



TUGAS AKHIR - TM 091486

**Perancangan dan Unjuk Kerja
*Axial Flux Permanent Magnet
Coreless Brushless DC Motor***

Hudha Rencana Panjaitan Sakti Wengi
2108 100 149

Dosen Pembimbing :
Dr. M. NUR YUNIARTO

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TM 091486

Desain and Performance Test Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor

**Hudha Rencana Panjaitan Sakti Wengi
2108 100 149**

**Student Advisor :
Dr. M. NUR YUNIARTO**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Industrial Faculty of Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014**

Perancangan dan Uji Performa
Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless
Direct Current (DC) Motor

Nama Mahasiswa : Hudha Rencana Panjaitan Sakti Wengi
NRP : 2108 100 149
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS Dosen
Pembimbing : Dr. Muhammad Nur Yuniarto

Abstrak

Sejak tahun 1980-an konsep baru motor listrik telah banyak berkembang. Isu pemanasan global dan penghematan penggunaan Bahan Bakar Minyak (BBM) merupakan isu pendongkrak berkembangnya teknologi motor listrik. Motor DC konvensional sudah dikenal efisien dan bebas polusi, namun masih memiliki kekurangan yang perlu diperbaiki. Maka diperlukan pengembangan maupun perancangan motor listrik baru untuk mendapatkan performa motor listrik yang lebih baik.

Pada motor listrik DC konvensional sistem transmisi listriknya membutuhkan cincin komutator berupa sikat (brushed) terbuat dari arang (carbon). Brushed tersebut memerlukan penggantian berkala untuk umur pemakaian tertentu. Kekurangan lainnya pada jangkar motor DC brushed 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. Demikian dengan motor DC brushless radial fluks, meskipun sudah beroperasi tanpa cincin komutator, pada motor DC brushless radial fluks masih terjadi hambatan cogging karena penggunaan core armature feromagnetik untuk mengatur arah

fluks magnetik dari lilitan. Serta penggunaan core armature menyebabkan motor listrik lebih berat.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dalam tugas akhir ini akan dirancang sebuah motor DC listrik brushless dengan arah fluks axial. Karena 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 dengan model paralel. Dengan sistem hubungan paralel ini diharapkan motor listrik yang dirancang akan memiliki perbandingan power to weight yang lebih baik dari motor listrik DC brushless konvensional.

Keywords: Brushless DC Motor , Permanent Magnet tentrem Flux Brushless DC Motor , tentrem - Field Permanent Magnet Brushless DC Motors , Brushless DC Motor Coreless .

Desain and Performance Test Axial Flux PM Coreless Brushless DC Motor

Student Name : Hudha Rencana Panjaitan Sakti Wengi
NRP : 2108 100 149
Departement : Mechanical Engineering FTI - ITS
Supervisor : Dr. Muhammad Nur Yuniarto.

Abstract

Since the late 1980s a new concept electric motor has a lot of growing . The issue of global warming and saving the use of fuel oil is an issue of growing technological electric motor. Conventional DC motors are well known efficient and pollution-free , but still has shortcomings that need to be fixed . It would require the development and design of new electric motors for performance electric motors better.

A conventional DC motor require a commutator ring brush made of charcoal (carbon) for electric transmission systems. Brushed require periodic replacement for the particular service life . Other deficiencies in the anchor brushed DC motor must ferromagnetic metal to regulate the magnetic flux. This causes the cogging torque occurs that inhibits motor rotation, due to attractive forces between the anchor (rotor) and a magnet which acts as a stator . Similarly, the radial flux brushless DC motor, even though it operates without a commutator ring, the radial flux brushless DC motor congging barriers still occur due to the use of a ferromagnetic armature core to set the direction of the magnetic flux of the coil . And the use of core electrical motor armature causing more severe .

To overcome these problems, in this thesis will be designed an electric brushless DC motor with axial flux direction. Because the electric motor with axial magnetic flux can be



designed without the armature (coreless). So that barriers can be eliminated and the cogging lighter. An addition to this will facilitate the design of axial electric motor is connected to the parallel model. With a system of parallel connections is expected that the electric motor is designed to have a power to weight ratio better than conventional brushless DC electric motor.

Keywords: Brushless DC Motor , Permanent Magnet tentrem Flux Brushless DC Motor , tentrem - Field Permanent Magnet Brushless DC Motors , Brushless DC Motor Coreless .

Perancangan dan Uji Performa Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Manufaktur
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Hudha Rencana PSW

2108 100 149

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. **Dr. Muhammad Nur Yuniarto** (Pembimbing)
2. **Dr.Eng. Sutikno, ST., MT.** (Penguji I)
3. **M.Khoirul Effendi, ST, Msc** (Penguji II)
4. **Arif Wahyudi ST, MT PhD** (Penguji III)

SURABAYA
JANUARI, 2014

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis curahkan sepenuhnya kepada Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya tugas akhir ini dapat terselesaikan. Penulis sangat menyadari bahwa keberhasilan dalam penulisan tugas akhir ini tak lepas dari dukungan dan bantuan berbagai pihak. Melalui kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah banyak membantu dan mendukung baik secara moril maupun materil dalam proses penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Dr.Muhammad Nur Yuniarto, selaku dosen pembimbing tugas akhir dan sebagai orang tua, motivator, dan ilmu-ilmunya yang sangat bermanfaat. Terima kasih atas kesabarannya dan semua selama kuliah.
2. Bapak saya Raswin dan Ibu saya Warti, Adik Titis dan Dyah, serta keluarga besar yang selalu terus memberikan doa dan dukungannya.
3. Bapak Dr.Eng. Sutikno, ST., MT., Bapak Arief Wahyudi, ST.,MT., PhD., dan Bapak M.Khoirul Effendi, ST., Msc.eng, selaku dosen penguji tugas akhir penulis, terima kasih atas saran-saran yang telah diberikan.
4. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Mesin ITS yang telah memberikan ilmu dan teladan selama penulis menempuh kuliah.
5. Rekan satu tim tugas akhir penulis, Timson ak Andika kangen band yang selalu memberikan dukungan dan kerja sama dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
6. Mas Welly, Mas Kawur, Mas Gogon, Mas Mad, Mas Edin, Mas Koprak, Mas Skubleh, mas Keyped, mas Ucup terima kasih atas ilmu, saran, dan motivasi yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Sahabat penulis Abeng, Jembling, Hanif, Polo, bapink, CeTe, Ketek, Angop, Buntal, Tio, Kewan, Made segenap kru teman

malam minggu terima kasih atas cerita dan motivasinya yang selalu memberikan inspirasi dan semangat penulis untuk selalu menjadi lebih maju.

8. Kawan-kawan di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin Toni, Tito, P-man, Eka, Grangsang, Itang, Eka, faruq, itang, Tegar, Ratih, Botol, Cemet, Pentil, Alam, Bantets Geng, Ateng serta anak-anak baru yang saya tidak tahu namanya yang selalu menginspirasi untuk berjuang tanpa kenal lelah.
9. Teman-teman lab. Industrial system Automation, Husen, squidwort, Pentol, dan Kevin terima kasih atas bantuan dan dukungannya.
10. Seluruh civitas akademik dan karyawan jurusan Teknik Mesin ITS.
11. Semua pihak yang lupa disebutkan oleh penulis.

Penulis menyadari masih banyak kekurangannya dalam penyusunan tugas akhir ini, oleh karena itu saran dan masukan dari semua pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Surabaya, Januari 2013

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Tugas Akhir	3
1.5. Manfaat Penulisan	3
BAB II DASAR TEORI	5
2.1 Pendahuluan	5
2.2 Konstruksi Motor DC Brushless	6
2.3 Bagian-Bagian Brushless DC Motor	10
2.3.1 Stator	10
2.3.2 Rotor	10
2.3.3 Hall Sensor	11
2.3.4 Phase Commutation	13

2.4 Prinsip Kerja Rangkaian Kontrol Motor DC Brushless Tiga Fasa	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Umum	17
3.2. Peralatan Penelitian	18
3.3. Perancangan Axial Brushless DC Motor	19
3.3.1 Basic Study Literature	19
3.3.2 Motor Design	19
3.3.2.1 Mechanical Design	19
3.3.2.2 Synchronization control	22
3.4. Pengujian Unjuk Kerja <i>Axial Flux PM Coreless Brushless DC Motor</i>	23
3.5. Analisa an Kesimpulan	25
BAB IV RANCANG BANGUN AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET CORELESS BRUSHLESS DIRECT CURENT (DC) MOTOR	
4.1. Penentuan Spesifikasi Motor	27
4.1.1 Perhitungan Teoritis Daya	27
4.1.2 Inisialisasi Awal Dimensi motor	30
4.2 Proses Pembuatan Motor	32
4.2.1 Proses Desain	32
4.2.2 Pembuatan stator	34
4.2.3 Pembuatan rotor	36
4.2.4 Proses Assembly	36
BAB V ANALISA DATA UNJUK KERJA AXIAL FLUX PM CORELESS BRUSHLESS DC MOTOR	
	39

5.1 Contoh Perhitungan Unjuk Kerja <i>Axial Flux Coreless Brushless DC Motor</i>	39
1. Daya motor	39
2. Torsi	41
3. Efisiensi Motor	41
5.2 Analisa Unjuk Kerja <i>Axial Flux Coreless Brushless DC Motor</i>	42
5.2.1 Pengukuran Parameter Motor	42
5.2.1.1 Penyusunan Alat Untuk Pengujian.....	42
5.2.1.2 Pengukuran Tegangan dan Arus Motor	43
5.2.1.3 Pengukuran Daya Output Efektif Maksimum Motor	46
5.2.2 Interpolasi Data Pengujian Pengukuran Tegangan, Arus Motor dan Daya Output Efektif Maksimum Motor	48
5.3. Kurva Karakteristik Torsi vs Kecepatan <i>Axial Flux Coreless Brushless DC Motor</i>	50
5.3.1 Kurva Karakteristik Torsi vs Kecepatan <i>Axial Flux Coreless Brushless DC Motor</i> Hasil Eksperimen	50
5.3.2 Kurva Karakteristik Torsi dan Daya <i>Axial Flux Coreless Brushless DC Motor</i> Hasil Perhitungan Teoris vs Hasil Eksperimen.....	51
5.4 Kurva Karakteristik Torsi Vs Kecepatan <i>Axial Flux Coreless Brushless DC Motor</i> dengan Pembatasan Torsi Maksimum untuk Pemakaian Aman pada Aplikasi Umum.....	53
1. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 6 Nm.....	53

2. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 7 Nm.....	55
3. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 8 Nm.....	57
4. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 9 Nm.....	59
5. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 10 Nm.....	61
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
6.1. Kesimpulan.....	65
6.2. Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....	69
RIWAYAT PENULIS.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Brushless DC Motor.....	1
Gambar 2.1 Klasifikasi dan Jenis Motor Listrik.....	5
Gambar 2.2 Konstruksi Silindris (a) Outside Rotor (b) Inside Rotor.....	6
Gambar 2.3 Konstruksi Axial Flux PM Motor: (a) Stator dan Rotor Tunggal Tunggal (b) Stator dan Rotor Ganda.....	6
Gambar 2.4 The coreless axial flux motor design.....	7
Gambar 2.5 permanen magnet dengan uniform air gap dan nonuniform air gap.....	7
Gambar 2.6 Torsi hambatan cogging position minimum dan position torsi cogging maximum.....	8
Gambar 2.7 Hambatan cogging pada uniform air gap dan nonuniform air gap.....	8
Gambar 2.8 Konfigurasi Listrik Stator (Tiga Fase, Tiga Kumparan).....	9
Gambar 2.9 Tiga Kumparan Stator Tiga Fase, Rotor Motor DC.....	10
Gambar 2.10 Sensor Hall Sensor.....	12
Gambar 2.11 Logic Sederhana Komutasi pada 3 Phase.....	13
Gambar 2.12 Rangkaian Kontrol Sederhana Komutasi pada 3 Phase.....	13
Gambar 2.13 6 Posisi Urutan Gerak Motor DC Brushless 3 Fasa.....	15
Gambar 3.1 Flowchart Perancangan, pembuatan dan pengujian Axial Brushless DC Motor.....	18

Gambar 3.2 Gambar potongan rancangan Axial Brushless DC Motor.....	21
Gambar 3.3 Gambar Ukuran dasar Axial Brushless DC Motor yang umum di pasaran.....	22
Gambar 3.4 Hasil pembacaan signal sensor hall posisi 1, hall posisi 2, dan hall posisi 3.....	23
Gambar 3.5 Hasil pembacaan signal sensor hall posisi terhadap komutasi fase U, V, & W.....	23
Gambar 4.1. Grafik sebaran Daya, dan Torsi vs Rpm Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor secara teoritis.....	30
Gambar 4.2 Penampang Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor.....	31
Gambar 4.3 Gambar Susunan Desain Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor.....	32
Gambar 4.4 Gambar Part Velg Hub Motor.....	33
Gambar 4.5 Gambar Bagian Poros dan Stator Motor.....	33
Gambar 4.6 Gambar Part Casing dan Pattern Magnet Rotor.....	34
Gambar 4.7 Alat Untuk Menggulung Kumparan dan Kumparan Tanpa Armature (Coreless).....	35
Gambar 4.8 Stator Axial Coreless Brushless DC Motor dan Kumparan.....	35
Gambar 4.9 Stator dan Rotor Stator Axial Coreless Brushless DC Motor yang disassembly.....	36
Gambar 4.10 Axial Coreless Brushless DC Motor hasil rancangan.....	37
Gambar 5.1 Grafik efisiensi generator.....	40
Gambar 5.2 generator STC-3.....	40

Gambar 5.3 Penyusunan Alat Untuk Pengujian Axial Flux Coreless Brushless DC Motor.....	43
Gambar 5.4 Axial Flux Coreless Brushless DC Motor dengan pengujian breaking.....	44
Gambar 5.5 Axial Flux Coreless Brushless DC Motor yang dikopel pada generator.....	46
Gambar 5.6 Grafik Karakteristik Torsi Vs Kecepatan Axial Flux Coreless Brushless DC Motor.....	50
Gambar 5.7 Grafik Perbandingan P Teoritis dan T Teoritis vs P Eksperimen dan T Eksperimen Hasil Rancang Bangun Axial Coreless Brushless DC Motor.....	52
Gambar 5.8 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 6 Nm.....	55
Gambar 5.9 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 7 Nm.....	58
Gambar 5.10 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 8 Nm.....	60
Gambar 5.11 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 9 Nm.....	62
Gambar 5.12 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 10 Nm.....	64

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

DAFTAR SIMBOL

P_{in}	: daya input (watt)
P_{out}	: daya output (watt)
N_{ph}	: Jumlah fase
N_m	: Jumlah kutub
N_{spp}	: Jumlah slot / kutub / fase
K_w	: koefisien untuk lilitan
B_g	: kerapatan fluks pada airgap
I_s	: arus terpakai (amper)
R_0	: radius magnet bagian luar (m)
R_i	: radius magnet bagian dalam (m)
V_{in}	: tegangan masuk (volt)
I_{in}	: arus terpakai (ampere)
t	: waktu (sekon)
T_l	: torsi yang dihasilkan (Nm)
ω	: kecepatan sudut (rad/s)
P_{rot}	: daya output dari putaran motor (watt)
$V_{out\ generator}$: tegangan keluar dari generator (volt)
$I_{out\ generator}$: Arus keluar dari generator (amper)
$P_{out\ generator}$: daya yang dibangkitkan generator (watt)
$P_{out\ efektif}$: daya output dari putaran motor (watt)

eff_{motor} : efisiensi motor listrik (%)

$eff_{generator}$: efisiensi generator (%)

$eff_{mechanical}$: efisiensi sistem mekanikal (%)

$eff_{electrical}$: efisiensi elektrikal (%)

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data sebaran Daya dan Torsi teoritis	29
Tabel 5.1 Hasil Pengujian Axial Coreless Brushless DC Motor	45
Tabel 5.2 Hasil Pengujian Daya Axial Coreless Brushless DC Motor	47
Tabel 5.3 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor	49
Tabel 5.4 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Tosi Maksimum 6 Nm.....	54
Tabel 5.5 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Tosi Maksimum 7 Nm.....	57
Tabel 5.6 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Tosi Maksimum 8 Nm.....	59
Tabel 5.7 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Tosi Maksimum 9 Nm.....	61
Tabel 5.8 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Tosi Maksimum 10 Nm.....	63
Tabel 6.1 Pengaruh Batasan Output Torsi Terhadap Daya Maksimum Dan Efisiensi	65

P

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Sejak tahun 1980-an konsep baru tentang permanen magnet *brushless* motor telah dikembangkan. Isu penghematan penggunaan Bahan Bakar Minyak (BBM) pada sektor transportasi merupakan isu global pendongkrak berkembangnya teknologi motor listrik. Konvensional DC motor sudah dikenal sangat efisien, bagaimanapun kelemahannya adalah membutuhkan komutator dan sikat yang tergantung pada pemakaian dan memerlukan pemeliharaan. Kekurangan tersebut dapat diatasi *DC motor brushless* yang beroperasi tanpa transmisi mekanik.



Gambar 1.1 *Brushless DC Motor*.

(www.digikey.com)

Brushless DC motor gambar 1.1 adalah motor magnet permanen di mana fungsi komutator dan sikat dilaksanakan oleh solid state switch. *Brushless DC motor* dikenal tidak hanya oleh efisiensi yang tinggi, tetapi juga oleh mereka tidak pemeliharaan. Sebagai wujud peran serta dalam melaksanakan pengembangan bidang energi untuk mengatasi krisis energi khususnya migas yang sedang dihadapi masyarakat Indonesia, salah satu program

pengembangan *Axial Brushless DC Motor* untuk *prototype* mobil listrik sebagai sarana pengembangan mobil listrik nasional. Serta untuk *prototype* mobil listrik Sapuangin Electric Zero Emision Vehicle (SAE_ZEV) akan diikuti pada kompetisi Mobil Irit tingkat Internasional Shell Eco Marathon Asia 2014 di Malaysia ataupun lomba tingkat Nasional Indonesia Eco Marathon Challenge.

Sudah diketahui bahwa *Brushless DC motor* memiliki kelebihan-kelebihan yang jauh bila dibandingkan internal combustion engine pada umumnya, diantaranya:

- Menghasilkan torsi yang besar pada rpm yang rendah.
- Kebisingan dan vibrasinya rendah. Jauh bila di bandingkan internal combustion engine pada umumnya.
- Memiliki efisiensi yang sangat tinggi dalam merubah daya listrik ke tenaga gerak, sanggup memiliki efisiensi lebih besar dari 90%. Dan banyak lainnya

Namun disisi lain *Brushless DC Motor* konvensional yang stukturnya masih radial memiliki kekurangan namun masih memiliki potensi untuk ditingkatkan performanya, diantaranya:

- Congging yang terjadi *Brushless DC Motor*.
- Dengan sistem join paralel seharusnya sanggup menghasilkan daya yang besar dengan dimensi motor yang lebih kecil.

Dari sisi itulah dirancang motor listrik *Axial Flux* dengan *Brushless DC Motor* dengan permanen magnet dan *coreless* armature. Karena tanpa penggunaan *armature* pada *Axial Brushless DC Motor* seharusnya tidak akan menghasilkan hambatan *cogging* saat motor listrik berputar pada kondisi mati. Dan dengan bentuk *axial* akan lebih mudah diparalel untuk menghasilkan daya yang besar dengan dimensi motor yg relatif kecil.

1.2. Rumusan Masalah

Masalah yang ada dalam tugas akhir ini adalah bagaimana untuk memperbaiki kekurangan dari *brushless DC motor* konvensional agar mendapatkan performa yang lebih baik:

1. Bagaimana menghilangkan fenomena *cogging* yang mengurangi performa *Brushless DC Motor*.
2. Bagaimana cara untuk meningkatkan potensi output power to weight ratio yang dimiliki *Axial Brushless DC Motor* dibandingkan *Brushless DC Motor* konvensional.

1.3. Batasan Masalah

Dalam penelitian ini permasalahan dibatasi pada :

1. Perancangan *Axial Brushless DC Motor* dengan daya output 500 watt *coreless* dengan permanen magnet
2. Pengujian kinerja menggunakan dinamometer.

1.4. Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari perancangan dan pembuatan *Axial Flux PM Coreless Brushless DC Motor* ini adalah:

1. Merancang dan mewujudkan *Axial Flux PM Coreless Brushless DC Motor* dengan daya output 500 watt dan efisiensi diatas 80%
2. Peninjauan pembatasan torsi pada *Axial Flux PM Coreless Brushless DC Motor* untuk operasional motor listrik.

