2.7.4 Menghitung Daya Yang Dihasilkan Pada Motor.....	14
2.7.5 Menghitung Torsi Motor.....	14
2.8 Magnet Permanen.....	15
2.9 <i>Axial Flux</i>.....	15
2.10 <i>Reed Switch</i> (Sensor Magnet).....	16
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	18
3.1.1 Tempat Penelitian.....	18
3.1.2 Waktu Penelitian.....	18
3.2 Alat dan Bahan.....	18
3.3 Tahapan Penelitian.....	19
3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem.....	21
3.5 Perancangan Alat Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor BLDC <i>Axial Flux</i>....	21
3.6 Perancangan Driver Motor BLDC <i>Axial Flux</i>.....	23

3.7 Alur Perancangan Motor BLDC Axial Flux.....	24
3.7.1 Pembuatan Lilitan Pada Tiap Stator.....	24
3.7.2 Pemasangan Stator Bagian Bawah.....	25
3.7.3 Pemasangan Rotor.....	25
3.7.4 Pemasangan Stator Bagian Atas.....	26
BAB 4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1 Pengujian Motor BLDC Axial Flux Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 10 mm).....	29
4.2 Pengujian Motor BLDC Axial Flux Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 15 mm).....	30
4.3 Pengujian Motor BLDC Axial Flux Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 20 mm).....	32
4.4 Pengujian Motor BLDC Axial Flux Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 5 mm).....	34
4.5 Pengujian Motor BLDC Axial Flux Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 10 mm).....	36
4.6 Pengujian Motor BLDC Axial Flux Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 15 mm).....	39
4.7 Pengujian Motor BLDC Axial Flux Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 20 mm).....	42
4.8 Hubungan Torsi Perhitungan Dan Kecepatan Perhitungan.....	44
4.8.1 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 10 mm).....	44
4.8.2 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 15 mm).....	45
4.8.3 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 20 mm).....	46
4.8.4 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 5 mm).....	46

4.8.5 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 10 mm).....	47
4.8.6 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 15 mm).....	48
4.8.7 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 20 mm).....	48
4.9 Perhitungan Motor BLDC Axial Flux.....	49
4.10 Perbandingan Data Kecepatan Hasil Pengukuran dan Data Kecepatan Hasil Perhitungan.....	53
BAB 5. PENUTUP.....	56
5.1 Kesimpulan.....	56
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA.....	58
LAMPIRAN.....	59

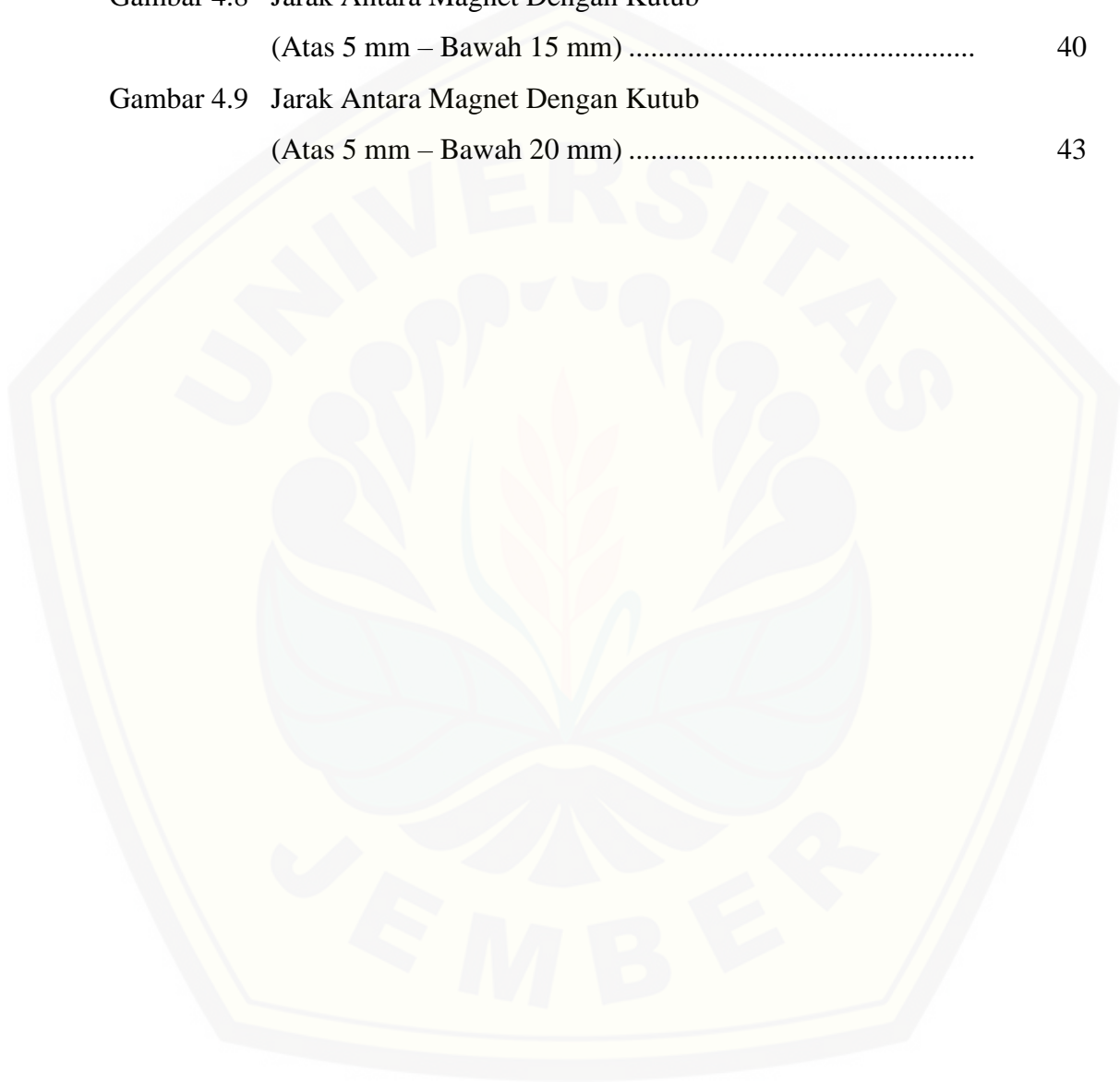
DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Hasil Pengukuran Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 10 mm).....	29
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 15 mm).....	31
Tabel 4.3 Hasil Pengukuran Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 20 mm).....	33
Tabel 4.4 Hasil Pengukuran Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 5 mm).....	35
Tabel 4.5 Hasil Pengukuran Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 10 mm).....	37
Tabel 4.6 Hasil Pengukuran Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 15 mm).....	39
Tabel 4.7 Hasil Pengukuran Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 20 mm).....	42
Tabel 4.8 Data Hasil Perhitungan Kuat Medan Magnet, Torsi, dan Kecepatan.....	50
Tabel 4.9 Perbandingan Data Kecepatan Hasil Pengukuran dan Data Kecepatan Hasil Perhitungan	53

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Rotor dan Sensor Hall	6
Gambar 2.2 Tegangan Stator BLDC	8
Gambar 2.3 Stator Motor BLDC	9
Gambar 2.4 Rotor Motor BLDC	10
Gambar 2.5 Garis Gaya Magnet	13
Gambar 2.6 Desain <i>axial flux</i> yang diterapkan pada alat	16
Gambar 2.7 <i>Reed Switch</i>	16
Gambar 2.8 <i>Reed Switch</i> dan Arah Medan Magnet	17
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	19
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem	21
Gambar 3.3 Stator Dari Tampak Samping	22
Gambar 3.4 Rotor Dari Tampak Bawah, Atas, dan Samping	22
Gambar 3.5 Rancangan Keseluruhan Dari Stator dan Rotor	23
Gambar 3.6 Driver Motor <i>Brushless Direct Current</i> Konstruksi <i>Axial Flux</i>	23
Gambar 3.7 Lilitan Stator	24
Gambar 3.8 Stator Bagian Bawah	25
Gambar 3.9 Rotor	25
Gambar 3.10 Stator Bagian Atas	26
Gambar 4.1 Motor BLDC <i>Axial Flux</i> Dari Tampak Samping	28
Gambar 4.2 Motor BLDC <i>Axial Flux</i> Dari Tampak Atas	28
Gambar 4.3 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 10 mm)	29
Gambar 4.4 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 15 mm)	31
Gambar 4.5 Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 20 mm)	33

Gambar 4.6	Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 5 mm)	35
Gambar 4.7	Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 10 mm)	38
Gambar 4.8	Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 15 mm)	40
Gambar 4.9	Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 20 mm)	43



DAFTAR GRAFIK

	Halaman
Grafik 4.1 Grafik Hubungan Tegangan Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 10 mm)...	30
Grafik 4.2 Grafik Hubungan Tegangan Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 15 mm)...	32
Grafik 4.3 Grafik Hubungan Tegangan Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 20 mm)...	34
Grafik 4.4 Grafik Hubungan Tegangan Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 5 mm)....	36
Grafik 4.5 Grafik Hubungan Tegangan Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 10 mm)...	38
Grafik 4.6 Grafik Hubungan Tegangan Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 15 mm)...	41
Grafik 4.7 Grafik Hubungan Tegangan Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 20 mm)...	43
Grafik 4.8 Grafik Hubungan Torsi Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 10 mm).....	44
Grafik 4.9 Grafik Hubungan Torsi Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 15 mm).....	45
Grafik 4.10 Grafik Hubungan Torsi Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 20 mm).....	46
Grafik 4.11 Grafik Hubungan Torsi Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 5 mm).....	46
Grafik 4.12 Grafik Hubungan Torsi Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 10 mm).....	47
Grafik 4.13 Grafik Hubungan Torsi Dan Kecepatan Pada Jarak Antara Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 15 mm).....	48

Grafik 4.14 Grafik Hubungan Torsi Dan Kecepatan Pada Jarak Antara
Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 20 mm)..... 48



Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor *Brushless Direct Current Axial Flux*
(*The Effect Of The Optimum Distance Between Magnet And Pole To The Motor Brushless Direct Current Axial Flux*)

Victor Trisula Pamungkas¹, Widyono Hadi², Triwahju Hardianto³
Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember¹
Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas
Jember^{2,3} Jln. Kalimantan 37, Jember 68121
Email: trisulapamungkass@gmail.com

Abstrak

Kemajuan teknologi terus bertambah dan berinovasi pada peralatan baik kebutuhan industri maupun rumah tangga tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Jenis motor yang sering digunakan adalah motor DC dan motor induksi, karena mudah dalam pengendalian kecepatan yaitu hanya mengatur nilai tegangan atau arus medan saja. Namun motor DC menggunakan komutator mekanik (sikat) sehingga memiliki keandalan rendah, sedangkan motor induksi memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan motor DC. Hal ini terjadi karena motor induksi tidak menggunakan *brush* (sikat) untuk menunjang komutasi. Oleh karena itu untuk memenuhi kebutuhan akan efisiensi tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi yang dapat divariasikan, dan biaya perawatan yang rendah maka digunakan motor *brushless direct current* (BLDC). Kelebihan motor BLDC *axial flux* dirancang untuk memiliki rasio daya tinggi sehingga rasio bahan inti berkurang, mengurangi kebisingan, dan tingkat getaran. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui pengaruh jarak optimum antara magnet dengan kutub pada motor *brushless direct current*. Pada Pengujian motor BLDC *axial flux* ketika jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm) didapatkan nilai kecepatan tertinggi pada setiap variasi tegangan, yaitu ketika tegangan 6 volt kecepatannya sebesar 523,6 rpm, ketika tegangan 15 volt kecepatannya sebesar 1750 rpm, ketika tegangan 24 volt kecepatannya sebesar 2740 rpm. Semakin besar nilai tegangan yang dihasilkan maka semakin tinggi juga kecepatannya. Dengan demikian jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm) merupakan jarak optimum untuk menghasilkan kecepatan yang maksimal.

Kata kunci : *brushless direct current, axial flux*, (bawah 5 mm – atas 5 mm).

*The Effect Of The Optimum Distance Between Magnet And Pole To The Motor
Brushless Direct Current Axial Flux
(The Effect Of The Optimum Distance Between Magnet And Pole To The Motor
Brushless Direct Current Axial Flux)*

Victor Trisula Pamungkas¹, Widyono Hadi², Triwahju Hardianto³
Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember¹
Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas
Jember^{2,3} Jln. Kalimantan 37, Jember 68121
Email: trisulapamungkass@gmail.com

ABSTRACT

Technological advancements continue to grow and innovate on equipment both industrial and household needs will not be separated with the use of motors. The type of motor that is often used is a DC motor and induction motor, because it is easy to control the speed that is only set the value of voltage or field current only. However, DC motors use mechanical commutators (brushes) to have low reliability, while induction motors have lower maintenance costs and have higher speeds than DC motors. This happens because the induction motor does not use a brush to support commutation. Therefore, to meet the need for high efficiency, high torque, high speed that can be varied, and low maintenance costs then used brushless direct current (BLDC) motor. The advantages of BLDC axial flux motors are designed to have a high power ratio so that the ratio of core materials is reduced, reducing noise, and vibration levels. The purpose of this research is to know the effect of optimum distance between magnet with pole on brushless direct current motor. In BLDC axial flux motor testing when the distance between magnet and pole (below 5 mm - above 5 mm) obtained the highest velocity value at each voltage variation, that is when the 6 volt voltage is 523,6 rpm when the 15 volt voltage is 1750 rpm , when the 24 volt voltage speed of 2740 rpm. The greater the value of the resulting voltage the higher the speed. Thus the distance between the magnet and the pole (below 5 mm – above 5 mm) is the optimum distance to produce the maximum speed.

Keywords : brushless direct current, axial flux, (below 5 mm – above 5 mm)

RINGKASAN

Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor *Brushless Direct Current Axial Flux*; Victor Trisula Pamungkas; 151910201119; 2018; 58 halaman; Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jember.

Sensor yang digunakan pada penelitian ini adalah sensor magnet (*reed switch*) yang berfungsi sebagai saklar untuk memutar rotor. Hal ini dikarenakan ketika sensor tersebut mendapatkan suatu medan magnet maka sensor tersebut akan tersambung, sehingga kumparan akan teraliri arus listrik dan kumparan menghasilkan medan magnet. Untuk medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan berkutub selatan. Hal ini di sebabkan lilitan awal dari kumparan diberikan arus positif dan untuk lilitan terakhir diberikan arus negatif. Pada penelitian ini membuat motor BLDC dengan *axial flux* yang di desain memiliki konstruksi yang kompak, berbentuk piringan, dan kerapatan daya yang besar.

Memiliki stator ganda yang di setiap statornya memiliki 4 kumparan di atas dan 4 kumparan di bawah, serta masing-masing kumparan memiliki 400 lilitan sehingga pada motor BLDC ini memiliki 3200 lilitan, sedangkan diameter pada stator adalah 2 cm. Sedangkan untuk rotor dibuat berbentuk baling – baling diameternya adalah 9 cm dan di setiap ujungnya terdapat magnet *neodymium* yang memiliki nilai kerapatan sebesar $0,14 \mu\text{T}$ dengan ukuran 2 mm x 8 mm, sehingga berjumlah 4 magnet. Jumlah 4 magnet pada rotor tersebut, setiap kutub utara magnet menghadap ke stator bawah sedangkan kutub selatan magnet menghadap ke stator atas yang berkutub utara. Sehingga akan terjadi gaya tarik – menarik, tetapi diberikan jarak antara magnet dengan kutub, sehingga apabila kumparan dialiri arus listrik dan menyebabkan rotor tersebut berputar maka tidak sampailah magnet dengan kutub tersebut menempel. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai kecepatan maksimal pada jarak optimum antara magnet dengan kutub pada motor *brushless direct current axial flux*.