1.5. Manfaat Penulisan

Diharapkan dari hasil penelitian dan perancangan *Axial Brushless DC Motor* ini adalah:

- Memberikan informasi kepada masyarakat luas terkait tentang *Axial Brushless DC Motor*
- Mampu meningkatkan potensi dari *Axial Brushless DC Motor* dibandingkan *Brushless DC Motor* konvensional yang umumnya berstruktur radial.

- Sebagai acuan dari penelitian yang lebih lanjut.

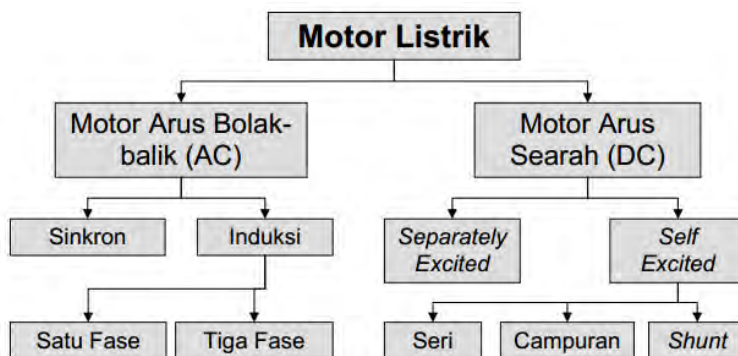
Selain itu mahasiswa dapat menerapkan secara langsung ilmu pengetahuan yang didapatkan dari bangku perkuliahan, dimana diharapkan nantinya dapat bermanfaat bagi diri sendiri khususnya dan masyarakat pada umumnya.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Pendahuluan

Motor listrik memiliki jenis yang bervariasi dalam perkembangannya. Secara garis besar motor listrik dibagi menjadi dua yaitu motor listrik dengan sumber daya arus AC dan sumber daya arus DC.



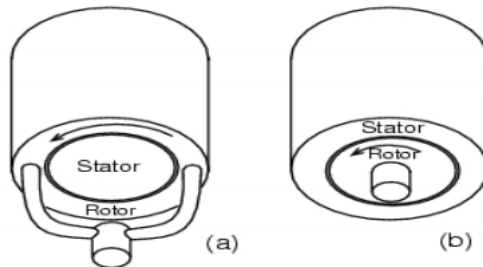
Gambar 2.1 Klasifikasi dan Jenis Motor Listrik
(www.energyefficiencyasia.org)

Pada gambar 2.1 Motor menjelaskan klasifikasi motor listrik. Motor listrik jenis AC menggunakan prinsip induksi pada langkah kerjanya, sehingga memiliki masalah pada saat starting. Berbeda halnya dengan motor DC. perkembangan motor DC diawali oleh Brushed DC motor.

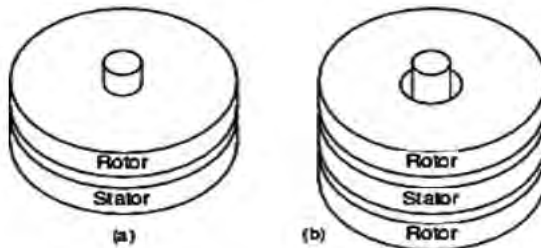
Brushed Motor DC yang menggunakan sikat untuk mengalirkan arus ke rotor sering menimbulkan masalah yaitu ausnya 'sikat' dan timbulnya electrical noise. Oleh karena itu motor DC tanpa sikat atau motor DC *brushless* dikembangkan yang mempunyai kelebihan yaitu : efisiensi tinggi, umur yang panjang, konsumsi energi yang kecil dan tidak menimbulkan electrical noise.

2.2 Konstruksi Motor DC Brushless

Bentuk konstruksi yang umum pada motor *DC brushless* ada dua buah yaitu silindris untuk radial brushless DC motor seperti pada gambar 2.2 atau *pancake* seperti pada gambar 2.3 adalah *axial flux permanent magnetic brushless DC motor*.



Gambar 2.2 Konstruksi Silindris (a) Outside Rotor (b) Inside Rotor



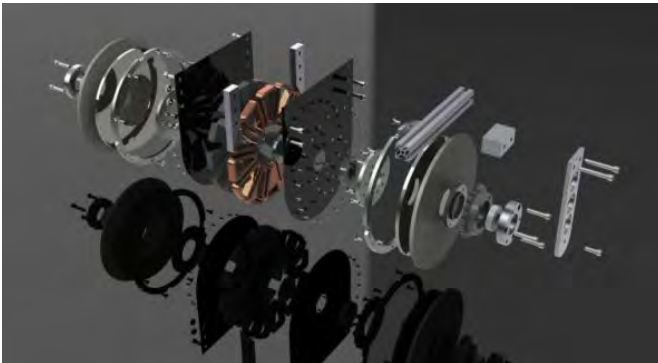
Gambar 2.3 Konstruksi *Axial Flux PM Motor*: (a) Stator dan Rotor Tunggal (b) Stator dan Rotor Ganda

(www.allaboutcircuits.com)

Axial flux brushless DC motor memiliki medan magnetik axial searah sumbu putarnya. Motor jenis *pancake* dengan dua buah rotor mempunyai torsi yang lebih tinggi karena mempunyai rotor pada kedua sisi rotor (gambar b). Sedangkan torsi rendah dengan satu stator dan satu rotor (gambar a) misalnya digunakan pada motor penggerak *floppy disk*.

Karakteristik dan keistimewaan dari desain *coreless axial flux BLDC* antara lain (Colton, 2002) :

- Perancangan stator motor listrik tanpa *armature (coreless)*, menekan biaya dalam pembuatan, dan proses pedesainan dan pembuatan lebih mudah.
- Tidak ada gaya magnetis aksial antara rotor dan stator (*no cogging*). Gaya tarik *axial* masih terjadi antara dua disk rotor, tetapi gaya tarik ini tidak berpengaruh terhadap stator. Sehingga memungkinkan untuk mendesain stator yang lebih tipis dan ringan.
- Putaran sangat halus walaupun kecepatan operasi (rpm) rendah. Karena tidak ada *segmen armature* pada stator menghilangkan hambatan *cogging* karena rotor-stator yang tarik menarik.
- Lebih fleksibel untuk pemasangan kawat dan kabel masuk. Kabel masuk dari sisi motor.

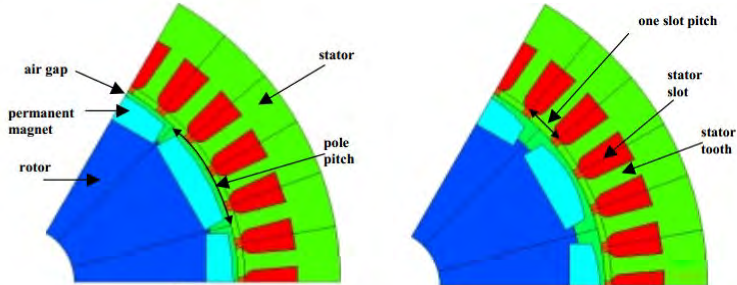


Gambar 2.4 *The coreless axial flux motor design*

(Colton, 2002)

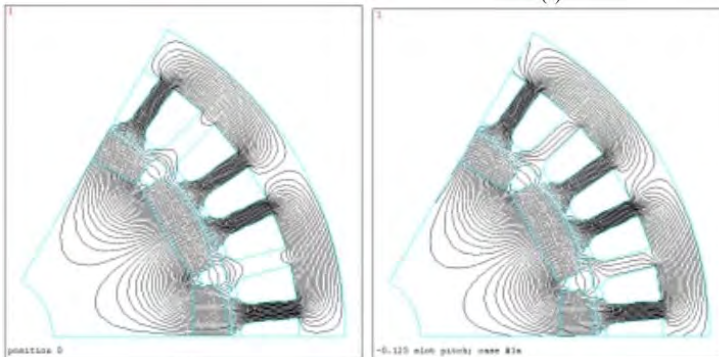
Pada lomba internasional seperti Shell Eco Marathon disuatu kondisi dibutuhkan mobil bergerak meluncur tanpa dorongan dari engine atau motor, di sisi inilah hambatan *cogging* sangat merugikan. Kerugian *cogging* yang terjadi pada stator dan

rotor yang terjadi sangat dipengaruhi oleh perbedaan air gap (*Muljadi dan Green, 2002*).



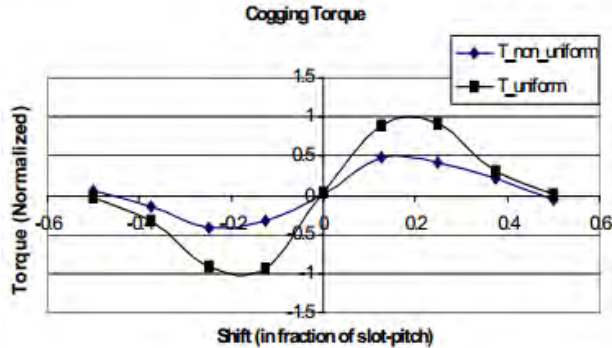
Gambar 2.5 permanen magnet dengan *uniform air gap and nonuniform air gap*

(*Muljadi dan Green, 2002*)



Gambar 2.6 *Minimum cogging torque position dan maximum cogging torque position*

(*Muljadi dan Green, 2002*)



Gambar 2.7 Cogging torque pada uniform air gap dan nonuniform air gap

(Muljadi dan Green, 2002)

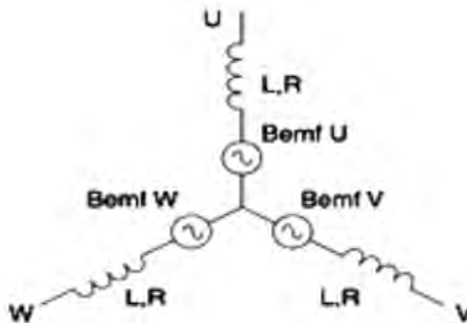
Hambatan *cogging* pada radial *flux* motor listrik dapat diminimalkan jika bentuk kutub magnet terbentuk seperti bentuk roti, sehingga menciptakan celah udara tidak seragam, seperti diilustrasikan dalam gambar 2.5 gambar 2.6. Pada gambar 2.7 nampak terjadi beban hambatan *cogging* maksimum pada saat posisi tertentu seperti pada gambar 2.3. Dengan membentuk kutub magnet tentunya juga membutuhkan biaya tambahan. Dari sisi itulah pengembangan motor listrik tanpa inti logam (*coreless*) sanggup menutupi kekurangan tersebut. Dan konstruksi *axial flux* dengan permanen magnet menjadi pilihan dalam pengembangan *coreless* motor karena memiliki keistimewaan seperti yang telah dibahas diatas,

2.3 Bagian-Bagian *Brushless DC Motor*

Brushless DC motor pada umumnya memiliki bagian-bagian utama pada konstruksinya antara lain :

2.3.1 Stator

Dasar sebuah stator tiga fasa motor *DC brushless* memiliki tiga gulungan. Kebanyakan motor *DC brushless* jumlah kumparan direplikasi untuk memenuhi karakteristik dari torsi yang akan di hasilkan.