Dalam pengujian ini menggunakan variasi tegangan sebesar 6 volt, 15 volt, dan 24 volt, dengan tipe pengukuran jarak yaitu menggunakan atas dan bawah antara jarak magnet dengan kutub (jarak 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm).

Kemudian diberikan ketetapan minimum jarak 5 mm atas maupun bawah agar antara magnet dengan kutub yang menghasilkan gaya tarik – menarik tidak menempel. Pengujian ini menggunakan alat ukur tachometer digital untuk mengukur nilai data kecepatan, dan dibandingkan dengan data kecepatan perhitungan sehingga didapatkan nilai eror persen. Serta menggunakan alat ukur gauss meter untuk mengetahui nilai pada magnet permanen (*neodymium*), dan kuat medan magnet. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan bahwa pada pengujian motor BLDC *axial flux* ketika jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm) didapatkan nilai kecepatan tertinggi pada setiap variasi tegangan, yaitu ketika tegangan 6 volt kecepataannya sebesar 523,6 rpm, ketika tegangan 15 volt kecepataannya sebesar 1750 rpm, ketika tegangan 24 volt kecepataannya sebesar 2740 rpm. Semakin besar nilai tegangan yang dihasilkan maka semakin tinggi juga kecepataannya. Dengan demikian jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm) merupakan jarak optimum untuk menghasilkan kecepatan yang maksimal.

Sedangkan dari hasil penelitian menunjukkan nilai eror persen terbesar yaitu 9,7 % terletak pada tegangan 15 volt ketika pengujian jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 15 mm). Dan untuk eror persen terkecil yaitu 2 % terletak pada tegangan 24 volt ketika pengujian jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 15 mm) dan pengujian jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 20 mm). Error persen pada penelitian ini disebabkan karena segi mekanik, dalam hal ini jarak (*gap*) antara rotor dan stator ganda sangat berpengaruh terhadap kecepatan, serta posisi dari sensor *reed switch* juga mempengaruhi kinerja dari motor tersebut. Untuk hubungan antara torsi perhitungan dan kecepatan perhitungan adalah berbanding terbalik. Apabila nilai torsi yang dihasilkan kecil maka nilai kecepatan yang dihasilkan tinggi, dan sebaliknya. Nilai torsi tertinggi sebesar 0,088 N.m terletak pada tegangan 24 volt ketika pengujian motor BLDC *axial flux* jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 15 mm), sedangkan kecepatan tertinggi sebesar 2800 rpm terletak pada tegangan 24 volt ketika pengujian motor BLDC *axial flux* jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm).

SUMMARY

The Effect Of The Optimum Distance Between Magnet And Pole To The Motor Brushless Direct Current Axial Flux; Victor Trisula Pamungkas; 151910201119; 2018; pages 58; Department of Electrical Engineering, Faculty Of Engineering, Jember University.

Sensors used in this study is a magnetic sensor (reed switch) that serves as a switch to rotate the rotor. This is because when the sensor gets a magnetic field the sensor will be connected, so that the coil will teraliri electric current and the coil produces a magnetic field. For the magnetic field generated by the south pole coils. This is because the initial winding of the coil is given a positive current and for the last winding a negative current is given. In this study, BLDC motors with axial flux in the design has a compact construction, in the form of a disc, and a large power density.

It has a double stator which in each stator has 4 coils on top and 4 coils below, and each coil has 400 coils so on this BLDC motor has 3200 windings, while the diameter of the stator is 2 cm. As for the rotor is made in the form of propeller diameter is 9 cm and on each end there is a neodymium magnet that has a density value of 0,14 μ T with a size of 2 mm x 8 mm, so that the amount of 4 magnets. The sum of 4 magnets on the rotor, each magnetic north pole facing the lower stator while the magnetic south pole facing the upper stator of the north pole. So there will be tensile force, but given the distance between the magnet with the poles, so that when the coil is electrically flowed and causes the rotor to spin then not come the magnet with the pole is attached. This test is performed to obtain the maximum velocity value at the optimum distance between the magnet with the poles on the brushless direct direct current axial flux.

In this test using variations of voltage of 6 volt, 15 volt, and 24 volt, with the type of distance measurement is using the top and bottom between the magnetic distance with the poles (distance 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm). Then the minimum determination of the upper and lower 5 mm distance between the magnet and the pole to produce the tensile force is not attached.

This test uses a digital tachometer to measure the value of data speed, and compared with the calculation speed data so that the value obtained percent error. As well as using a meter gauge gauss to know the value on the permanent magnet (neodymium), and magnetic field strength. Based on testing that has been done that in the test of BLDC axial flux motor when the distance between magnet with pole (below 5 mm – above 5 mm) obtained the highest speed value at each voltage variation, that is when the 6 volt voltage speed is 523,6 rpm, 15 volts speed of 1750 rpm, when the 24 volt voltage speed of 2740 rpm. The greater the value of the resulting voltage the higher the speed. Thus the distance between the magnet and the pole (below 5 mm – above 5 mm) is the optimum distance to produce the maximum speed.

While the results showed the largest percentage error percentage of 9,7 % lies at a voltage of 15 volts when testing the distance between magnets with poles (top 5 mm – below 15 mm). And for the smallest percent error is 2 % located at 24 volt voltage when testing the distance between magnet and pole (below 5 mm – above 15 mm) and testing distance between magnet with pole (below 5 mm – above 20 mm). The percent error in this study is due to mechanical aspects, in which case the gap between the rotor and the double stator greatly affects the speed, and the position of the reed switch sensor also affects the performance of the motor. For the relationship between the calculation torque and calculation speed is inversely proportional. If the resulting torque value is small then the value of the resulting speed is high, and vice versa. The highest torque value of 0.088 Nm lies at 24 volt voltages when the BLDC axial flux motors test the distance between the magnets and the poles (top 5 mm – below 15 mm), while the top speed of 2800 rpm lies at 24 volt voltage when testing the BLDC motor axial flux distance between magnets with poles (bottom 5 mm – over 5 mm).

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi terus bertambah dan berinovasi pada peralatan baik kebutuhan industri maupun rumah tangga, serta tidak akan lepas dengan penggunaan motor. Motor adalah alat yang dapat berputar jika dialiri dengan listrik. Jenis motor yang sering digunakan adalah motor DC dan motor induksi, karena mudah dalam pengendalian kecepatan yaitu hanya mengatur nilai tegangan atau arus medan saja. Namun motor DC menggunakan komutator mekanik (sikat) sehingga memiliki keandalan rendah, karena terdapat rugi – rugi sikat dan memerlukan pemeliharaan atau penggantian secara berkala.

Sedangkan motor induksi memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan motor DC. Hal ini terjadi karena motor induksi tidak menggunakan *brush* (sikat) untuk menunjang komutasi. Akan tetapi motor induksi memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan motor DC, dan cepat panas. Hal ini terjadi akibat rotor yang terbuat dari kumparan di induksi dengan medan magnet putar stator sehingga timbul arus pada rotor. Arus pada kumparan rotor ini menyebabkan rotor menjadi panas karena terdapat disipasi daya. Selain itu karena motor ini hanya dapat bekerja pada saat kumparan rotor dialiri arus dan menjadi magnet, kecepatan putaran rotor akan jauh lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan putar medan magnet stator.

Sehingga motor DC dan motor induksi masih belum dapat memenuhi kebutuhan yang berkaitan dengan motor. Apalagi motor yang memiliki efisiensi tinggi, torsi tinggi, kecepatan tinggi, dan dapat divariasikan. Oleh karena itu untuk memenuhi kebutuhan akan efisiensi tinggi, torsi yang tinggi, kecepatan yang tinggi yang dapat divariasikan, dan biaya perawatan yang rendah maka digunakan motor *brushless direct current* (BLDC). Dibandingkan dengan motor DC, motor BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya *brush* dan komutator.

Dan dibandingkan dengan motor induksi, motor BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi dan *noise* yang rendah karena rotor terbuat dari magnet permanen (Yen-Shin Lai, 2006). Berdasarkan penelitian dari mahasiswa Institut Teknologi Surabaya (ITS) yang bernama Muhammad Nur Yuniarto (Yuniarto, 2014) yang merancang motor BLDC menggunakan *axial flux* dengan sensor hall. Penelitian tersebut merancang motor BLDC menggunakan desain *axial flux* yang dirasa lebih baik dibandingkan dengan desain *radial flux*. Pada motor listrik DC konvensional sistem transmisi listriknya membutuhkan cincin komutator berupa *brush* yang terbuat dari arang (*carbon*). *Brush* tersebut memerlukan penggantian berkala untuk umur pemakaian tertentu. Kekurangan lainnya pada jangkar motor BLDC harus logam feromagnetik untuk mengatur fluks magnetnya. Hal tersebut menyebabkan terjadi *cogging torque* yang menghambat putaran motor, karena terjadi gaya tarik – menarik antara jangkar (rotor) dan magnet yang bertindak sebagai stator.

Hal ini berkaitan juga dengan motor BLDC yang dirancang menggunakan *radial flux*, meskipun sudah beroperasi tanpa cincin komutator, pada motor BLDC *radial flux* masih terjadi hambatan *cogging torque* karena penggunaan *core armature ferromagnetic* untuk mengatur arah fluks magnetik dari lilitan. Serta penggunaan *core armature* menyebabkan motor listrik lebih berat. Sehingga penelitiannya menggunakan *axial flux*, dikarenakan motor listrik dengan *flux* magnetik *axial* ini dapat didesain tanpa *armature (coreless)*. Sehingga hambatan *cogging* dapat dihilangkan dan lebih ringan. Selain itu dengan desain *axial* ini akan memudahkan motor listrik dihubungkan paralel. Dengan sistem hubungan paralel ini diharapkan motor listrik yang dirancang akan memiliki perbandingan *power to weight* yang lebih baik dari motor listrik BLDC konvensional.

Tetapi pada penelitian ini pada motor BLDC menggunakan stator ganda yaitu atas dan bawah serta pada setiap stator terdapat 4 kumparan. Sehingga terdapat 2 stator dan 8 kumparan, sedangkan ditengah terdapat rotor yang disetiap ujungnya terdapat magnet permanen yang nantinya rotor tersebut akan berputar. Rotor tersebut berputar dengan adanya *reed switch* karena prinsip kerjanya yaitu sebagai saklar aktif atau terhubung apabila di area jangkauannya terdapat medan

magnet. Motor BLDC didesain secara *axial flux* yaitu magnet yang memiliki arah medan fluks sejajar dengan sumbu putar. Fluks tersebut merupakan hasil dari gaya tarik – menarik antara dua buah magnet permanen yang memiliki kutub yang berbeda. Desain *axial flux* dirancang untuk memiliki rasio daya tinggi sehingga rasio bahan inti berkurang, mengurangi kebisingan dan tingkat getaran.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana perancangan motor BLDC menggunakan *axial flux*?
2. Bagaimana pengaruh menggunakan stator ganda pada motor BLDC *axial flux*?
3. Bagaimana pengaruh yang ditimbulkan jarak optimum antara magnet dengan kutub pada motor BLDC menggunakan *axial flux*?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengetahui perancangan pada motor BLDC menggunakan *axial flux*.
2. Untuk mengetahui nilai torsi dan kecepatan yang dihasilkan.
3. Untuk mengetahui kecepatan maksimum yang ditimbulkan jarak optimum antara magnet dengan kutub pada motor BLDC menggunakan *axial flux*.

1.4 Manfaat

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Mendukung pengembangan ilmu pengetahuan tentang motor BLDC *Axial Flux*.
2. Motor BLDC *Axial Flux* dapat menjadi sebuah konsep terobosan baru sebagai penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, permasalahan diatas dibatasi dengan asumsi sebagai berikut:

1. Jumlah lilitan tiap kumparan adalah 400 lilitan.
2. Ukuran magnet ditentukan yaitu dengan ukuran 2 mm x 8 mm.
3. Menggunakan stator ganda atas dan bawah, setiap stator berjumlah 4 kumparan, sedangkan rotor pada setiap ujungnya terdapat magnet sehingga terdapat 4 magnet, serta diameter stator 2 cm dan diameter rotor 9 cm.
4. Menggunakan tegangan kerja maksimal 24 Vdc.
5. Menggunakan sensor magnet (*reed switch*) sebagai *on off*.
6. Pengukuran dan pengujian yang dilakukan sesuai dengan skala laboratorium.
7. Alat yang diteliti hanya digunakan sebatas untuk penelitian bukan untuk dipasarkan.
8. Pengujian motor BLDC *axial flux* jarak antara magnet dengan kutub menggunakan jarak minimum bawah 5 mm – atas 5 mm.

1.6 Sistematika Penelitian

Secara garis besar penyusunan proposal skripsi ini adalah sebagai berikut:

- a. BAB 1. PENDAHULUAN
Berisi tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan masalah, dan sistematika pembahasan.
- b. BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA
Berisi penjelasan tentang teori yang berhubungan dengan penelitian.
- c. BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN
Menjelaskan tentang metode kajian yang digunakan untuk menyelesaikan skripsi.
- d. BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN
Berisi hasil penelitian dan analisa hasil penelitian.
- e. BAB 5 PENUTUP
Berisi tentang kesimpulan dan saran dari penulis.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

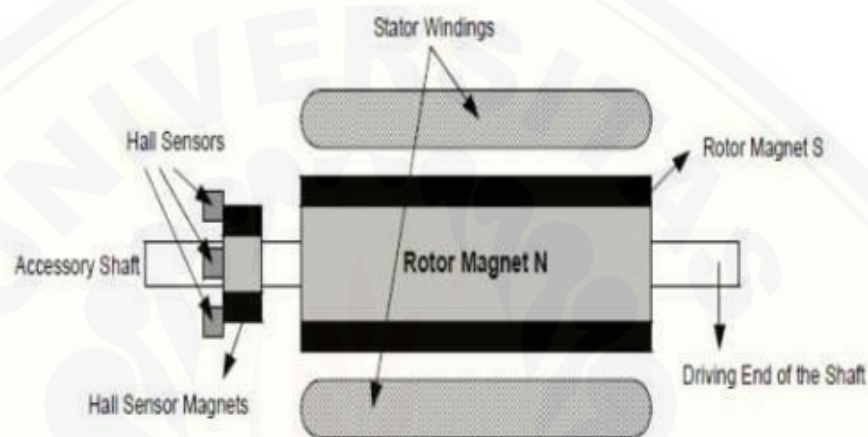
Pada bab ini dijelaskan beberapa bagian yang menjadi dasar dalam penelitian pengaruh jarak antara magnet dengan kutub pada motor *brushless direct current axial flux*. Hal pertama yang menjadi bahasan pada bab ini yaitu deskripsi tentang motor *brushless direct current*.