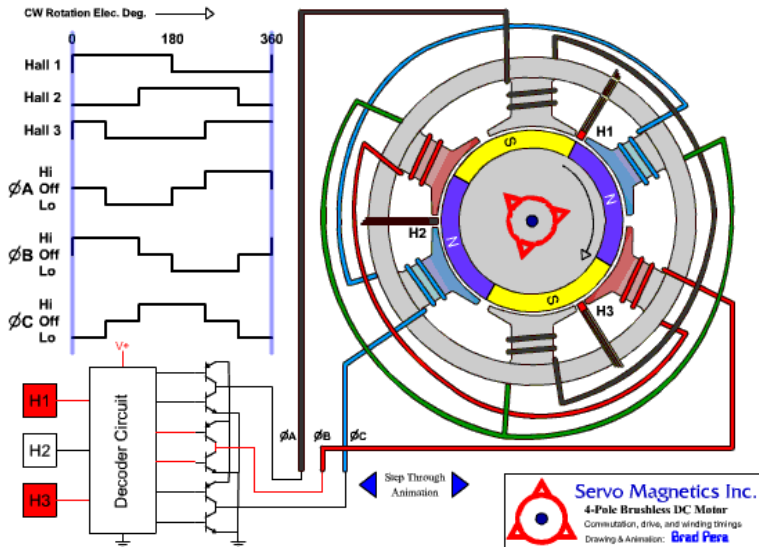


Gambar 2.8 Konfigurasi Listrik Stator (Tiga Tahap, Tiga Kumparan)

Gambar 2.8 menunjukkan skema listrik dari stator. Ini terdiri dari tiga kumparan masing-masing ada tiga unsur terhubung seri yaitu induktansi, resistansi dan satu gaya gerak listrik kembali.

2.3.2 Rotor

Rotor pada motor *DC brushless* terdiri dari beberapa magnet permanen. Jumlah kutub magnet di rotor juga mempengaruhi ukuran langkah dan torsi dari motor. Jumlah kutub yang banyak akan memberikan gerakan presisi dan torsi yang kecil. Magnet permanen terdiri dari 4, 5 bisa 8 pasang kutub.



Gambar 2.9 Tiga Kumparan Stator Tiga Fase, Rotor Motor DC Brushless dan Hall sensor

(www.open-sport.org)

Gambar 2.9 menunjukkan posisi rotor di deteksi dengan *solid state light emitter sensor*, piranti hall atau piranti lainnya. Sinyal feedback dari sensor dikembalikan ke unit kontrol akan meng-ON-kan unit transistor, kemudian akan diteruskan ke kumparan medan stator secara sekuensial. Biasanya untuk mendeteksi posisi sudut menggunakan hall sensor. Hall sensor untuk mendeteksi *magnitude* dan polaritas medan magnet.

2.3.3 Hall Sensor

Untuk estimasi posisi rotor, motor ini dilengkapi dengan tiga sensor hall yang ditempatkan dengan posisi tertentu, sebagaimana pada gambar 2.4. Dengan sensor ini ada 6 komutasi yang mungkin berbeda. Pergantian fase power supply tergantung pada nilai-nilai sensor hall dengan perubahan kumparan.



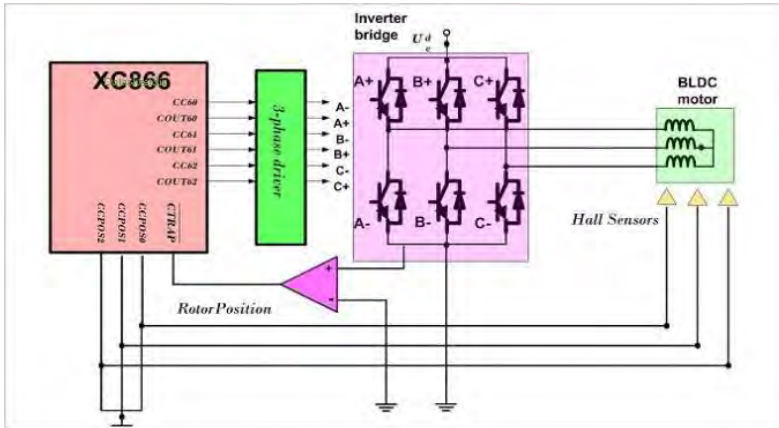
Gambar 2.10 Sensor Hall Sensor

(www.goedn.com)

Fungsi rangkaian kontrol pada motor DC *brushless* selain sebagai pengontrol perpindahan arus juga sebagai pengarah rotasi rotor. Oleh karena itu, controller membutuhkan beberapa cara untuk menentukan orientasi rotor. Beberapa rancangan efek sensor hall menggunakan rotary encoder untuk menentukan posisi rotor. Selain itu terdapat lagi EMF dalam kumparan undriven untuk menyimpulkan posisi rotor. Kontroler ini berisi 3 bi-directional output untuk mendorong daya pada motor DC ketinggian yang lebih tinggi, dengan dikendalikan oleh rangkaian logika. Pengendali sederhana menggunakan pembanding untuk menentukan kapan fase output harus maju, sementara pengendali modern menggunakan mikrokontroler untuk mengelola akselerasi, kontrol kecepatan dan menyempurnakan efisiensi. Sensor hall ini harus diletakkan sedekat mungkin dengan rotor magnet permanen untuk mendeteksi posisi kutub magnet pada rotor.

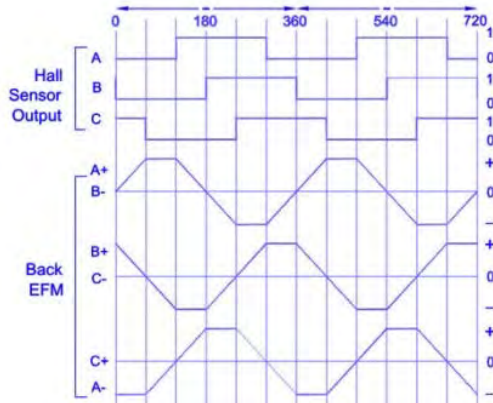
2.3.4 Phase Commutation

Fungsi komutasi dilakukan oleh beberapa sensor: optical encoder, magnetic encoder atau hall effect magnetic sensor. Dengan cara ini motor DC *brushless* menjadi kecil dan murah.



Gambar 2.11 Rangkaian Kontrol Sederhana Komutasi pada 3 Phase.

(www.digikey.com)



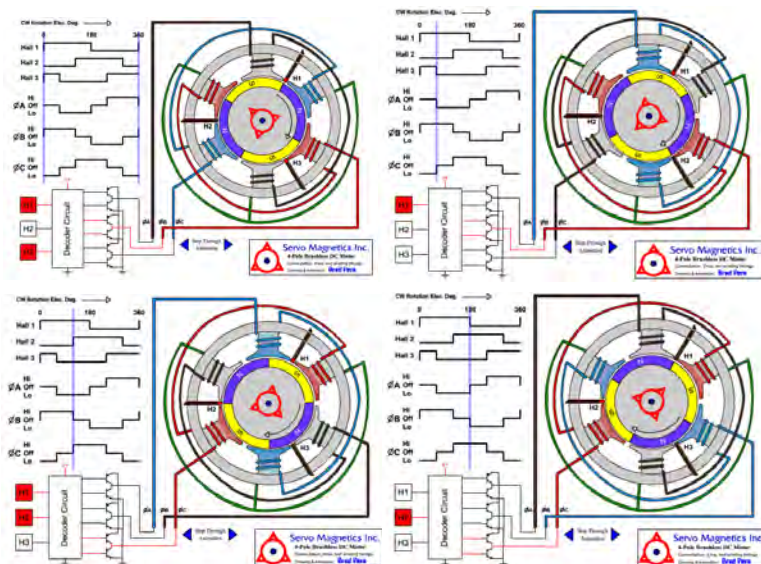
Gambar 2.12 Logic Sederhana Komutasi pada 3 Phase.

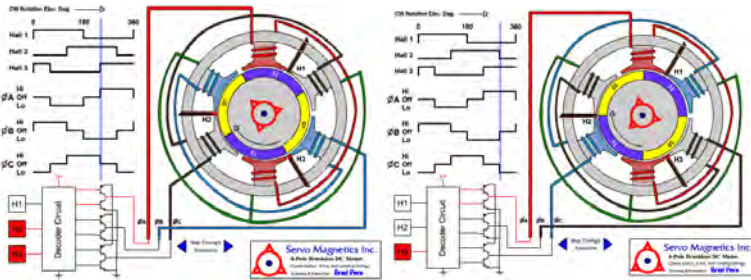
(www.instructables.com)

Pada gambar 2.11 menunjukkan skematis dari *hall sensor* dan gambar 2.12 menunjukkan *hall sensor* akan berfungsi memberikan sinyal digital akibat adanya medan magnetic yang tegak lurus terhadap sensor. Output hall akan akan dibaca oleh decoder. Dengan *logic* tertentu decoder akan mengatur *switching* transistor untuk mendapatkan pola bias yang tepat pada tiap phase.

2.4 Prinsip Kerja Rangkaian Kontrol Motor DC *Brushless* Tiga Fasa

Elemen utama motor *DC brushless* yang membedakannya dari motor DC konvensional adalah adanya rangkaian elektronik yang menggantikan kerja komutasi mekanisnya. Ada macam-macam rangkaian yang sering digunakan yaitu motor DC *brushless* tiga fasa-kutub tunggal, motor *DC brushless* tiga fasa-kutub ganda. Dengan memperhatikan motor DC *brushless* tiga fasa-kutub tunggal kita dapat dengan mudah memahami prinsip kerja dari *motor DC brushless*.





Gambar 2.13 6 Posisi Urutan Gerak Motor DC *Brushless* 3 Fasa Kutub Tunggal.

Pada gambar 2.13 dibawah ini menunjukkan bahwa menggunakan hall efek sensor sebagai penentu posisi. Tiga buah hall efek sensor H1, H2, H3 yang diletakkan pada ujung plat yang membentuk lingkaran dengan interval 120° secara bergantian akan terkena cahaya sesuai dengan urutan melalui shutter motor yang berputar dan dihubungkan dengan shaft motor. Pada gambar yang pertama, H2 mendeteksi flux magnetik kutup selatan dan decoder mengaktifkan B+ C-. Dalam kondisi ini kutub selatan yang terbentuk pada kutub utara pada stator B karena arus listrik yang mengalir menuju C dan kutub selatan terbentuk pada C sehingga bergerak searah arah jarum jam. Begitu seterusnya kutub rotor akan berjalan dari tanpa berhenti. Dengan mengulang proses pensaklaran sesuai urutan seperti terlihat pada gambar tersebut maka rotor permanent magnet akan berputar terus menerus. Kekuatan medan magnet menentukan kekuatan motor dan kecepatan motor. Dengan memvariasikan aliran arus melalui kumparan stator, kecepatan dan torsi motor dapat disesuaikan. Cara yang umum untuk mengontrol aliran arus adalah dengan mengontrol aliran arus rata-rata melalui kumparan dengan PWM (Pulse Width Modulation) yang mengatur tegangan rata-rata dan meningkatkan kecepatan.

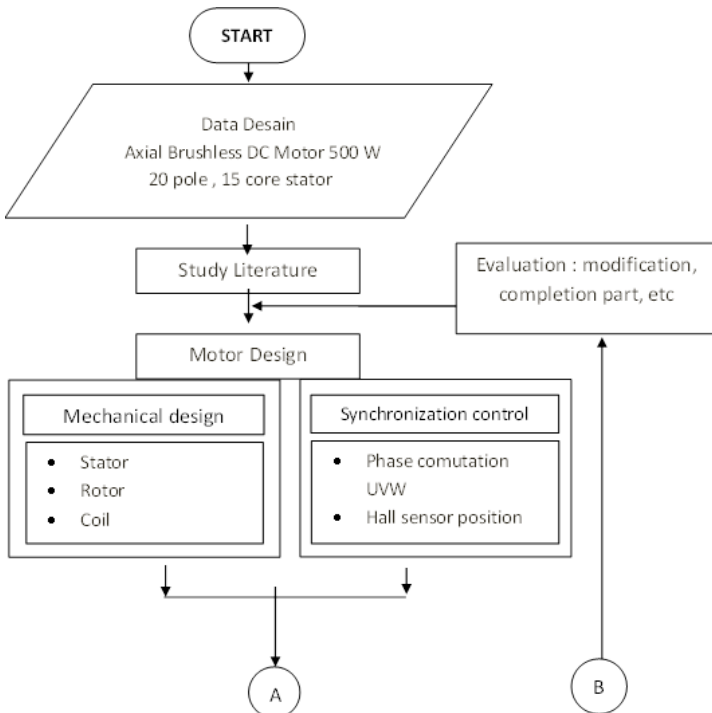
HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

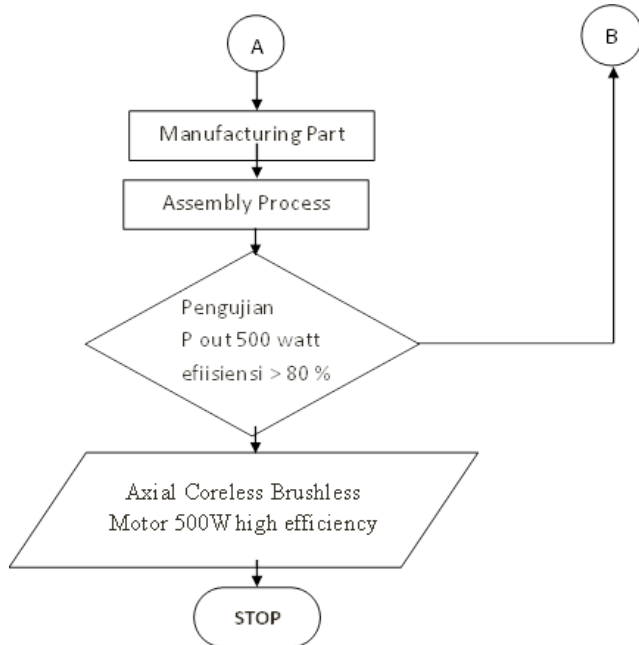
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Umum

Perancangan dan pembuatan *Axial Brushless DC Motor* membuat rancangan eksperimen terlebih dahulu. Rancangan eksperimen nantinya dilakukan suatu pengujian yang bertujuan untuk mendapatkan variabel-variabel input dari proses atau sistem sehingga didapatkan output yang optimal. Rancangan eksperimen dari penelitian ini dapat dilihat pada Diagram Alir berikut:





Gambar 3.1 Flowchart Perancangan, pembuatan dan pengujian *Axial Brushless DC Motor*

3.2. Peralatan Penelitian

Pada penelitian yang dilakukan, peralatan uji yang dipergunakan adalah sebagai berikut:

1. Joule meter :

- Merk : iquiteche joulemeter
- Range Operasi : 36V-100V

2. Dynamometer :

- Merk : Generator STC-03
- Dibuat : Cina
- Range Operasi : 3 KVA

3. Oscilloscope

- Merk : DsNano

- Tipe : Digital
- Produksi : Seed Studio
- Range : 10Hz – 1Mhz

3.3 Perancangan *Axial Brushless DC Motor*

Rancangan *Axial Brushless DC Motor* secara detail dari masing-masing tahapan sebagai berikut :

3.3.1 Basic Study Literature

Study literature merupakan penelusuran literatur yang bersumber dari buku, media, pakar ataupun dari hasil penelitian orang lain yang bertujuan sebagai dasar dan teori yang digunakan dalam melakukan perancangan.

3.3.2 Motor Design

Desain *Axial Brushless DC Motor* dua aspek yang jadi pertimbangan, yaitu dari segi *mechanical* konstruksinya dan sinkronisasi terhadap kontrolnya.

3.3.2.1 Mechanical Design

Perancangan konstruksi *Axial Brushless DC Motor* dengan stator tunggal dan rotor ganda di desain dengan sesuai dengan dimensi hub motor yang ada dipasaran agar lebih mudah aplikasinya.

Perhitungan daya output dengan menggunakan *basic equation* torsi motor listrik. Maka secara teoritis adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P &= T\omega_m = N_{ph}E_{ph}I_{ph} & \Rightarrow T &= \frac{P}{\omega_m} = \frac{N_{ph}E_{ph}I_{ph}}{\omega_m} \\
 &= N_{ph}N_mN_{spp}K_wB_gn_sI_{ph}(R_o^2 - R_i^2) \\
 &= N_{ph}N_mN_{spp}K_wB_gI_s(R_o^2 - R_i^2)
 \end{aligned}$$

Rasio optimum radius luar magnet terhadap radius dalam magnet adalah $\sqrt{3}$, maka didapatkan persamaan torsi output sebagai berikut:

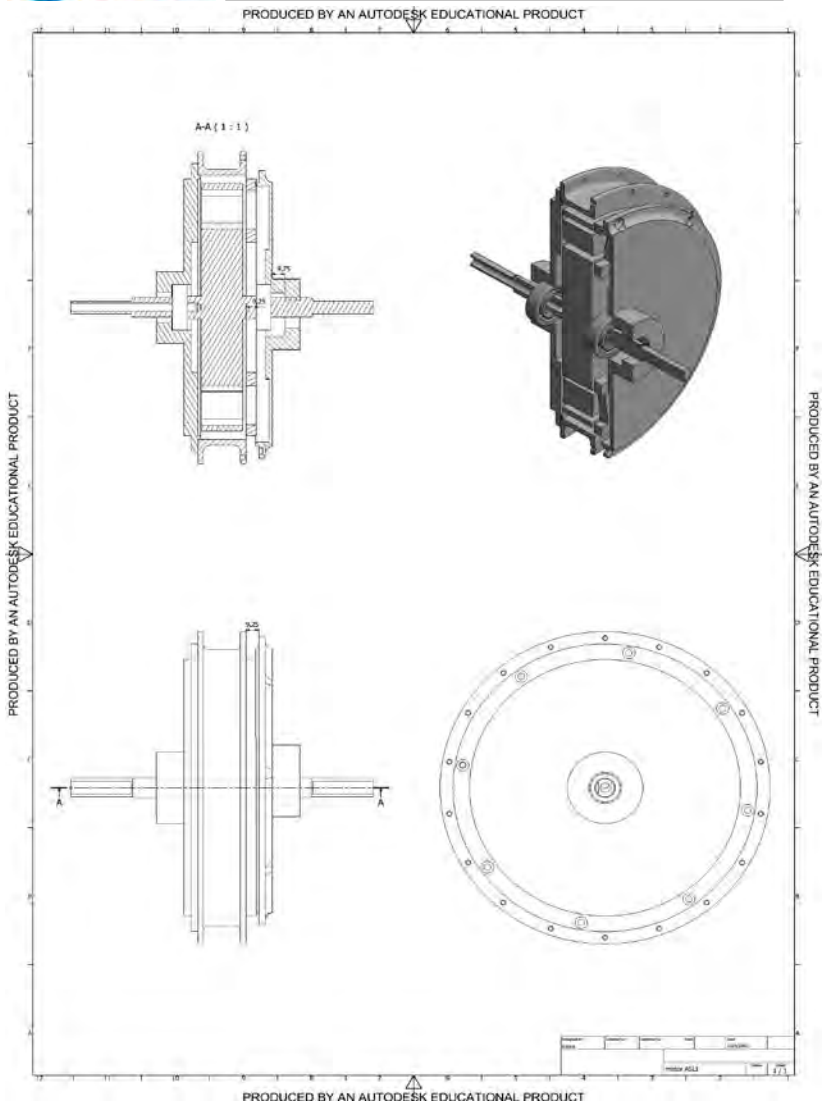
$$T = N_{ph}N_mN_{spp}K_wB_gI_s(R_o^2 - R_i^2/3)$$

$$= \frac{2N_{ph}N_mN_{spp}K_wB_gI_sR_o^2}{3} \Rightarrow R_o = \sqrt{\frac{3T}{2N_{ph}N_mN_{spp}K_wB_gI_s}}$$