2.1 Motor *Brushless Direct Current*

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

Secara umum motor BLDC terdiri dari dua bagian, yakni, rotor, bagian yang bergerak, yang terbuat dari permanen magnet dan stator, bagian yang tidak bergerak, yang terbuat dari kumparan 3 fasa. Walaupun merupakan motor listrik *synchronous AC 3 fasa*, motor ini tetap disebut dengan BLDC karena pada implementasinya BLDC menggunakan sumber DC sebagai sumber energi utama yang kemudian diubah menjadi tegangan AC dengan menggunakan inverter 3 fasa. Tujuan dari pemberian tegangan AC 3 fasa pada stator BLDC adalah menciptakan medan magnet putar stator untuk menarik magnet rotor (Dharmawan, 2009).

Oleh karena tidak adanya *brush* pada motor BLDC, untuk menentukan *timing* komutasi yang tepat torsi pada motor ini sehingga diperoleh torsi dan kecepatan yang konstan, diperlukan 3 buah sensor hall atau *encoder*. Pada sensor hall *timing* komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan 3 buah sensor hall untuk mendapatkan 6 kombinasi *timing* yang berbeda, sedangkan pada *encoder*, *timing* komutasi ditentukan dengan cara menghitung jumlah pola yang ada pada *encoder* (Dharmawan, 2009).



Gambar 2.1 Rotor dan Sensor Hall

(Sumber : M. V. Ramesh dkk, 2006)

2.1.1 Kelebihan Motor *Brushless Direct Current* dibandingkan Motor *Brushed Direct Current*

Motor *Brushless Direct Current* mampu meminimalisir kekurangan pada Motor *Brushed Direct Current*. Adapun beberapa keunggulan atau kelebihan Motor *Brushless Direct Current* antara lain :

1. Jumlah elektromagnet pada stator banyak sehingga memungkinkan control yang lebih akurat.
2. Tidak akan mudah rusak pada sikat setelah lama pemakaiannya, karena tidak memiliki sikat.
3. Pendinginan pada motor lebih mudah karena posisi elektromagnet pada stator.
4. Tidak adanya *snoring/electrical noise* yaitu suara bising akibat gesekan celah udara antara sikat dengan motor.
5. Karena tidak memiliki sikat, dan Motor *Brushless Direct Current* bersifat komutasi elektrik, sehingga yang mengontrol perpindahan arus yaitu dengan

mikrokontroler. Dengan demikian akan membuat perpindahan arus tersebut lebih akurat (presisi). Pada mikrokontroler juga dapat mengatur kecepatan motor, sehingga akan menjadi lebih efisien.

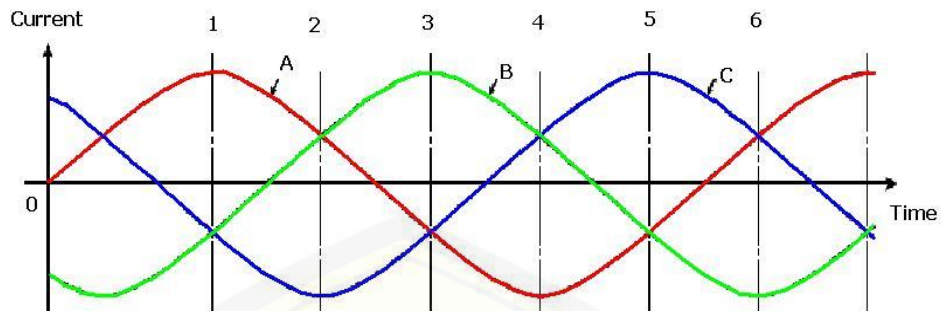
Sedangkan kelemahan atau kekurangan Motor *Brushed Direct Current* dibandingkan dengan Motor *Brushless Direct Current* antara lain :

1. Motor sikat apabila sering digunakan lama kelamaan sikatnya akan rusak.
2. Karena sikat memutuskan dan menghubungkan antara sistem dengan motor, maka akan menimbulkan *snoring/electrical noise*.
3. Sikat pada motor membatasi kecepatan maksimum motor.
4. Sikat juga membatasi jumlah kutub magnet yang dapat diinstalasi.
5. Pendinginan motor lebih sulit, karena posisi elektromagnet berada ditengah-tengah rotor.

2.2 Prinsip Kerja Motor *Brushless Direct Current*

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul kuat medan magnet. Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa sinusoidal, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan.

Motor BLDC berputar sebagai akibat dari interaksi magnet permanen pada rotor dengan medan magnet yang dihasilkan ketika tegangan DC terhubung pada satu kumparan stator. Untuk menjaga rotasi, orientasi dari medan magnet di *stator* harus diputar secara berurutan. Hal ini dilakukan dengan menghubungkan tegangan DC pada kumparan stator berikutnya agar rotor berputar (NEC Electronic Corporation, 2006). Pada gambar 2.2 berikut ditunjukkan bentuk sinyal pada tegangan stator motor BLDC yang berupa sinyal tiga fasa.



Gambar 2.2 Tegangan Stator BLDC

(Sumber : Miftachul, 2014)

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

Ketika A dan B memiliki medan magnet negatif akibat mendapatkan tegangan negatif dan C memiliki medan magnet positif akibat tegangan positif, magnet permanen rotor akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yakni bagian negatif akan berputar menuju medan magnet stator C dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet stator A dan B. Selanjutnya ketika B memiliki medan magnet negatif dan A serta C memiliki medan magnet positif, bagian positif magnet permanen akan berputar menuju B dan bagian negatif akan menuju A dari C. Karena tegangan AC *sinusoidal* yang digunakan berlangsung secara kontinu, proses perubahan polaritas tegangan pada stator ini akan terjadi secara terus menerus sehingga menciptakan medan putar magnet stator dan magnet permanen rotor akan berputar mengikuti medan putar magnet stator ini. Hal inilah yang menyebabkan rotor pada BLDC dapat berputar (Dharmawan, Abe, 2009).

2.3 Konstruksi Motor *Brushless Direct Current*

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

2.3.1 Stator

Stator merupakan bagian pada motor yang diam/statis dimana fungsinya adalah sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Pada motor DC *brushless* statornya terdiri dari 12 lilitan (elektromagnet) yang bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor DC *brushless* terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol sedangkan pada motor DC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen. Lilitan stator pada motor DC brushless 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.



Gambar 2.3 Stator Motor BLDC

(Sumber : Nanang Masudi, 2014)

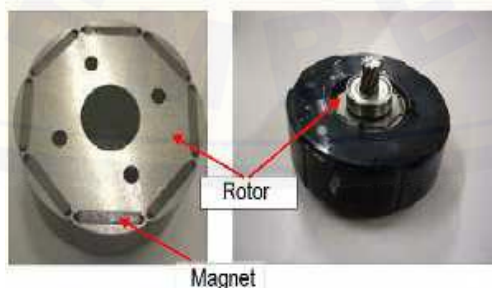
EMF balik sendiri merupakan tegangan balik yang dihasilkan oleh lilitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Ketika motor BLDC sudah dibuat, jumlah lilitan pada stator dan besarnya medan magnet yang dihasilkan nilainya sudah dibuat konstan sehingga yang mempengaruhi besarnya EMF balik adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor,

semakin besar kecepatan sudut yang dihasilkan. 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. Karena berbanding lurus dengan faktor-faktor lain yang mempengaruhi torsi maka kenaikan dan penurunan arus sangat berpengaruh pada besarnya torsi yang dihasilkan motor BLDC.

2.3.2 Rotor

Rotor merupakan bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor DC *brushless* bagian rotornya berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional yang hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara *brushes* (sikat) yang terhubung pada dua buah motor hingga delapan pasang kutub 9 magnet permanen berbentuk persegi panjang yang saling direkatkan menggunakan semacam “epoxy” dan tidak ada *brush* nya.

Rotor dibuat dari magnet permanen dan dapat desain dari dua sampai delapan kutub Magnet Utara (N) atau Selatan (S). Bahan material magnetis yang baik sangat diperlukan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang baik pula. Biasanya magnet permanen dibuat menggunakan magnet *ferrit*. Tetapi saat ini dengan kemajuan teknologi, campuran logam sudah kurang populer untuk digunakan. Meskipun dinilai lebih murah, magnet *ferrit* mempunyai kekurangan yaitu kerapatan *fluks* yang rendah sebagai bahan material yang diperlukan untuk membuat rotor.



Gambar 2.4 Rotor Motor BLDC

(Sumber : Nanang Masudi, 2014)

2.4 Kuat Medan Magnet

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

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (\text{Tesla}) \quad (2.1)$$

$$A = \pi \times r^2$$

Dimana ϕ merupakan nilai dari fluks magnet dari setiap variasi tegangan, sedangkan A merupakan luas penampang. Untuk mendapatkan nilai A dengan mengkalikan π yang merupakan ketetapan dengan r^2 yang merupakan jari – jari stator. Sehingga nantinya akan didapatkan nilai kuat medan magnetnya.

Secara umum *brushless* Motor dibagi menjadi 2, yaitu *Sensored* dan *Sensorless Sensored*, *brushless* motor jenis ini dilengkapi dengan *encoder* dan atau *hall effect* sensor yang berfungsi sebagai detektor pada medan magnet, *hall effect* sensor akan menghasilkan sebuah tegangan yang proporsional dengan kekuatan medan magnet yang diterima oleh sensor tersebut. Motor jenis ini memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dan lebih halus pergerakannya dibanding dengan motor *brushless sensorless*. *Sensorless, brushless* motor jenis ini tidak dilengkapi dengan *encoder* dan atau *hall effect* sensor, sehingga untuk mengetahui pergerakan dari motor jenis ini bisa dilakukan dengan cara mendeteksi dari BEMF dan *zero-crossing* (Kurniawan, 2016).

2.5 EMF

Adapun yang menjadi dasar perbedaan kedua jenis belita tersebut terletak pada hubungan antara *koil* dan belitan stator yang bertujuan untuk memberikan EMF (*Electro Motive Force*) atau gaya gerak listrik yang berbeda. 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.

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. 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 (Kurniawan, 2016).

2.6 Kecepatan Motor

Rotor merupakan bagian penting juga pada motor yang berfungsi untuk menggerakkan atau membuat motor berputar. Perputaran tersebut terjadi akibat adanya gaya elektromagnetik yang dihasilkan oleh stator. Untuk mengetahui putaran pada motor, bisa menggunakan persamaan berikut ini.

$$N_r = \frac{120}{2\pi p N} \times \frac{E_a}{\Phi} \quad (\text{rpm}) \quad (2.2)$$

Dimana p merupakan jumlah kutub (*pole*) pada rotor, n adalah jumlah lilitan, E_a adalah GGL induksi pada motor, sedangkan ϕ adalah fluks magnet.

2.7 Kemagnetan

Benda-benda yang dapat menarik besi disebut magnet. Magnet dapat diperoleh dengan cara buatan. Jika baja digosok dengan sebuah magnet. Dan cara menggosoknya dalam arah yang tetap, maka baja itu akan menjadi magnet. Baja atau besi dapat pula dijadikan magnet dengan cara dialiri arus listrik. Baja atau besi itu dimasukkan ke dalam kumparan kawat, kemudian ke dalam kumparan kawat dialiri arus listrik yang searah. Ujung-ujung sebuah magnet disebut kutub magnet. Kutub-kutub yang sejenis pada magnet tolak-menolak dan kutub-kutub yang tidak sejenis tarik menarik. Kekuatan kutub sebuah magnet sama besarnya, semakin ke tengah kekuatannya semakin berkurang.

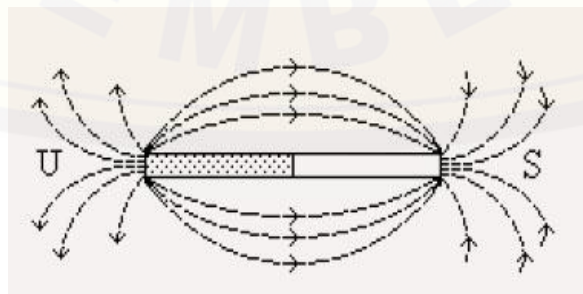
Sehubungan dengan sifat-sifat kemagnetan benda dibedakan atas Diamagnetik dan Para magnetik. Benda magnetik apabila ditempatkan dalam medan magnet yang tidak homogen, ujung-ujung benda itu mengalami gaya tolak sehingga benda akan mengambil posisi yang tegak lurus pada kuat medan. Benda-benda yang demikian mempunyai nilai permeabilitas relatif lebih kecil dari satu. Contohnya bismuth, tembaga, emas, antimon, kaca flinta. Benda paramagnetik apabila ditempatkan dalam medan magnet yang tidak homogen, akan mengambil posisi sejajar dengan arah kuat medan. Benda-benda yang demikian mempunyai permeabilitas relatif lebih besar dari pada satu. Contohnya aluminium, platina, oksigen, sulfat tembaga dan banyak lagi garam-garam logam adalah zat paramagnetik. Benda feromagnetik merupakan benda-benda yang mempunyai efek magnet yang sangat besar, sangat kuat ditarik oleh magnet dan mempunyai permeabilitas relatif sampai beberapa ribu. Contohnya besi, baja, nikel, cobalt dan campuran logam tertentu (almico).

2.7.1 Hukum Coulomb

Besarnya gaya tolak-menolak atau gaya tarik-menarik antara kutub-kutub magnet, sebanding dengan kuat kutubnya masing-masing dan berbanding terbalik dengan kuadrat jaraknya.

2.7.2 Garis Gaya Magnet

Garis gaya magnet merupakan lintasan kutub utara dalam medan magnet atau garis yang bentuknya demikian hingga kuat medan di tiap titik dinyatakan oleh garis singgungnya. Garis-garis gaya keluar dari kutub-kutub dan masuk ke kutub selatan.



Gambar 2.5 Garis Gaya Magnet

(Sumber : Imacokladh, 2009)

2.7.3 Gaya Gerak Listrik (GGL) Induksi

Gaya gerak listrik induksi merupakan beda potensial yang timbul pada ujung-ujung kumparan karena pengaruh induksi elektromagnetik. Dapat diketahui dengan persamaan berikut :

$$E_a = V - (I_a \times R) \quad (2.3)$$

Keterangan :

E_a = GGL induksi (Volt)

V = Tegangan (Volt)

I_a = Arus (A)

R = Hambatan (Ω)

2.7.4 Menghitung Daya Yang Dihasilkan Pada Motor

Untuk mengetahui seberapa besar daya yang dihasilkan dari motor BLDC ini maka dapat digunakan persamaan berikut :

$$P = E_a \times I_a \quad (2.4)$$

Keterangan :

P = Daya yang dihasilkan motor BLDC (Watt)

E_a = GGL induksi (Volt)

I_a = Arus (A)

2.7.5 Menghitung Torsi Motor

Untuk mendapatkan torsi harus mengetahui nilai tegangan, arus, kecepatan motor, dan jumlah kutub. Maka dapat menggunakan persamaan berikut :

$$T = \left(\frac{120}{p} \right) \left(\frac{E_a \times I_a}{Nr} \right) \quad (2.5)$$

Keterangan :

T = Torsi motor (N-m)

P = Jumlah kutub

Nr = Kecepatan motor (rpm)

E_a = GGL induksi (Volt)

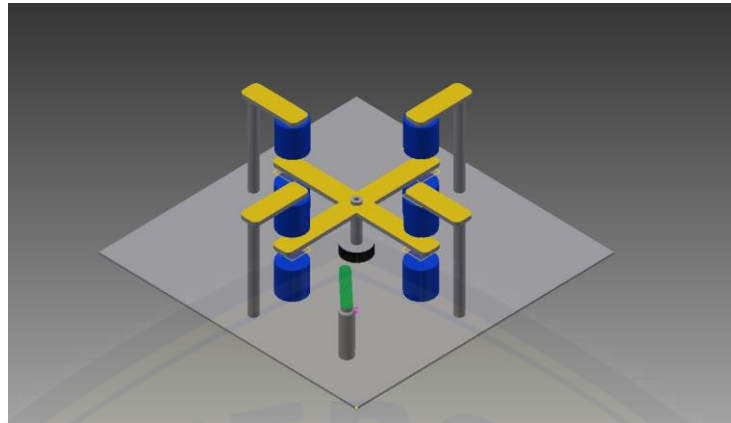
I_a = Arus (A)

2.8 Magnet Permanen

Magnet atau sering dikenal dengan nama “Besi Berani” ini sering kita lihat pada komponen elektronika khususnya pada speaker. Jika Anda 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, misalnya magnet batang yang terdapat pada speaker. Sedangkan magnet sementara merupakan suatu magnet yang memiliki sifat kemagnetan yang bisa bertahan hanya sementara saja, misalnya magnet yang terbuat dari listrik (Kurniawan, 2016).

2.9 Axial Flux

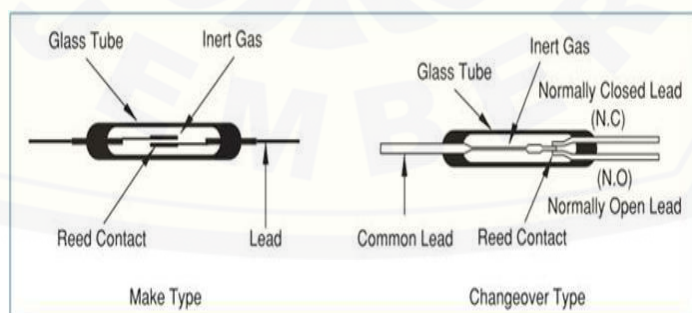
Axial Flux merupakan salah satu tipe alternatif selain *radial flux*. *Axial Flux* memiliki konstruksi yang kompak, berbentuk piringan, dan kerapatan daya yang besar. Mesin jenis ini cocok untuk berbagai keperluan, seperti pompa, kontrol katup, kipas, peralatan mesin, robot, dan peralatan industri. Mesin-mesin jenis ini banyak digunakan untuk penggunaan servo torsi rendah dan aplikasi pengaturan kecepatan. *Axial flux* disebut juga mesin tipe piringan, dengan desain satu lapis atau dua lapis, dengan atau tanpa slot jangkar, dengan rotor internal atau eksternal. Untuk mesin dengan daya rendah biasanya diberi slot kumparan dan permukaan magnet permanen. Saat daya keluaran dari *axial flux* ini meningkat, maka kontak permukaan antara rotor dengan poros akan semakin dekat. Hal ini mengakibatkan pentingnya dalam hal desain dan menyatukan rotor dengan poros agar menghindari kerusakan. Dalam beberapa hal, rotor diberi tambahan komponen transmisi daya untuk mengoptimalkan volume, massa, transfer daya dan waktu perakitan. Untuk penggunaan mesin listrik hal ini mengakibatkan peningkatan efisiensi dan pengurangan biaya. Kebanyakan aplikasi dari *axial flux* ini adalah untuk motor DC tanpa sikat (Jati, 2013). Berikut ini adalah gambar desain motor BLDC menggunakan *axial flux* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Desain *axial flux* yang diterapkan pada alat

2.10 Reed Switch (Sensor Magnet)

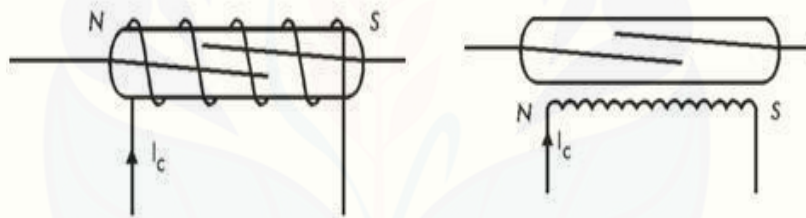
Reed switch terdiri dari dua kawat feromagnetik nikel-besi dan pisau kontak berbentuk khusus (buluh) diposisikan dalam kapsul kaca tertutup rapat dengan celah antara mereka dan dalam pelindung. Kapsul kaca diisi dengan gas inert untuk mencegah aktivasi kontak. *Ruthenium* atau *rhodium* berlapis permukaan kontak terisolasi dari lingkungan luar, yang melindungi kontak dari kontaminasi. *Reed switch* dapat dioperasikan dengan menggunakan medan magnet yang dihasilkan oleh salah satu magnet permanen atau arus pembawa *coil*. Mereka mendorong utara (N) dan selatan (S) kutub pada buluh. Kekuatan menarik magnet mengarah ke penutupan kontak buluh. Setelah penghapusan medan magnet, hubungi terbuka lagi karena elastisitas alang-alang.



Gambar 2.7 *Reed Switch*

(Sumber : Fariedrj, 2014)

Ada *Reed Switch* yang beroperasi dengan magnet permanen, sementara ada *Reed Switch* beroperasi dengan gulungan yang dapat magnet dengan mengirimkan arus melalui mereka. Prinsip dasar kerja sensor ini sangatlah sederhana, yaitu apabila bagian permukaan dari sensor terkena medan magnet maka dua buah kontak plate tipis yang terdapat dibagian dalam sensor akan tertarik oleh medan magnet, sehingga kontak akan terhubung. Pada motor BLDC jika pada *reed switch* didekati medan magnet maka hambatan kontak *reed switch* akan terhubung. Hal ini menyebabkan arus negatif masuk ke kaki transistor, maka transistor tidak akan menghantar arus. Pada saat *reed switch* dijauhkan dari medan magnet maka kontak *reed switch* akan membuka, maka arus listrik positif akan masuk ke kaki basis. Transistor akan mengalirkan arus negatif yang akan membuat rotor berputar.



Gambar 2.8 *Reed Switch* dan Arah Medan Magnet

(Sumber : Fariedrj, 2014)

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini dijelaskan beberapa hal pokok yaitu tempat dan waktu penelitian, alat dan bahan yang digunakan, tahapan penelitian, serta mekanisme perancangan sistem yang meliputi *flowchart* dan blok diagram.

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat Penelitian

Tempat pelaksanaan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Listrik di Jl. Slamet Riyadi No.62 Patrang-Jember.

3.1.2 Waktu Penelitian

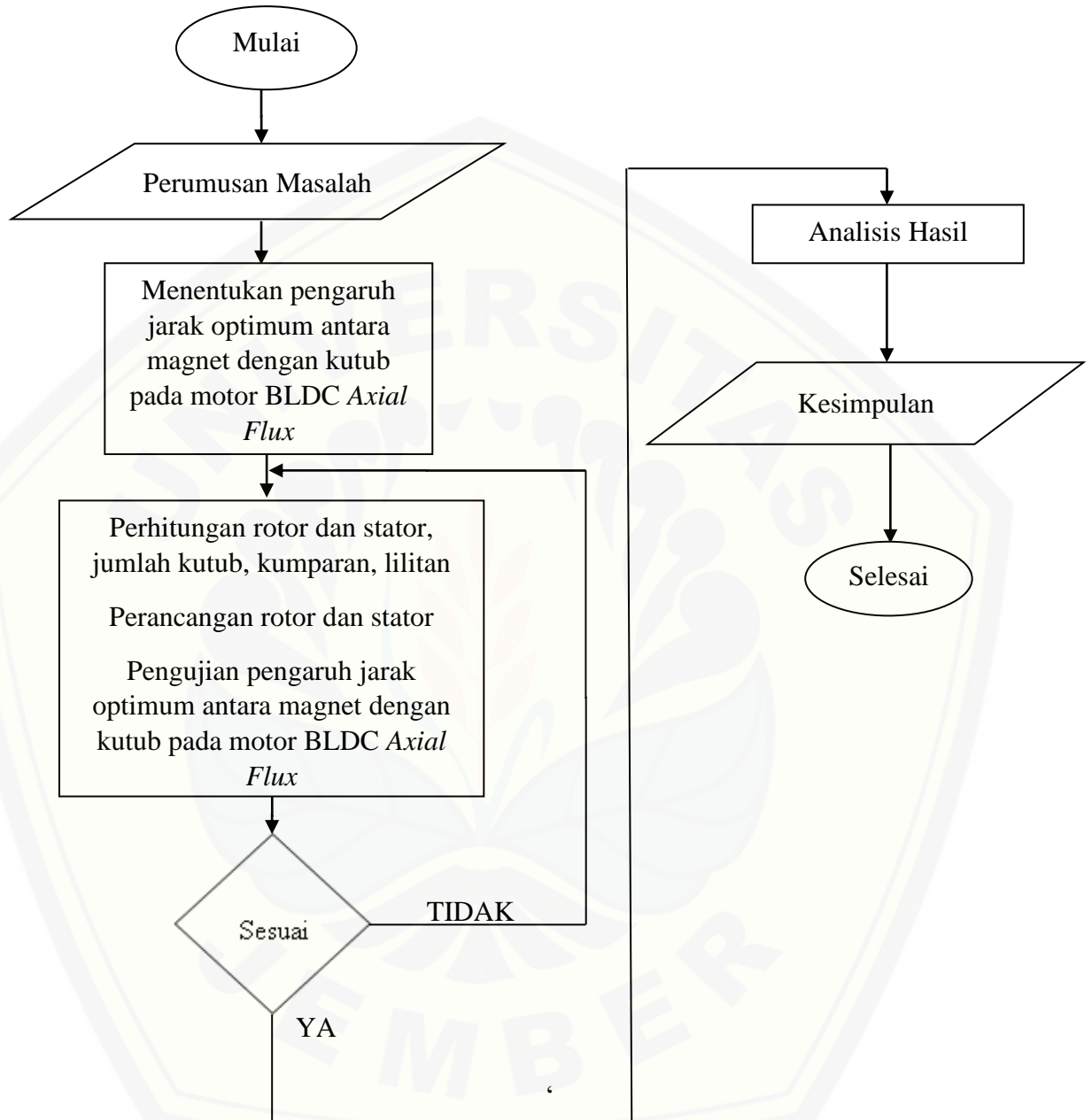
Pelaksanaan pembuatan alat ini dilakukan pada bulan November 2017 sampai Desember 2017 di Laboratorium Konversi Energi Listrik di Jl. Slamet Riyadi No.62 Patrang-Jember.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian ini, antara lain :

1. Avometer
2. Tachometer
3. Gauss Meter
4. Power Supply
5. Transistor TIP41
6. Kawat *email* (0,2 mm)
7. Sensor Magnet (*Reed Switch*)
8. Magnet Permanen (Magnet *Neodymium*)
9. Dioda (1 Ampere)
10. Resistor 1 k Ω

3.3 Tahapan Penelitian



Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

Tahapan yang dilakukan pada penelitian perancangan dan pembuatan alat pengaruh jarak optimum antara magnet dengan kutub pada motor *brushless direct current axial flux* :

1. Studi Literatur

Tahap awal dari penelitian ini mencari literatur dari hasil penelitian sebelumnya, buku maupun internet untuk mengetahui karakteristik komponen, prinsip kerja serta teori yang menunjang lainnya. Diharapkan dengan literatur yang didapat bisa memberikan arahan untuk mengurangi kesalahan dalam penelitian.

2. Menentukan Spesifikasi Motor BLDC

Menentukan spesifikasi motor dengan menggunakan stator ganda yang di setiap statornya memiliki 4 kumparan di atas dan 4 kumparan di bawah dengan diameter 2 cm dan rotor dibuat berbentuk baling – baling diameternya adalah 9 cm dan di setiap ujungnya terdapat magnet *neodymium* (sehingga terdapat 4 magnet permanen).

3. Perhitungan Rotor dan Stator

Tahap ketiga adalah menghitung kecepatan rotor, torsi, diameter kawat dan jumlah lilitan.

4. Perancangan Motor dan Stator

Setelah melakukan perhitungan kita dapat menentukan ukuran dari rotor dan stator pada pengaruh jarak optimum antara magnet dengan kutub pada motor BLDC *axial flux*.

5. Pengujian Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor BLDC *Axial Flux*

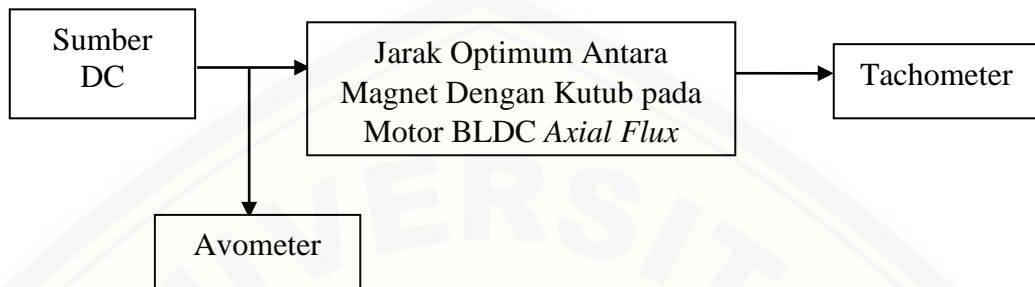
Setelah melakukan tahap perancangan kita dapat menguji performa dari motor tersebut dan mendapatkan data yang akan dicapai.

6. Penarikan Kesimpulan

Pada tahap akhir ini, hasil pengambilan data dan analisa dimasukkan ke pembahasan. Kemudian, dapat ditarik beberapa kesimpulan yang menyangkut kinerja dari alat yang dibuat dan memberikan saran yang dimaksudkan untuk

memperbaiki kekurangan yang ada, kemungkinan pengembangan, serta penyempurnaan alat pada penelitian selanjutnya.