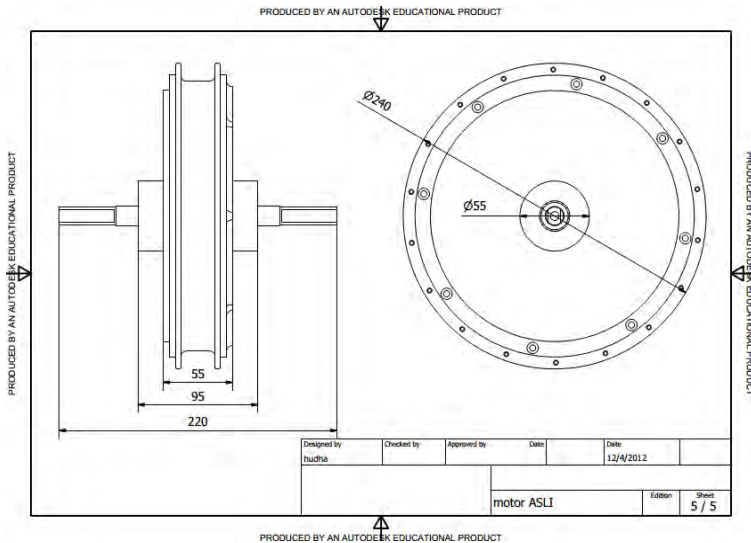
dimana:

- P = Daya output Axial Brushless DC
- T = Torsi output Axial Brushless DC
- N_{ph} = Jumlah fase
- N_m = Jumlah kutub
- N_{spp} = Jumlah slot / kutub / fase
- K_w = koefisien untuk lilitan
- B_g = kerapatan fluks pada airgap
- I_s = arus terpakai
- R_o = radius magnet bagian luar
- R_i = radius magnet bagian dalam

Dengan mengetahui radius luar, R_o radius bagian dalam dapat dihitung. Dimana nilai $N_m N_{spp} N_g I_s$ adalah konstan. N_m adalah jumlah kutub, N_g adalah besarnya air gap, N_{spp} adalah jumlah slot / kutub / fase and K_w faktor untuk lilitan, I_s rapat arus B_g kerapatan fluks airgap. Pada gambar 3.1 dan gambar 3.2 ditunjukkan gambar rancangan dasar *Axial Coreless Brushless DC Motor* yang digunakan untuk hub motor.



Gambar 3.2 Gambar potongan rancangan *Axial Coreless Brushless DC Motor*



Gambar 3.3 Gambar Ukuran dasar *Axial Coreless Brushless DC Motor* yang umum di pasaran

3.3.2.2 Synchronization control

Sinkronisasi terhadap kontroler yang umum ada dipasaran membutuhkan pembacaan *hall sensor*nya agar posisi sensor dapat diprediksi, dan urutan komutasi tiap fase harus diketahui cara kerjanya agar motor dapat beroperasi secara optimal selaras dengan segala jenis control yang umum di pasaran.



Gambar 3.4 Hasil pembacaan signal *sensor hall* posisi 1, *hall* posisi 2, dan *hall* posisi 3



Gambar 3.5 Hasil pembacaan *signal sensor hall* posisi terhadap komutasi fase U, V, & W

3.4. Pengujian Unjuk kerja *Axial Flux PM Coreless Brushless DC Motor*

Pengujian untuk memperoleh daya maksimum motor listrik pada tiap variasi *rpm* 600, 800, 1000, dan 1200. Pengujian motor listrik dilakukan dengan jalan pemasangan Joulemeter untuk mengetahui berapa konsumsi daya listriknya dan menggunakan Dynotest untuk mengetahui nilai output daya

yang didapatkan dan dengan demikian didapatkan nilai efisiensi *Axial Flux PM Coreless Brushless DC Motor* ini.

Tahapan-tahapan pengujian yang dilakukan adalah :

1. Persiapan Pengujian

- 1) Menaikkan motor listrik di atas mesin *dynamometer* .
- 2) Memposisikan dan mengunci motor listrik untuk kondisi pengujian.
- 3) Menyalakan Joulemeter.
- 4) Memasang indikator RPM.

2. Pengujian

- Mulai bukakan throttle penuh dan mengatur beban sampai mendapatkan yang rpm diinginkan.
- Pada setiap putaran motorlistrik yang sudah stabil dilakukan pencatatan data pada *dynamometer* sebagai berikut :
 1. Putaran poros (rpm).
 2. Torsi.
 3. Daya (tegangan dan arus).

3. Akhir Pengujian

- Putaran motor diturunkan perlahan sampai putaran 0 rpm.
- Power motor dimatikan

4. Perhitungan Performa *Axial Flux PM Coreless Brushless DC*

Efisiensi motor dihitung dengan persamaan :

$$Eff \% = \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \cdot 100 \%$$

dimana: $P_{in} = \frac{1}{t} \int_0^t (V \cdot I) dt$

$$= \frac{V}{t} \int_0^t I(t) dt$$

$$= V I$$

$$P_{out} = \frac{1}{t} \int_0^t (T_l \cdot \omega) dt$$

Keterangan:

- P_{in} : daya input (watt)
- P_{out} : daya output (watt)
- V : tegangan masuk (volt)
- I : arus terpakai (ampere)
- T : waktu (sekon)
- T_l : torsi yang dihasilkan (Nm)
- ω : kecepatan sudut (rad/s)

3.5. Analisa an Kesimpulan

Setelah d ilakukan p engujian, ke mudian d ilakukan analisa dan pembahasan dan d iambil kesimpulan mengenai kemampuan *Axial Flux PM Coreless Brushless DC Motor* ini.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB IV

RANCANG BANGUN AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET CORELESS BRUSHLESS DIRECT CURRENT (DC) MOTOR

4.1. Penentuan Spesifikasi Motor

Untuk merancang sebuah motor *Axial Coreless Brushless DC Motor*, langkah pertama adalah menentukan parameter motor sebagai target yang ingin dicapai. Berikut parameter motor yang akan dibuat :

- Daya = 500 watt
- Tegangan operasional = 48 Volt
- Jumlah fasa = 3
- Faktor daya (estimasi) = 0,866
- Efisiensi (estimasi) = 0,9

Dari data target di atas kita bisa menghitung kebutuhan spesifikasi pendukungnya, baik secara mekanik maupun elektrik.

4.1.1 Perhitungan Teoritis Daya

Perhitungan daya input *Axial Coreless Brushless DC Motor* adalah daya konsumsi dari motor listrik yang melibatkan arus konsumsi motor listrik dan tegangan dari baterai. Maka secara teoritis adalah sebagai berikut :

1. Perhitungan Teoritis Daya Input

$$P_{input} = V \cdot I = 500 \text{ watt}$$

Karena tegangan operasional yang dipakai adalah 48 volt, maka arus yang dipakai adalah $500 \text{ watt} / 48 \text{ volt} = 10.41 \text{ ampere}$.

2. Perhitungan Teoritis Daya Output dan Torsi

Perhitungan daya output dengan menggunakan basic equation torsi motor listrik. Maka secara teoritis adalah sebagai berikut :

$$P_{input} = T\omega_m = N_{ph}E_{ph}I_{ph}$$

$$\begin{aligned}
 &= N_{ph} N_m N_{spp} K_w B_g n_s I_{ph} (R_0^2 - R_i^2) \\
 &= N_{ph} N_m N_{spp} K_w B_g I_s (R_0^2 - R_i^2) \\
 &= 3 \times 40 \times 5 \times 7.56213 \times 1.3 \times 10.41 \times 0.09^2 - 0.06^2 \\
 &= 485.8373086 \text{ watt}
 \end{aligned}$$

Untuk mencari torsi maksimum motor listrik, parameter yang kita perlukan adalah batasan kecepatan putar maksimum pada motor listrik. Diasumsikan motor memiliki putaran tanpa beban sampai pada 1000 rpm, maka torsi maksimumnya sebagaimana basic equation torsi motor listrik maka secara teoritis torsi yang dihasilkan adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 T &= 2 \frac{P_{rot}}{\frac{1}{2}\omega_m} T_s \\
 &= 2 \frac{485.83}{0.5 \times 104.719} \\
 &= 18.55733818 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

3. Perhitungan Efisiensi

Efisiensi *Axial Coreless Brushless DC Motor* hanya dicari pada pada titik daya optimum. Karena secara teoritis kita tidak dapat mencari sebaran arus konsumsi pada motor listrik tanpa pengujian. Efisiensi *Axial Coreless Brushless DC Motor* secara teoritis adalah daya konsumsi dari motor listrik secara teoritis perhitungan dibandingkan daya output perhitungan yang menggunakan *basic equation* motor listrik adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 eff_{motor} &= \frac{P_{rotational}}{P_{input}} \times 100 \% \\
 &= \frac{485.83 \text{ watt}}{500 \text{ watt}} \times 100 \% = 97.167 \%
 \end{aligned}$$

Secara teoritis kenaikan daya beban akan sebanding dengan kenaikan arus listrik (tegangan tetap). Sebagaimana perhitungan bahwa daya input maksimumnya motor akan mengkonsumsi arus 10.41 A, maka digunakan kawat berlaminasi standart *American*

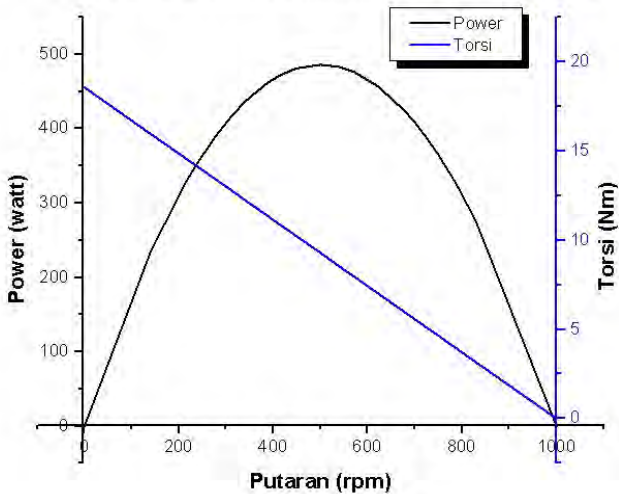
Wire Gauge (AWG) yaitu kawat tembaga berlaminasi dengan ukuran diameter 1.1 mm.