3.4 Blok Diagram dan Perancangan Sistem

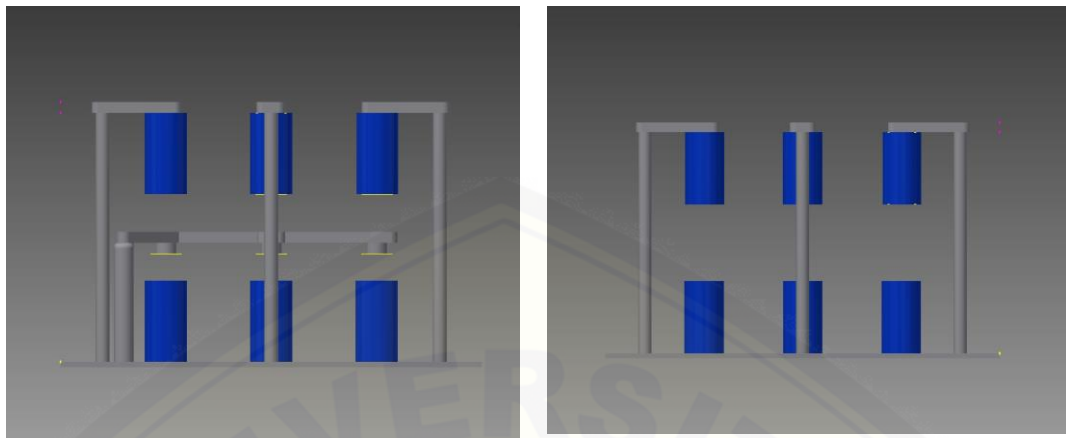


Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

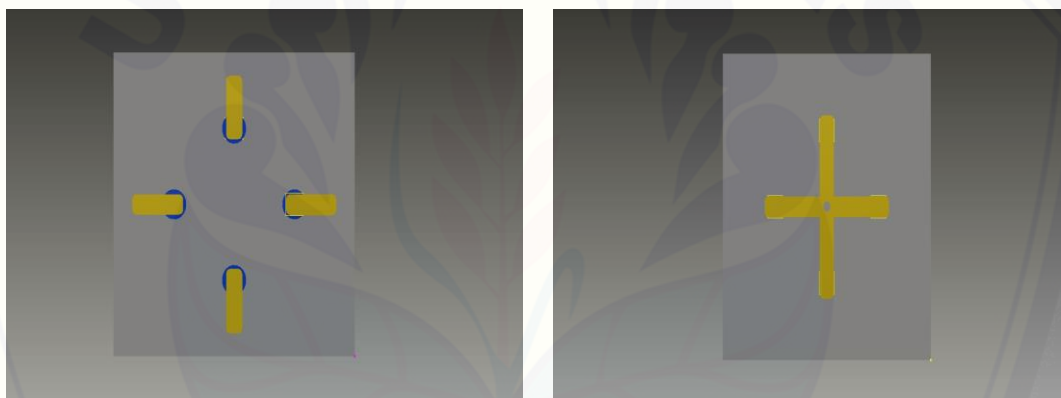
Prinsip kerja dari penelitian ini dapat digambarkan pada blok diagram diatas. Sumber DC yang digunakan berasal dari *power supply*. Sumber DC tersebut digunakan sebagai *suplay* tegangan pada motor. Pada motor BLDC satu fasa ini terdapat 4 magnet permanen yang diletakkan pada rotor motor tersebut. Untuk stator pada motor ini dirancang dengan menggunakan 8 *coil* (4 dibawah dan 4 diatas) serta terdapat sensor magnet (*reed switch*). Pengujian pada motor ini untuk memperoleh karakteristik pengaruh jarak optimum antara magnet dengan kutub, kecepatan, torsi, tegangan, dan arus dengan menggunakan alat ukur tachometer, serta avometer. Data yang akan diambil menggunakan beberapa parameter yang selanjutnya akan dianalisa dari hasil tersebut.

3.5 Perancangan Alat Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor BLDC Axial Flux

Pada perancangan motor listrik BLDC ini meliputi komponen utama dari motor listrik yakni perancangan stator dan perancangan rotor. BLDC yang dirancang dengan menggunakan tegangan kerja maksimal 24 Vdc, magnet *neodymium* dan penentuan bentuk rotor yang ditentukan dari besarnya diameter kawat lilitan pada tiap-tiap kumparan yang terpasang pada stator. Dengan spesifikasi motor yang mempunyai rotor dan stator masing-masing berdiameter 9 cm dan 2 cm serta jarak antara *coil* dengan rotor paling dekat adalah 5 mm.

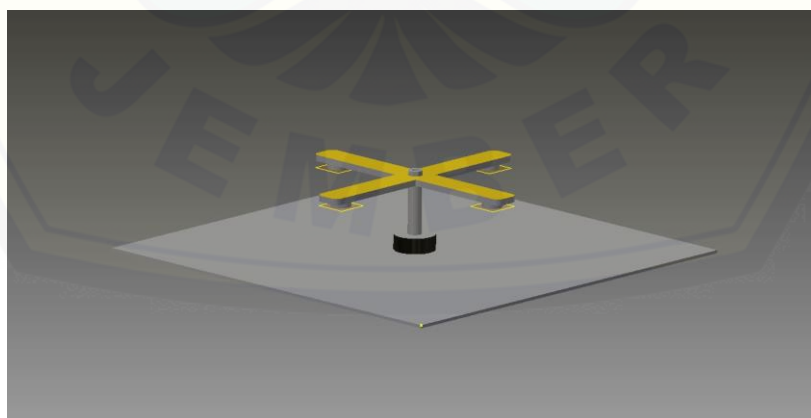


Gambar 3.3 Stator Dari Tampak Samping



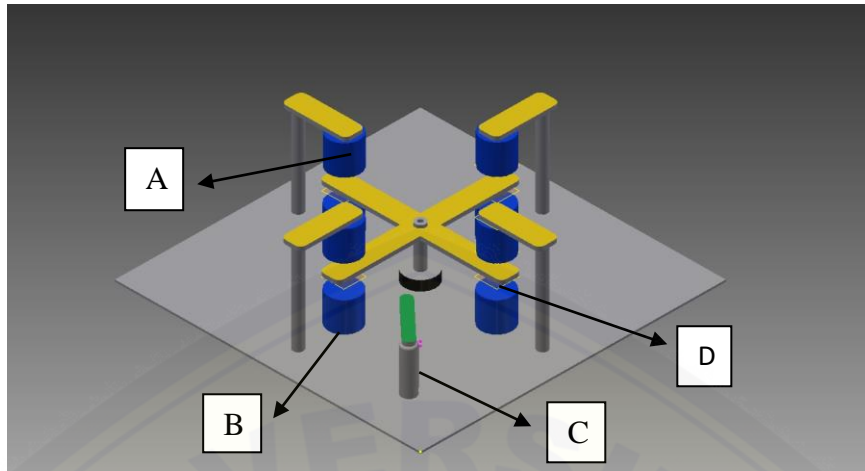
(a.) Atas

(b.) Bawah



(c.) Samping

Gambar 3.4 Rotor Dari Tampak Atas, Bawah, dan Samping



Gambar 3.5 Rancangan Keseluruhan Dari Stator dan Rotor

Keterangan :

A : Coil

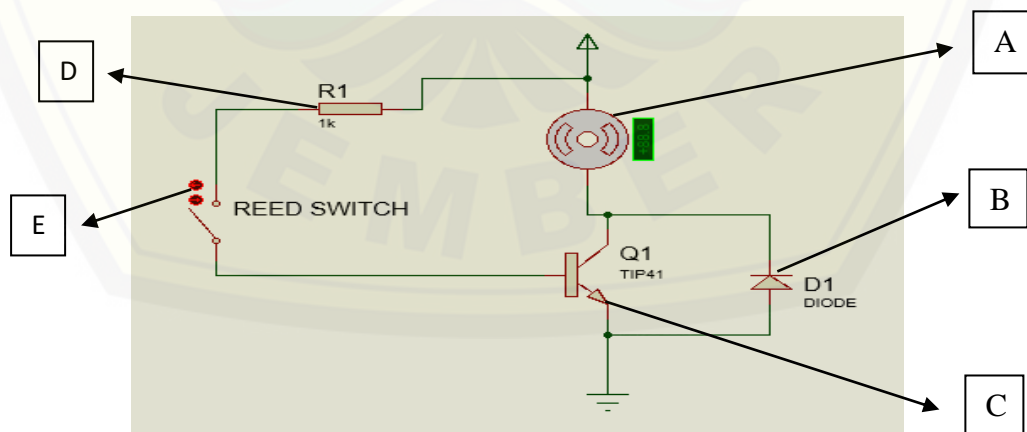
B : Stator

C : Reed Switch

D : Magnet Permanen (Magnet Neodymium)

3.6 Perancangan Driver Motor BLDC Konstruksi *Axial Flux*

Pada driver motor BLDC konstruksi *axial flux* menggunakan sebuah transistor dan komponen lainnya.



Gambar 3.6 Driver Motor BLDC Konstruksi *Axial Flux*

Keterangan :

A : Kumparan Motor BLDC

B : Dioda

C : Transistor TIP41

D : Resistor 1 k Ω

E : Sensor Magnet (*Reed Switch*)

Pada rangkaian diatas menggunakan resitor 1 k Ω serta menggunakan tegangan kerja maksimal 24 vdc. Kaki basis transistor dihubungkan pada *reed switch*, hal ini dikarenakan *reed switch* akan melakukan *switching* apabila terkena medan magnet dari rotor sehingga transistor dalam kondisi jenuh pada hal ini *colector* dan *emitor* terhubung sehingga menyebabkan arus mengalir dari *colector* menuju *emitor* atau *ground* dan akan menghasilkan medan magnet selatan pada kumparan. Akan terjadi gaya tarik – menarik antara kumparan dan magnet sehingga motor tersebut berputar.

3.7 Alur Perancangan Motor BLDC Axial Flux

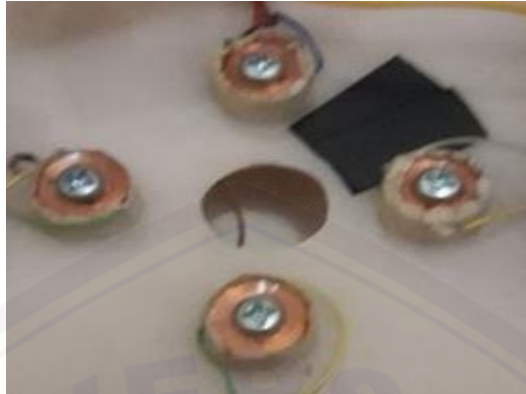
3.7.1 Pembuatan Lilitan Pada Tiap Stator



Gambar 3.7 Lilitan Stator

Pada pembuatan lilitan ini di lakukan sebanyak 8 kali sesuai kebutuhan kumparan yang di inginkan. Untuk jumlah lilitannya sebanyak 400 lilitan setiap kumparan, dimana di lilit secara *double* dengan ukuran kawat email 0,2 mm. Jadi total kumparan yang digunakan adalah 8 kumparan.

3.7.2 Pemasangan Stator Bagian Bawah



Gambar 3.8 Stator Bagian Bawah

Pada penelitian ini menggunakan stator ganda yaitu stator bawah dan stator atas. Pada pemasangan stator bagian bawah di butuhkan 4 kumparan, dimana tiap kumparan terhubung seri dengan kumparan lain. Sedangkan kutubnya sendiri di atur, pada bagian bawah kumparan kutub selatan dan bagian atas kumparan kutub utara.

3.7.3 Pemasangan Rotor

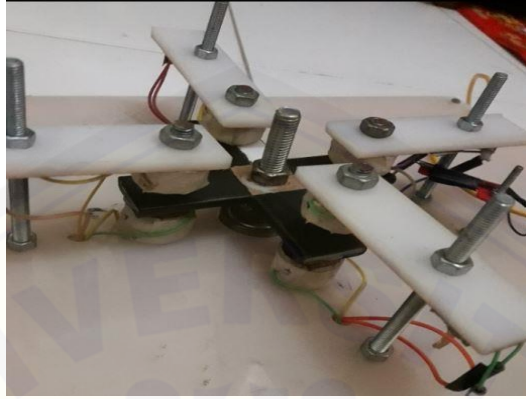


Gambar 3.9 Rotor

Pada pemasangan rotor di rancang sesuai gambar 3.9 dimana berbentuk baling – baling yang di setiap ujungnya terdapat magnet *neodymium* (4 magnet) yang di pasang di bagian bawah rotor. Baling-baling tersebut diberi tanda hitam dan hanya satu diberi tanda putih, hal tersebut dilakukan supaya terdeteksi pada pembacaan tachometer ketika pengukuran kecepatan. Pada magnet *neodymium* kutubnya di atur, pada bagian bawah rotor kutub selatan, sedangkan bagian atas rotor kutub utara.

Hal ini dimaksudkan agar kondisi rotor ketika berhadapan dengan stator bawah maupun stator atas menghasilkan gaya tarik – menarik ketika rotor berputar.

3.7.4 Pemasangan Stator Bagian Atas



Gambar 3.10 Stator Bagian Atas

Pada pemasangan stator yang kedua ini adalah stator bagian atas yang membutuhkan 4 kumparan, dimana tiap kumparan terhubung seri dengan kumparan lain. Sedangkan kutubnya sendiri di atur pada bagian bawah kumparan kutub selatan dan bagian atas kumparan kutub utara.

BAB 5. PENUTUP

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan dan saran yang dapat digunakan sebagai dasar untuk penelitian selanjutnya, antara lain :

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari hasil penelitian Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor *Brushless Direct Current Axial Flux*, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Pada Pengujian motor BLDC *axial flux* ketika jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm) didapatkan nilai kecepatan tertinggi pada setiap variasi tegangan, yaitu ketika tegangan 6 volt kecepatannya sebesar 523,6 rpm ketika tegangan 15 volt kecepatannya sebesar 1750 rpm, ketika tegangan 24 volt kecepatannya sebesar 2740 rpm. Semakin besar nilai tegangan yang dihasilkan maka semakin tinggi juga kecepatannya.
2. Dari hasil penelitian menunjukkan nilai eror persen terbesar kecepatan pada setiap pengujian diantaranya, pada pengujian jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 10 mm) ketika tegangan 24 volt yaitu 4 %, pada pengujian jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 15 mm) ketika tegangan 6 volt yaitu 4 %, pada pengujian jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 20 mm) ketika tegangan 6 volt yaitu 5,5 %, pada pengujian jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm) ketika tegangan 15 volt yaitu 5,4 %, pada pengujian jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 10 mm) ketika tegangan 15 volt yaitu 8,4 %, pada pengujian jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 15 mm) ketika tegangan 15 volt yaitu 9,7 %, pada pengujian jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 20 mm) ketika tegangan 6 volt yaitu 8,5 %. Error persen pada penelitian ini disebabkan karena segi mekanik, dalam hal ini jarak (*gap*) antara rotor dan stator ganda sangat berpengaruh terhadap kecepatan, serta posisi dari sensor *reed switch* juga mempengaruhi kinerja dari motor tersebut.

3. Berdasarkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan hubungan antara torsi perhitungan dan kecepatan perhitungan adalah berbanding terbalik. Apabila nilai torsi yang dihasilkan kecil maka nilai kecepatan yang dihasilkan tinggi, dan sebaliknya. Nilai torsi tertinggi sebesar 0,088 N.m terletak pada tegangan 24 volt ketika pengujian motor BLDC *axial flux* jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 15 mm), sedangkan kecepatan tertinggi sebesar 2800 rpm terletak pada tegangan 24 volt ketika pengujian motor BLDC *axial flux* jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm).

5.2 Saran

Hal-hal yang dapat disarankan untuk penelitian berikutnya yang berhubungan dengan Pengaruh Jarak Optimum Antara Magnet Dengan Kutub Pada Motor *Brushless Direct Current Axial Flux* antara lain :

1. Perlu diperhatikan pada segi mekanik dalam pembuatan motor *brushless direct current axial flux* terutama (*gap*) antara rotor, dan stator ganda, serta kuat medan magnet pada magnet yang digunakan.
2. Pada stator, dikarenakan menggunakan stator ganda, maka ketika pengujian jarak optimum antara magnet dengan kutub harus disesuaikan rata tinggi rendahnya stator atas dan bawah agar hasil data yang dihasilkan dapat optimum.

DATAR PUSTAKA

- Imacokladh. (2009). *Kemagnetan*. Retrieved from <http://imacokladh.wordpress.com>
- Desain Sistem Kontrol. (2013). *Menghitung Arus Motor AC*. Retrieved from <http://trikueni-desain-sistem.blogspot.co.id>
- Muhammad Nur Yuniarto (2014). *Perancangan dan Uji Performa Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless Direct Current (DC) Motor*. Jurnal TEKNIK POMITS Vol.1 No. 1 1-7, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS)
- Amin Mahmoudi, Solmaz Kahourzade, Nasrudin Abd. Rohim, Wooi Ping Hew, Mohammad Nasir Uddin (2014). *Design, Analysis, and Prototyping of a Novel-Structured Solid-Rotor-Ringed Line-Start Axial-Flux Permanent-Magnet Motor*. IEEE
- J. Y. Kim, S. J. Sung, and G. H. Jang (2012) *Characterization and Experimental Verification of the Axial Unbalanced Magnetic Force in Brushless DC Motors*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. 48, No. 11, PREM Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea
- Abe Dharmawan (2009). *Pengendalian Motor Brushless DC Dengan Metode PWM Sinusoidal Menggunakan Atmega 16*. Jurusan Teknik Elektro Depok, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
- Nanang Masudi (2014). *Design Of BLDC Motor Controller For Increasing The Output Performance (Output Power) From Electric Bike*. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS)

LAMPIRAN

A. Perhitungan

Rumus Daya pada motor

$$P = E_a \times I_a$$

Rumus GGL

$$E_a = V - (I_a \times R)$$

Rumus Kuat Medan Magnet

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

$$\begin{aligned} A &= \pi \times r^2 \\ &= 3,14 \times 0,005^2 \\ &= 7,85 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

Rumus Fluks Magnet (Φ)

$$\Phi = B \times A$$

Rumus Torsi Pada Motor

$$T = \frac{120}{p} \times \frac{E_a \times I_a}{Nr}$$

Rumus Kecepatan Rotor

$$Nr = \frac{120}{2\pi p N} \times \frac{E_a}{\Phi}$$

Rumus Error Persen

$$E\% = \frac{HT-HP}{HT} \times 100$$

Perhitungan jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 10 mm)

1. Pada tegangan 6 volt

$$P = 3,4 \times 0,20 = 0,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 6 - (0,20 \times 13) = 3,4 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000466}{0,0000785} = 0,593 \text{ T}$$

$$\phi = 0,593 \times 0,0000785 = 4,66 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{3,4 \times 0,20}{419,0} = 0,024 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{3,4}{4,66 \times 10^{-5}} = 435 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{435 - 419,0}{435} \times 100 = 3 \%$$

2. Pada tegangan 15 volt

$$P = 9,02 \times 0,46 = 4,14 \text{ Watt}$$

$$Ea = 15 - (0,46 \times 13) = 9,02 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000336}{0,0000785} = 0,428 \text{ T}$$

$$\phi = 0,428 \times 0,0000785 = 3,36 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{9,02 \times 0,46}{1548} = 0,040 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{9,02}{3,36 \times 10^{-5}} = 1600 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1600 - 1548}{1600} \times 100 = 3,2 \%$$

3. Pada tegangan 24 volt

$$P = 14,25 \times 0,75 = 10,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 24 - (0,75 \times 13) = 14,25 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000369}{0,0000785} = 0,470 \text{ T}$$

$$\phi = 0,470 \times 0,0000785 = 3,69 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{14,25 \times 0,75}{2208} = 0,072 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{14,25}{3,69 \times 10^{-5}} = 2300 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{2300 - 2208}{2300} \times 100 = 4 \%$$

Perhitungan jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 15 mm)

1. Pada tegangan 6 volt

$$P = 3,27 \times 0,21 = 0,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 6 - (0,21 \times 13) = 3,27 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000650}{0,0000785} = 0,828 \text{ T}$$

$$\phi = 0,828 \times 0,0000785 = 6,50 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{3,27 \times 0,21}{288,0} = 0,035 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{3,27}{6,50 \times 10^{-5}} = 300 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{300 - 288,0}{300} \times 100 = 4 \%$$

2. Pada tegangan 15 volt

$$P = 8,76 \times 0,48 = 4,20 \text{ Watt}$$

$$Ea = 15 - (0,48 \times 13) = 8,76 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000360}{0,0000785} = 0,458 \text{ T}$$

$$\phi = 0,458 \times 0,0000785 = 3,60 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{8,76 \times 0,48}{1419} = 0,044 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{8,76}{3,60 \times 10^{-5}} = 1450 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1450 - 1419}{1450} \times 100 = 2,1 \%$$

3. Pada tegangan 24 volt

$$P = 14,25 \times 0,75 = 10,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 24 - (0,75 \times 13) = 14,25 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000386}{0,0000785} = 0,491 \text{ T}$$

$$\phi = 0,491 \times 0,0000785 = 3,86 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{14,25 \times 0,75}{2155} = 0,074 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{14,25}{3,86 \times 10^{-5}} = 2200 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{2200 - 2155}{2200} \times 100 = 2 \%$$

Perhitungan jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 20 mm)

1. Pada tegangan 6 volt

$$P = 3,4 \times 0,20 = 0,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 6 - (0,20 \times 13) = 3,4 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000966}{0,0000785} = 1,230 \text{ T}$$

$$\phi = 1,230 \times 0,0000785 = 9,66 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{3,4 \times 0,20}{198,4} = 0,051 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{3,4}{9,66 \times 10^{-5}} = 210 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{210 - 198,4}{210} \times 100 = 5,5 \%$$

2. Pada tegangan 15 volt

$$P = 8,76 \times 0,48 = 4,20 \text{ Watt}$$

$$Ea = 15 - (0,48 \times 13) = 8,76 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000387}{0,0000785} = 0,492 \text{ T}$$

$$\phi = 0,492 \times 0,0000785 = 3,87 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{8,76 \times 0,48}{1306} = 0,048 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{8,76}{3,87 \times 10^{-5}} = 1350 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1350 - 1306}{1350} \times 100 = 3,2 \%$$

3. Pada tegangan 24 volt

$$P = 14,64 \times 0,72 = 10,54 \text{ Watt}$$

$$Ea = 24 - (0,72 \times 13) = 14,64 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000416}{0,0000785} = 0,529 \text{ T}$$

$$\phi = 0,529 \times 0,0000785 = 4,16 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{14,64 \times 0,72}{2057} = 0,076 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{14,64}{4,16 \times 10^{-5}} = 2100 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{2100 - 2057}{2100} \times 100 = 2 \%$$

Perhitungan jarak antara magnet dengan kutub (bawah 5 mm – atas 5 mm)

1. Pada tegangan 6 volt

$$P = 3,4 \times 0,20 = 0,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 6 - (0,20 \times 13) = 3,4 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000369}{0,0000785} = 0,470 \text{ T}$$

$$\phi = 0,470 \times 0,0000785 = 3,69 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{3,4 \times 0,20}{523,6} = 0,019 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{3,4}{3,69 \times 10^{-5}} = 550 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{550 - 523,6}{550} \times 100 = 4,8 \%$$

2. Pada tegangan 15 volt

$$P = 9,15 \times 0,45 = 4,11 \text{ Watt}$$

$$Ea = 15 - (0,45 \times 13) = 9,15 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000295}{0,0000785} = 0,375 \text{ T}$$

$$\phi = 0,375 \times 0,0000785 = 2,95 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{9,15 \times 0,45}{1750} = 0,035 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{9,15}{2,95 \times 10^{-5}} = 1850 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1850 - 1750}{1850} \times 100 = 5,4 \%$$

3. Pada tegangan 24 volt

$$P = 14,25 \times 0,75 = 10,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 24 - (0,75 \times 13) = 14,25 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000303}{0,0000785} = 0,385 \text{ T}$$

$$\phi = 0,385 \times 0,0000785 = 3,03 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{14,64 \times 0,75}{2740} = 0,058 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{14,25}{3,03 \times 10^{-5}} = 2800 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{2800 - 2740}{2800} \times 100 = 2,1 \%$$

Perhitungan jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 10 mm)

1. Pada tegangan 6 volt

$$P = 3,4 \times 0,20 = 0,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 6 - (0,20 \times 13) = 3,4 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000466}{0,0000785} = 0,593 \text{ T}$$

$$\phi = 0,593 \times 0,0000785 = 4,66 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{3,4 \times 0,20}{423,3} = 0,024 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{3,4}{4,66 \times 10^{-5}} = 435 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{435 - 423,3}{435} \times 100 = 2,6 \%$$

2. Pada tegangan 15 volt

$$P = 9,15 \times 0,45 = 4,11 \text{ Watt}$$

$$Ea = 15 - (0,45 \times 13) = 9,15 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000341}{0,0000785} = 0,434 \text{ T}$$

$$\phi = 0,434 \times 0,0000785 = 3,41 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{9,15 \times 0,45}{1465} = 0,042 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{9,15}{3,41 \times 10^{-5}} = 1600 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1600 - 1465}{1600} \times 100 = 8,4 \%$$

3. Pada tegangan 24 volt

$$P = 14,51 \times 0,73 = 10,54 \text{ Watt}$$

$$Ea = 24 - (0,73 \times 13) = 14,51 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000376}{0,0000785} = 0,478 \text{ T}$$

$$\phi = 0,478 \times 0,0000785 = 3,76 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{14,51 \times 0,73}{2154} = 0,073 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{14,51}{3,76 \times 10^{-5}} = 2300 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{2300 - 2154}{2300} \times 100 = 6,3 \%$$

Perhitungan jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 15 mm)

1. Pada tegangan 6 volt

$$P = 3,27 \times 0,21 = 0,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 6 - (0,21 \times 13) = 3,27 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000650}{0,0000785} = 0,828 \text{ T}$$

$$\phi = 0,828 \times 0,0000785 = 6,50 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{3,27 \times 0,21}{283,9} = 0,035 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{3,27}{6,50 \times 10^{-5}} = 300 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{300 - 283,9}{300} \times 100 = 5,3 \%$$

2. Pada tegangan 15 volt

$$P = 7,98 \times 0,54 = 4,30 \text{ Watt}$$

$$Ea = 15 - (0,54 \times 13) = 7,98 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000333}{0,0000785} = 0,424 \text{ T}$$

$$\phi = 0,424 \times 0,0000785 = 3,33 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{7,98 \times 0,54}{1290} = 0,050 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{7,98}{3,33 \times 10^{-5}} = 1430 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1430 - 1290}{1430} \times 100 = 9,7 \%$$

3. Pada tegangan 24 volt

$$P = 11,26 \times 0,98 = 11,03 \text{ Watt}$$

$$Ea = 24 - (0,98 \times 13) = 11,26 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000344}{0,0000785} = 0,438 \text{ T}$$

$$\phi = 0,438 \times 0,0000785 = 3,44 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{11,26 \times 0,98}{1862} = 0,088 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{11,26}{3,44 \times 10^{-5}} = 1950 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1950 - 1862}{1950} \times 100 = 4,5 \%$$

Perhitungan jarak antara magnet dengan kutub (atas 5 mm – bawah 20 mm)

1. Pada tegangan 6 volt

$$P = 3,4 \times 0,20 = 0,68 \text{ Watt}$$

$$Ea = 6 - (0,20 \times 13) = 3,4 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,000100}{0,0000785} = 1,273 \text{ T}$$

$$\phi = 1,273 \times 0,0000785 = 1,00 \times 10^{-4} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{3,4 \times 0,20}{185,6} = 0,054 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{3,4}{1,00 \times 10^{-4}} = 203 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{203 - 185,6}{203} \times 100 = 8,5 \%$$

2. Pada tegangan 15 volt

$$P = 8,76 \times 0,48 = 4,20 \text{ Watt}$$

$$Ea = 15 - (0,48 \times 13) = 8,76 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000523}{0,0000785} = 0,666 \text{ T}$$

$$\phi = 0,666 \times 0,0000785 = 5,23 \times 10^{-5} \text{ T}$$

$$T = \frac{120}{8} \times \frac{8,76 \times 0,48}{941,8} = 0,066 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{8,76}{5,23 \times 10^{-5}} = 1000 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1000 - 941,8}{1000} \times 100 = 5,8 \%$$

3. Pada tegangan 24 volt

$$P = 12,56 \times 0,88 = 11,05 \text{ Watt}$$

$$Ea = 24 - (0,88 \times 13) = 12,56 \text{ volt}$$

$$B = \frac{0,0000462}{0,0000785} = 0,588 \text{ T}$$

$$\phi = 0,588 \times 0,0000785 = 4,62 \times 10^{-5} \text{ T}$$

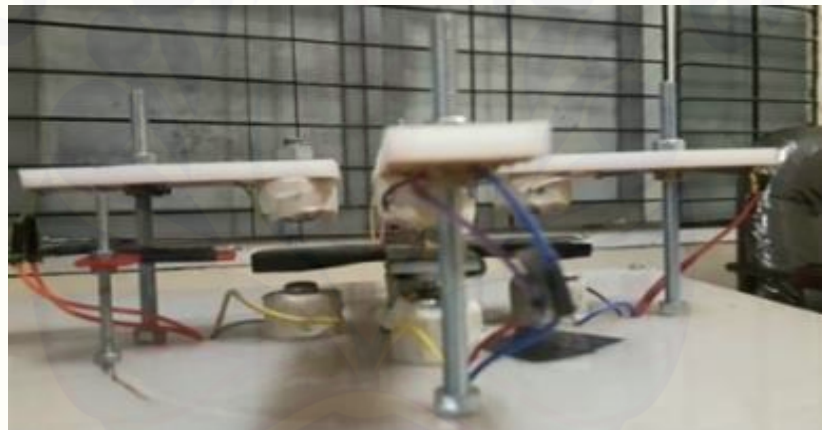
$$T = \frac{120}{8} \times \frac{12,56 \times 0,88}{1563} = 0,070 \text{ N.m}$$

$$Nr = \frac{120}{2 \times 3,14 \times 8 \times 400} \times \frac{12,56}{4,62 \times 10^{-5}} = 1620 \text{ rpm}$$

$$E\% = \frac{1620 - 1563}{1620} \times 100 = 3,5 \%$$

B. Dokumentasi

1. Jarak Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 10 mm) dan Pengukuran Kecepatan



(a.) Tegangan 6 volt



(b.) Tegangan 15 volt



(c.) Tegangan 24 volt

2. Jarak Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 15 mm) dan Pengukuran Kecepatan





(a.) Tegangan 6 volt



(b.) Tegangan 15 volt



(c.) Tegangan 24 volt

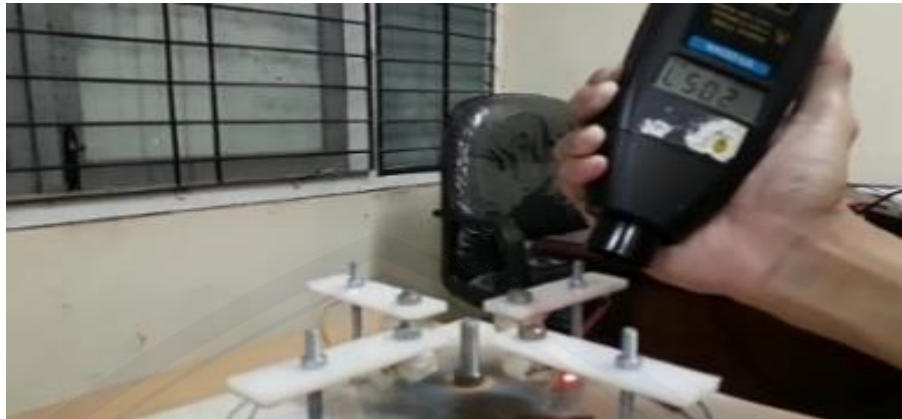
3. Jarak Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 20 mm) dan Pengukuran Kecepatan