4. Grafik sebaran Daya dan Torsi Teoritis

Tabel 4.1 Data sebaran Daya dan Torsi teoritis

Putaran (rpm)	Power (watt)	Torsi (Nm)
1000	0	0
832.3	271.2422	3.112066
828.6	275.9943	3.180728
825.1	280.4405	3.245678
813.7	294.5924	3.457232
799.1	311.979	3.728169
780.7	332.711	4.069624
765.1	349.2573	4.359119
749.3	365.0517	4.652325
723.3	388.9304	5.134815
710.7	399.5573	5.368638
704.5	404.5599	5.483693
679.1	423.4945	5.95505
621.5	457.1422	7.023952
570.8	476.0888	7.96481
553.4	480.2885	8.287707
537.8	483.0533	8.577202
500	485.83	9.278669
447.7	480.5145	10.24922
417.1	472.4747	10.81707
389.5	462.1016	11.32925
352.6	443.608	12.01402
338.2	434.9554	12.28125
311	416.4127	12.78601
278	390.0554	13.3984
236	350.3884	14.17781
213	325.7607	14.60463
140	233.9757	15.95931
0	0	18.55734

GRAFIK SEBARAN TORSI, DAYA, vs RPM TEORITIS



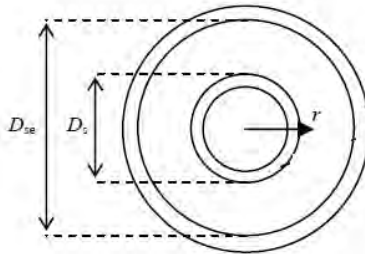
Gambar 4.1. Grafik sebaran Daya, dan Torsi vs Rpm *Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor* secara teoritis

Pada gambar 4.1 menunjukkan grafik hasil perhitungan teoritis dengan persamaan dasar motor listrik dengan data pada tabel 4.1. Data tersebut mengacu pada spesifikasi motor yang menjadi target rancang dan bangun *Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor*.

4.1.2 Inisialisasi Awal Dimensi motor

Untuk menyusun sebuah mesin listrik kita harus menentukan perkiraan dimensi/ukuran dari beberapa bagian mesin tersebut sebagai acuan untuk perhitungan selanjutnya. Kebutuhan dimensi untuk motor *axial flux* berbeda dengan motor induksi pada umumnya (motor induksi radial fluks) yaitu disesuaikan dengan bentuknya. Seperti pada gambar 4.2 dibawah ini yang menunjukkan penampang stator ataupun rotor tanpa slot dari *Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor*. Parameter utama yang harus kita tentukan adalah luas permukaan

efektif dari motor yang menghasilkan gaya/torsi, yaitu permukaan di antara diameter D_{se} dan D_e .



Gambar 4.2 Penampang Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Campbell (1974) disebutkan bahwa untuk motor induksi aksial fluks perbandingan antara D_e dengan D_{se} agar torsi yang dihasilkan optimal adalah 0,58. Rasio perbandingan ini disebut dengan K_d . Sebagai acuan ukuran harus ditentukan salah satu antara D_s atau D_{se} . Untuk membatasi luas permukaan maka ditentukan diameter terluar (D_{se}) adalah 18cm atau 0,18m. Dengan demikian nilai D_s bisa kita dapatkan dari:

$$K_d = \frac{D_s}{D_{se}} = 0.58$$

$$D_s = 0.58 \times 0.184 = 0.106 \text{ m}$$

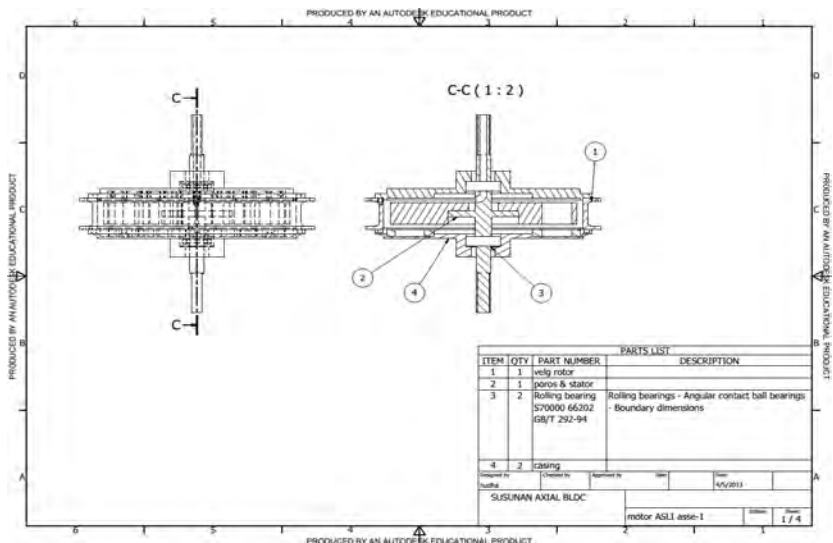
Maka bisa didapatkan :

- Rin (jari jari dalam) = 0.5×0.106 = 0.053 m
- Rout (jari jari luar) = $0,5 \times 0.184$ = 0.092 m
- Panjang core (l_e) = $0,092 - 0,053$ = 0.038 m
- R_{ave} (jari jari rata rata) = $\sqrt{Rout \cdot Rin}$ = 0,068 m

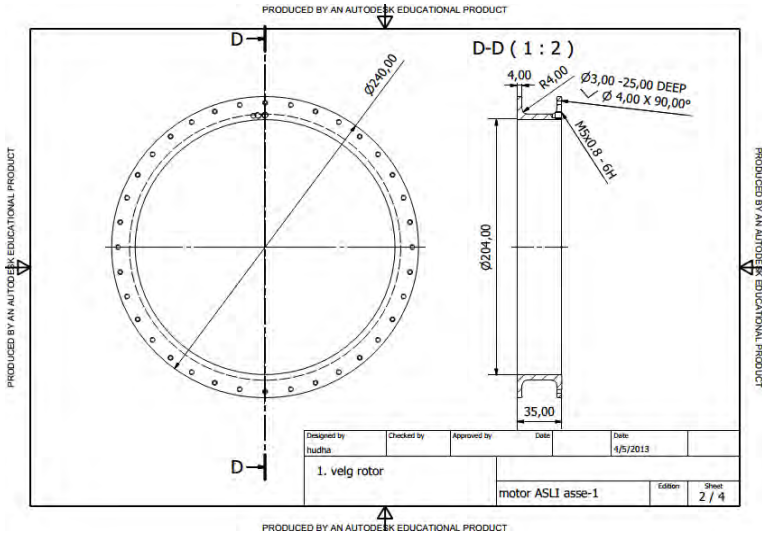
4.2 Proses Pembuatan Motor

4.2.1 Proses Desain

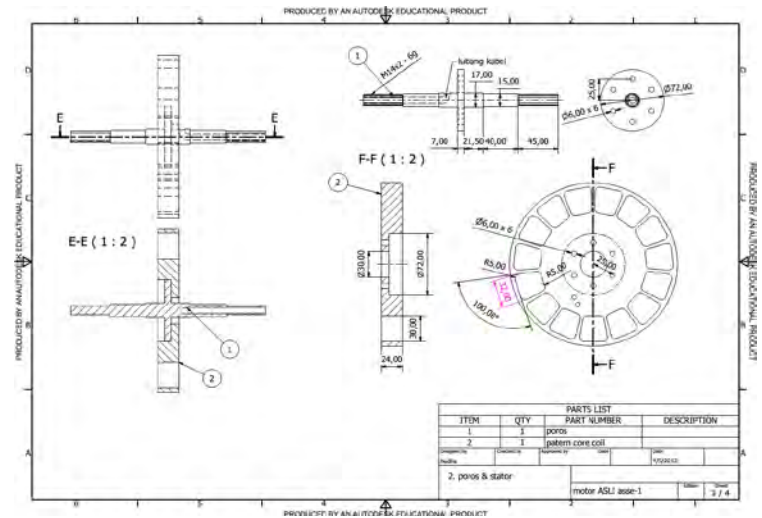
Setelah spesifikasi motor Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor yang akan dibuat sudah didapatkan maka proses desain dilakukan dengan software drawing. Berikut ini gambar susunan desain motor listrik axial flux gambar 4.3 dan gambar bagian-bagian partnya pada gambar 4.4, gambar 4.5 dan 4.6.



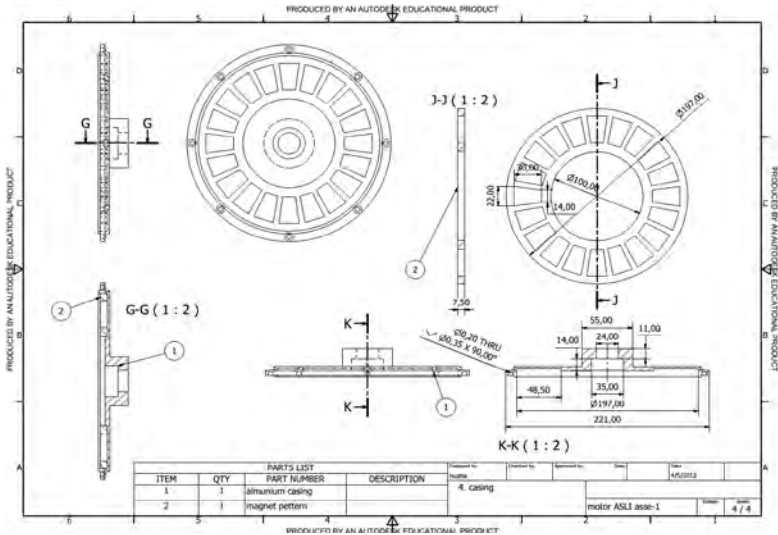
Gambar 4.3 Gambar Susunan Desain Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor



Gambar 4.4 Gambar Part Velg Hub Motor



Gambar 4.5 Gambar Bagian Poros dan Stator Motor



Gambar 4.6 Gambar Part Casing dan Pattern Magnet Rotor

4.2.2 Pembuatan stator

Pada pembuatan stator memerlukan tingkat permesinan yang tinggi, mengingat pembentukan 15 core yang harus identik. Hal ini mengharuskan pembagian sudut yang sama besar, oleh karena itu proses permesinan manual bubut atau miling sangat sulit untuk dilakukan. Solusinya adalah menggunakan laser cutting CNC atau *Computerized Numeric Control*, dengan mesin ini operator tinggal memasukan gambar melalui software maka mesin akan beroperasi secara otomatis untuk bentuk yang diharapkan.