(a.) Tegangan 6 volt



(b.) Tegangan 15 volt



(c.) Tegangan 24 volt

4. Jarak Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 5 mm) dan Pengukuran Kecepatan



(a.) Tegangan 6 volt



(b.) Tegangan 15 volt



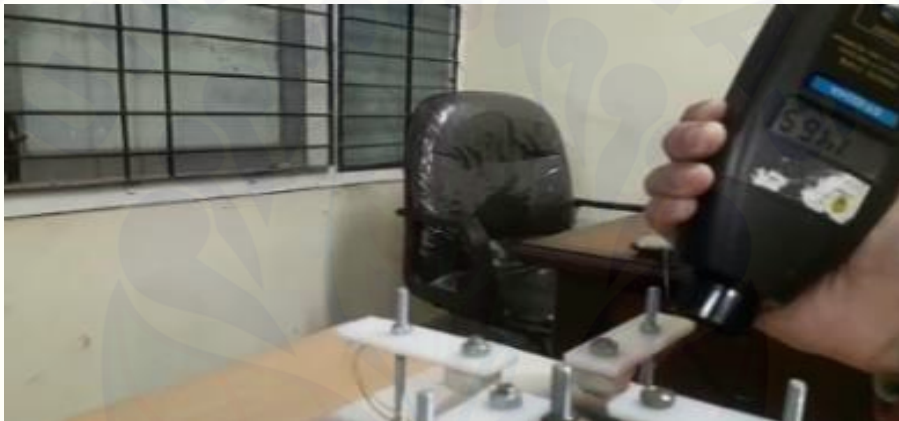
(c.) Tegangan 24 volt

5. Jarak Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 10 mm) dan Pengukuran Kecepatan

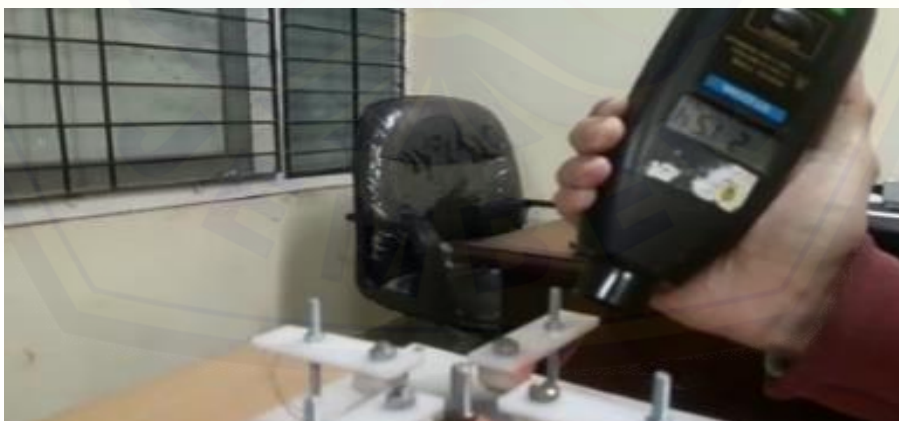




(a.) Tegangan 6 volt



(b.) Tegangan 15 volt



(c.) Tegangan 24 volt

6. Jarak Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 15 mm) dan Pengukuran Kecepatan



(a.) Tegangan 6 volt



(b.) Tegangan 15 volt



(c.) Tegangan 24 volt

7. Jarak Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 20 mm) dan Pengukuran Kecepatan



(a.) Tegangan 6 volt



(b.) Tegangan 15 volt

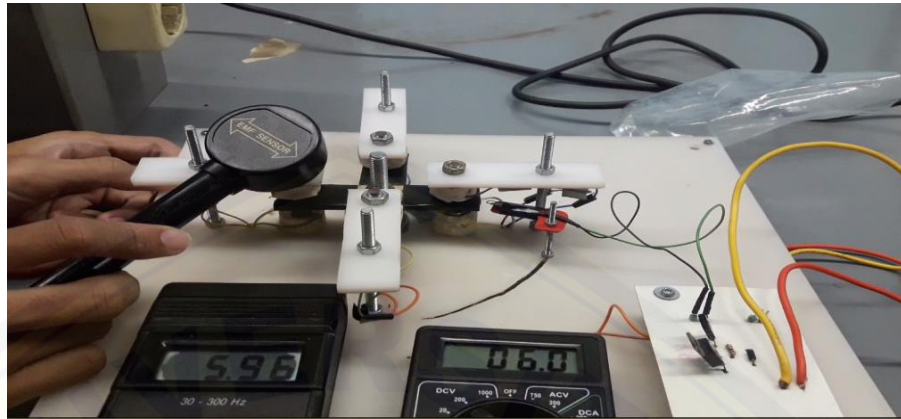


(c.) Tegangan 24 volt

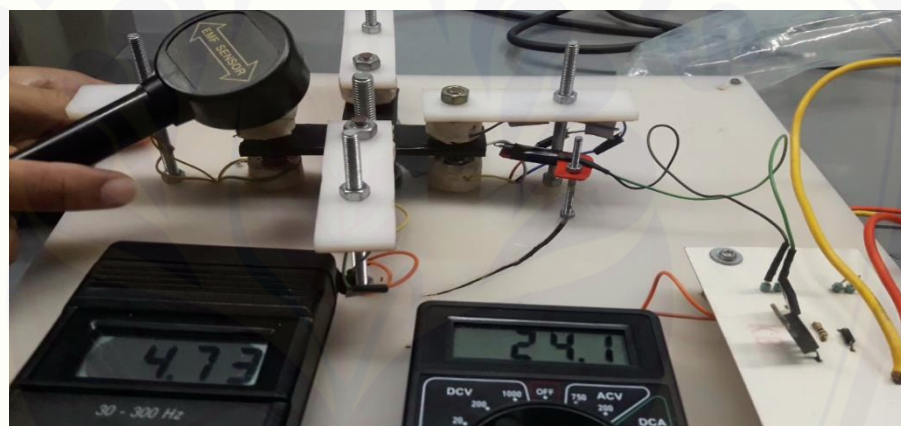


Nilai Kerapatan Magnet *Neodymium* Diukur Dengan Gauss Meter Sebesar 0,14 μT

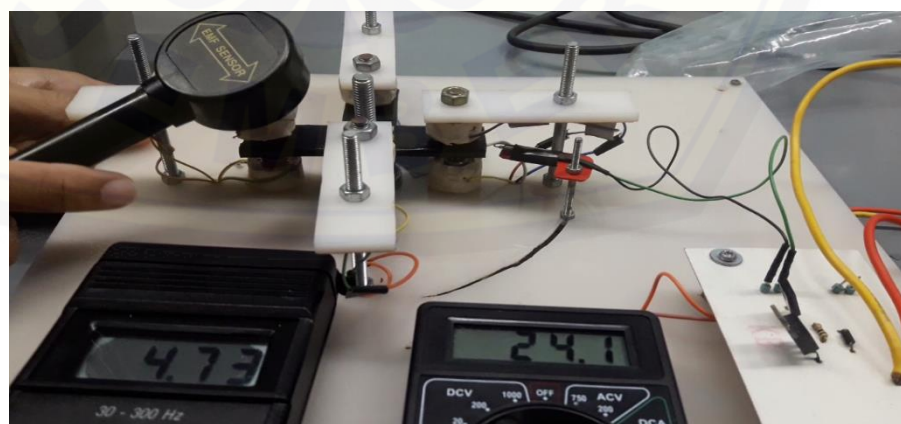
1. Jarak Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 10 mm) dan Pengukuran Kuat Medan Magnet



(a.) Tegangan 6 volt

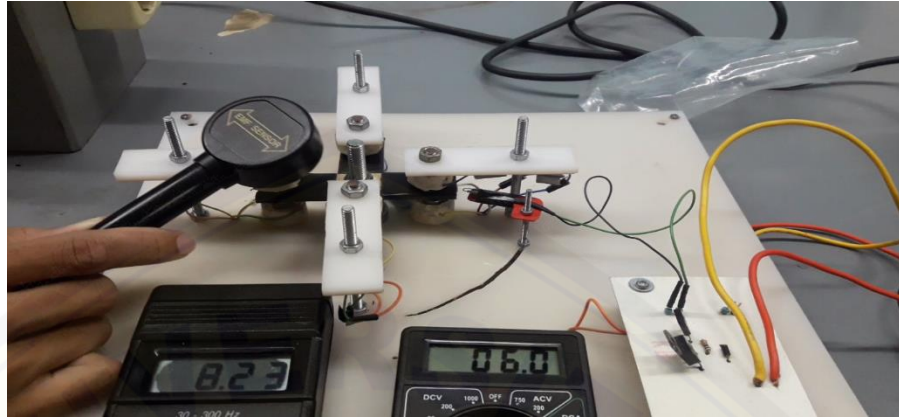


(b.) Tegangan 15 volt

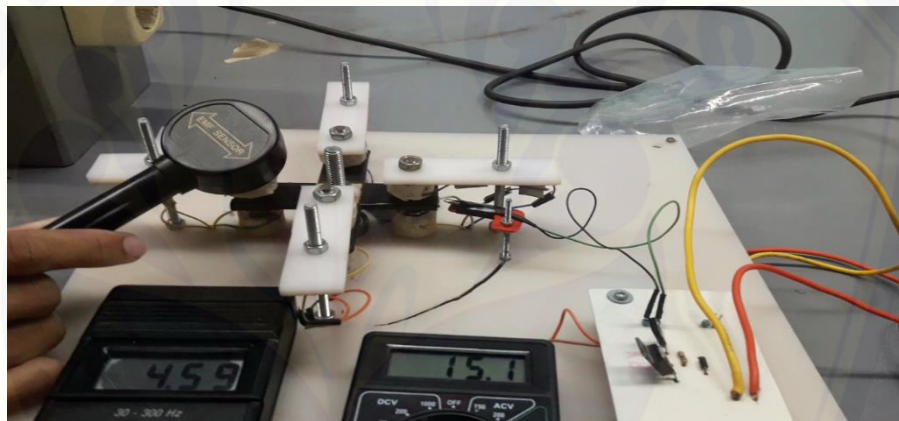


(c.) Tegangan 24 volt

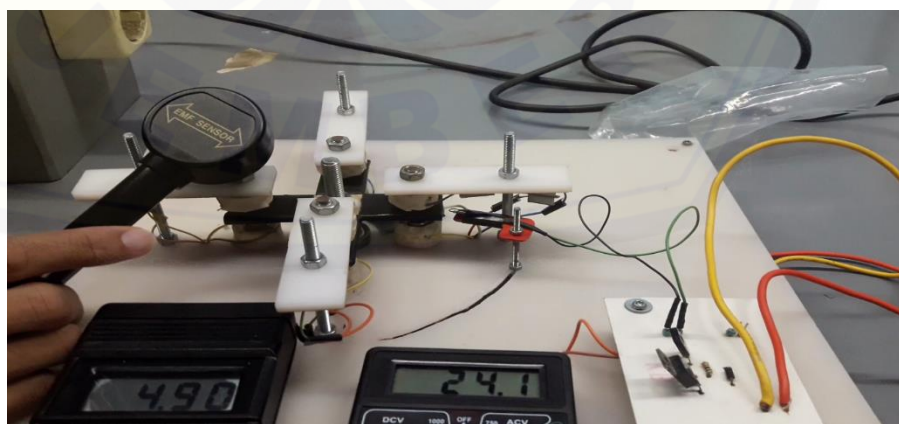
2. Jarak Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 15 mm) dan Pengukuran Kuat Medan Magnet



(a.) Tegangan 6 volt

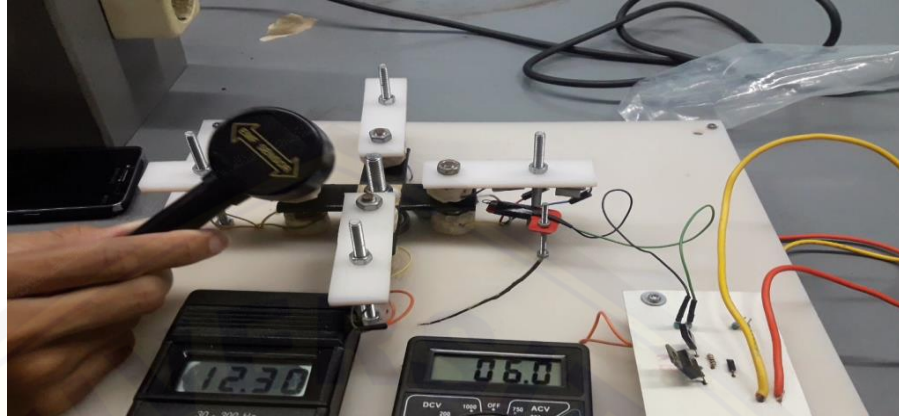


(b.) Tegangan 15 volt

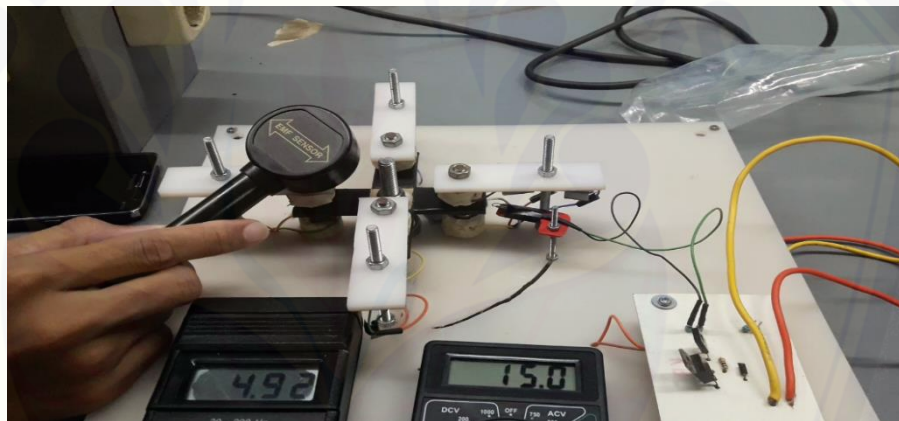


(c.) Tegangan 24 volt

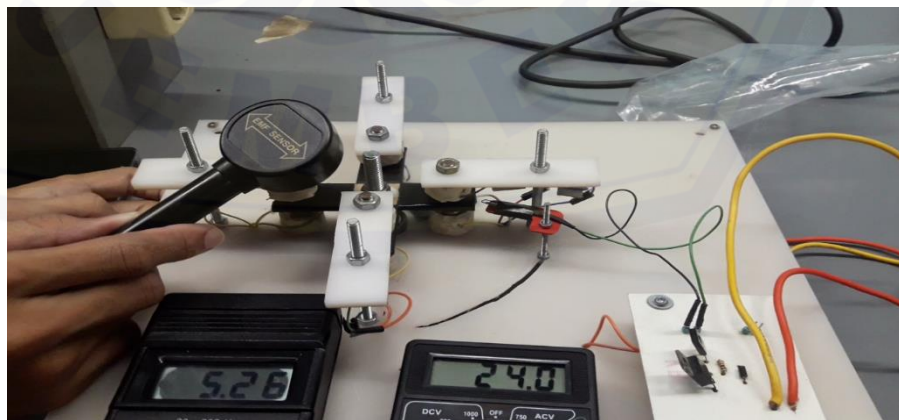
3. Jarak Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 20 mm) dan Pengukuran Kuat Medan Magnet



(a.) Tegangan 6 volt

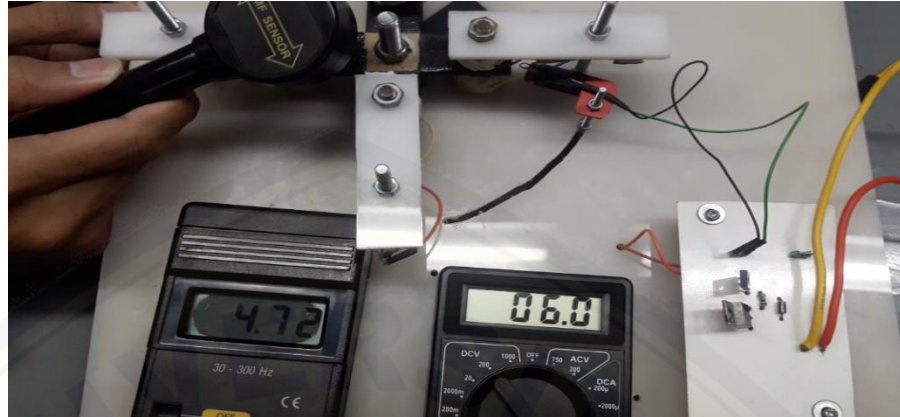


(b.) Tegangan 15 volt



(c.) Tegangan 24 volt

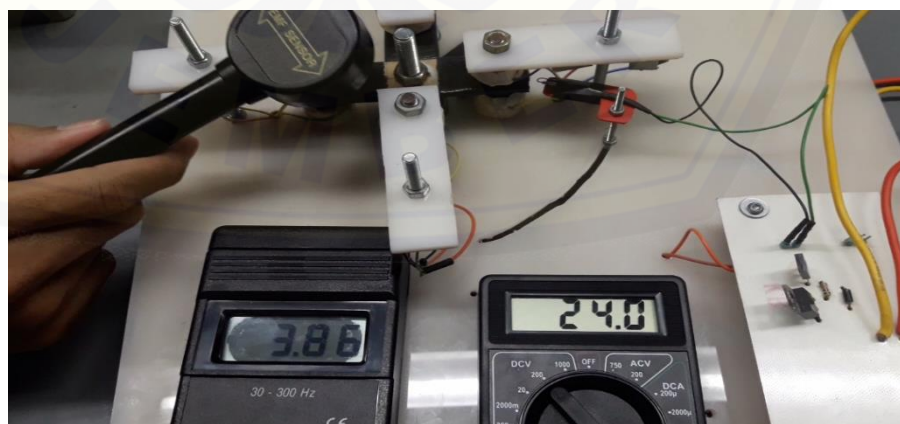
4. Jarak Magnet Dengan Kutub (Bawah 5 mm – Atas 5 mm) dan Pengukuran Kuat Medan Magnet



(a.) Tegangan 6 volt

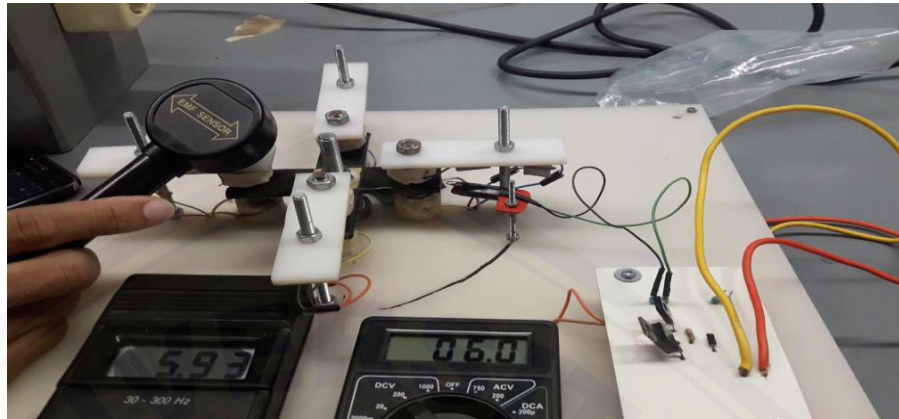


(b.) Tegangan 15 volt

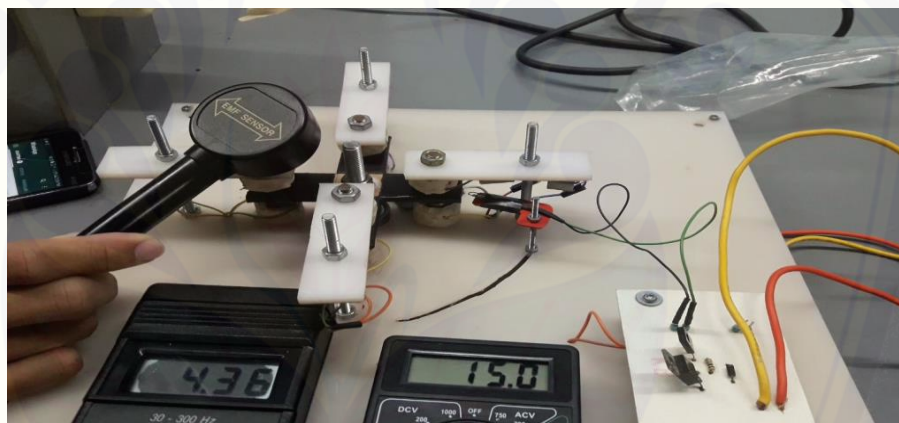


(c.) Tegangan 24 volt

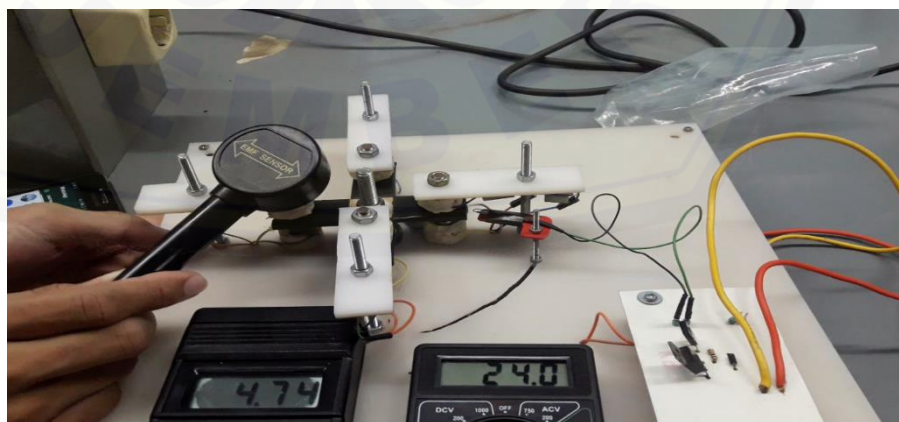
5. Jarak Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 10 mm) dan Pengukuran Kuat Medan Magnet



(a.) Tegangan 6 volt

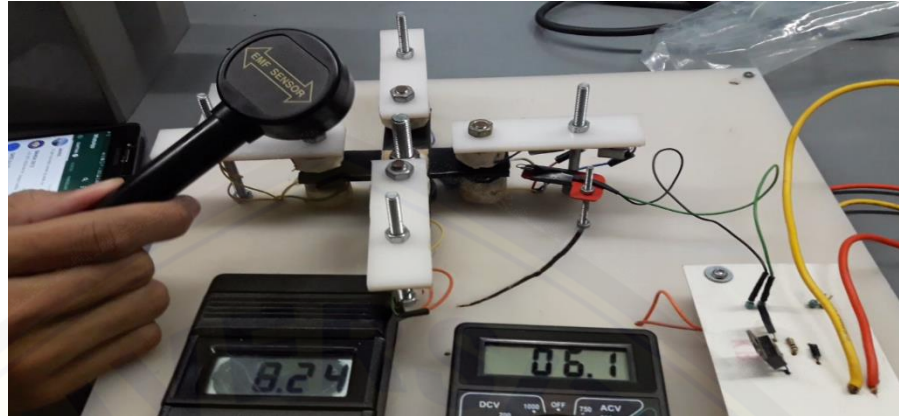


(b.) Tegangan 15 volt

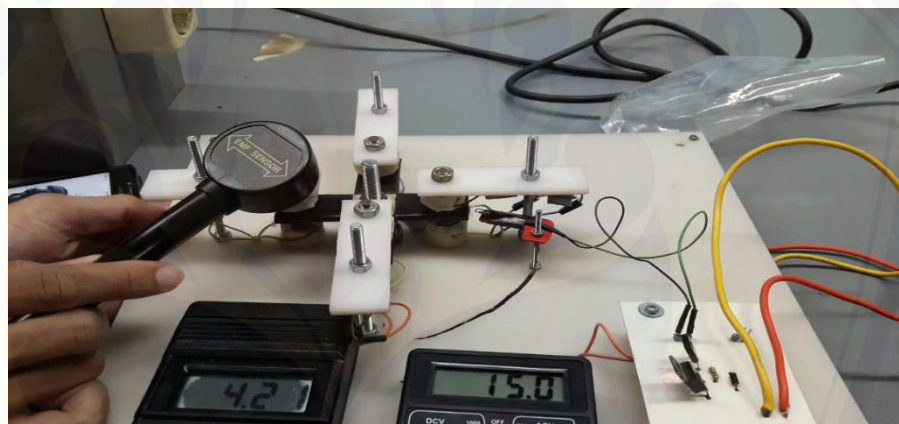


(c.) Tegangan 24 volt

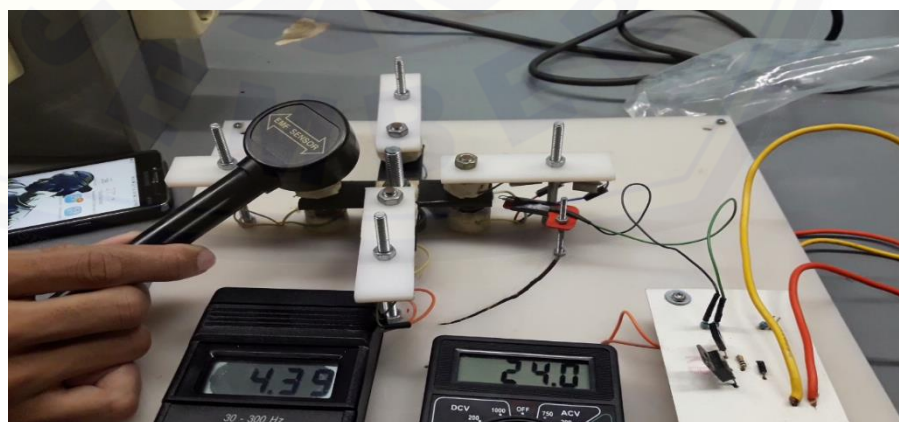
6. Jarak Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 15 mm) dan Pengukuran Kuat Medan Magnet



(a.) Tegangan 6 volt

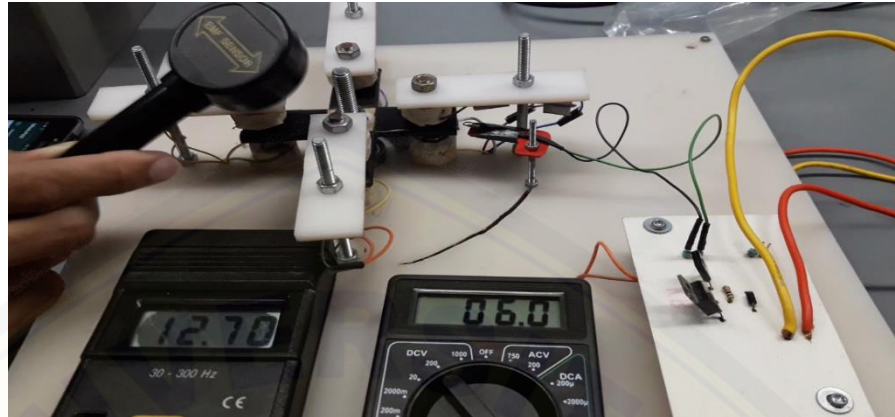


(b.) Tegangan 15 volt

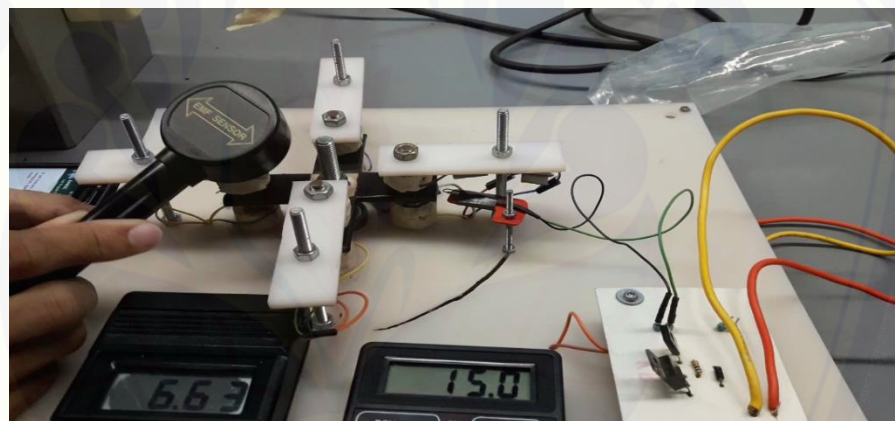


(c.) Tegangan 24 volt

7. Jarak Magnet Dengan Kutub (Atas 5 mm – Bawah 20 mm) dan Pengukuran Kuat Medan Magnet



(a.) Tegangan 6 volt



(b.) Tegangan 15 volt



(c.) Tegangan 24 volt