Tahapan selanjutnya adalah pembuatan kumparan tanpa armature. Dengan menggunakan alat sederhana yang tampak pada gambar dibawah, dibuat kumparan dengan jumlah lilitan yang sama dan geometri yang seidentik mungkin ditunjukkan pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 Alat Untuk Menggulung Kumaran dan Kumaran Tanpa Armature (Coreless)



Gambar 4.8 *Stator Axial Coreless Brushless DC Motor* dan Kumaran
Pada gambar 4.8 ditunjukkan hasil pemasangan kumaran pada stator yang diakhiri dengan penggunaan epoxy resin untuk menempelkan kumaran secara permanen pada stator nampak.

4.2.3 Pembuatan rotor

Proses pembuatan rotor tidak jauh berbeda dengan stator adalah menggunakan laser cutting CNC atau *Computerized Numeric Control* untuk patternnya, dan casing rotor terbuat dari bahan almunium agar lebih ringan. Proses terakhir pembuatan rotor adalah menempelkan magnet pada casing almunium dengan menggunakan pattern yang telah dibuat dengan lem.nSetelah kedua komponen utama (stator dan rotor) telah selesai dibuat maka bisa dilakukan proses *assembly*.

4.2.4 Proses Assembly

Proses assembly adalah proses terakhir pada rancang bangun Axial Flux Permanent Magnet Coreless Brushless DC Motor. Pada proses assembly yang terpenting adalah pemasangan sensor hall magnetic pada posisi yang telah ditentukan. Setelah itu stator dibaut pada poros motor dan rotor dapat dipasang sebagaimana mestinya. Seperti nampak pada gambar 4.9 dibawah ini dan pada gambar 4.10 adalah hasil *Axial Coreless Brushless DC Motor* yang telah *disassembly* sebagai hub motor.



Gambar 4.9 Stator dan Rotor Stator *Axial Coreless Brushless DC Motor* yang *disassembly*



Gambar 4.10 *Axial Coreless Brushless DC Motor* hasil rancangan

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB V

ANALISA DATA UNJUK KERJA AXIAL FLUX PM CORELESS BRUSHLESS DC MOTOR

5.1 Contoh Perhitungan Unjuk Kerja *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor*

Tujuan dari perhitungan yang dilakukan ini adalah untuk mengetahui besar nilai dari setiap unjuk kerja motor listrik *axial flux coreless brushless DC motor* yang telah dirancang dan dibuat sehingga diketahui nilai daya, torsi, dan efisiensi pada keluaran beban tertentu. Contoh perhitungan unjuk kerja *axial flux coreless brushless DC motor* ini diambil data putaran motor adalah 582.9 rpm dengan data awal seperti berikut:

$$V_{in} = 49.85 \text{ volt}$$

$$I_{in} = 7.6 \text{ ampere}$$

$$V_{out \text{ generator}} = 75 \text{ volt}$$

$$I_{out \text{ generator}} = 1.18 \text{ ampere}$$

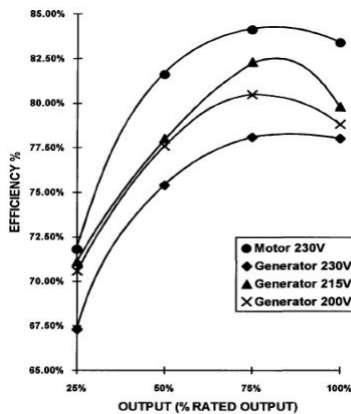
1. Daya motor

Konsumsi daya pada motor listrik dapat didapatkan langsung dari besarnya arus yang terpakai pada tegangan baterai tertentu. sehingga dapat dirumuskan:

$$\begin{aligned} P_{input} &= V_{in} \cdot I_{in} \\ &= 49.85 \text{ V} \times 7.6 \text{ A} \\ &= 378.86 \text{ watt} \end{aligned}$$

Untuk dapat menghitung daya output efektif motor listrik perlu diketahui besarnya efisiensi generator tersebut, efisiensi mekanis alat pengujian, dan efisiensi elektrikal dari

hambatan dalam alat penguji. Efisiensi mekanis yang umum dari sistem belt dan poros berputar didapat nilainya 87 %. Efisiensi elektrikal dari hambatan sistem elektrikal alat pengujian didapatkan nilai yang umum adalah 90 %. Efisiensi dari generator sebagai pembangkit daya dan variable daya saya ambil dari sumber [autonopedia.htm](#) Figure A3 *Efficiency curves for generator and motor operation (star connected and 50 Hz)*. Sebagaimana ditunjukkan pada grafik gambar 5.1.



Gambar 5.1 Grafik efisiensi generator
 ([autonopedia.htm](#))



Gambar 5.2 generator STC-3

Gambar 5.2 menunjukkan generator STC-3 dibuat oleh china. Dengan spesifikasi output rata-rata 3 kW, 3 fasa generator, output voltage 230v. Dari grafik efisiensi pada generator 230 volt memiliki efisiensi pada pengukuran untuk output 500 watt, yaitu 16.67 % dari rated outputnya saya asumsikan 60%.

$$P_{out\ generator} = (P_{out\ efekf} \cdot eff_{gen}) \cdot eff_{mech} \cdot eff_{elec}$$

$$\begin{aligned} P_{out\ efektif} &= \frac{(V_{out} \cdot I_{out} \cdot \sqrt{3})}{(eff_{gene} \cdot eff_{mech} \cdot eff_{electrical})} \\ &= 49.68 \times 1.78 \times \sqrt{3} / (0.60 \times 0.90 \times 0.87) \\ &= 345.18 \text{ watt} \end{aligned}$$

2. Torsi

Dari hasil pengujian didapatkan nilai torsi pada saat putaran motor listrik sebesar 582.98 rpm atau kecepatan adalah 1.281 Nm berdasarkan daya yang di keluarkan oleh motor listrik.

Data awal :

- ✓ Daya Motor = $P_{rotational}$ = 345.18 watt
- ✓ Putaran Motor = 447.7rpm = 46.883 rad/sec

Diperoleh dari perhitungan dasar:

$$\begin{aligned} P &= \tau \omega \\ \tau &= P / \omega \\ &= 345.18 / 46.883 \\ &= 7.34979 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3. Efisiensi Motor

Unjuk kerja motor listrik dapat dilihat penggunaan daya input oleh motor listrik untuk membangkitkan daya output pada generator. Sebagai contoh perhitungan didapatkan data-data sebagai berikut.

Data yang diperoleh:

- ✓ P_{input} = 428.15 watt

$$\checkmark \quad P_{rotational} = 345.18 \text{ watt}$$

$$\begin{aligned} eff_{motor} &= \frac{P_{rotational}}{P_{input}} \times 100 \% \\ &= \frac{428.15 \text{ watt}}{345.18 \text{ watt}} \times 100 \% \\ &= 77.90 \% \end{aligned}$$

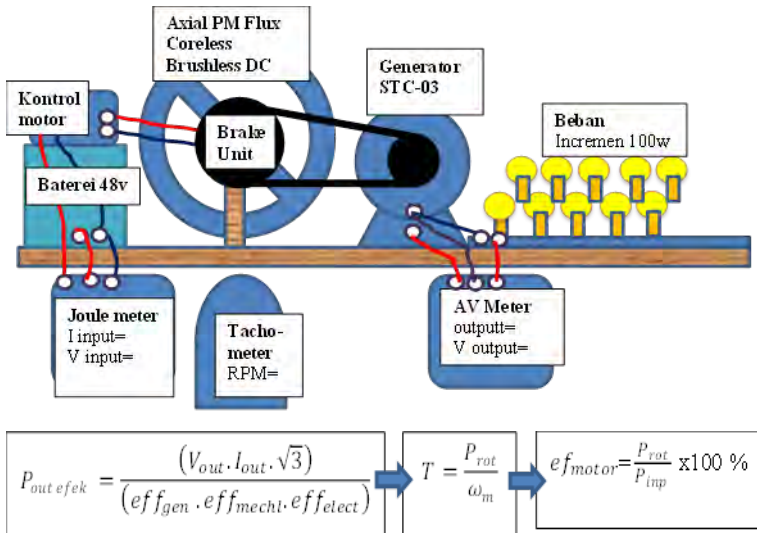
5.2 Analisa Unjuk Kerja *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor*

5.2.1 Pengukuran Parameter Motor

Parameter *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor* yang diperlukan adalah pengukuran tegangan operasional, arus konsumsi motor, dan daya output efektif motor. Dengan ini kita bisa menganalisa unjuk kerja melalui kurva torsi, daya, dan efisiensi terhadap kecepatan. Untuk mendapatkan unjuk kerja *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor*, dilakukan beberapa tes dengan susunan alat pengujian tertentu.

5.2.1.1 Penyusunan Alat Untuk Pengujian

Penyusunan alat untuk pengujian *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor* bertujuan mengetahui parameter daya output efektif maksimum dan data konsumsi tegangan dan arus input. Berikut dibawah ini adalah gambar penyusunan alat untuk pengujian:



Gambar 5.3 Penyusunan Alat Untuk Pengujian Axial Flux Coreless Brushless DC Motor

Pada gambar 5.3 menunjukkan penyusunan alat untuk pengujian. Setelah dilakukan pengusunan alat untuk pengujian, pengukuran tegangan dan arus motor serta pengukuran daya output efektif maksimum motor sebagaimana akan dijelaskan pada subbab selanjutnya.

5.2.1.2 Pengukuran Tegangan dan Arus Motor

Pengujian dilakukan dengan pembebanan yang meningkat untuk mendapatkan tegangan dan input arus untuk setiap putaran *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor*. Pada proses pengambilan data tegangan dan arus *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor* dilakukan dengan cara *braking power*. Dengan cara ini *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor* dioperasikan dengan kecepatan maksimum kemudian dihambat secara perlahan dengan penggunaan rem. Sehingga didapatkan data konsumsi arus dan tegangan operasional, mulai dari

kecepatan putar tanpa beban hingga motor tidak mampu lagi berputar. Sebagaimana tampak pada gambar dibawah.



Gambar 5.4 *Axial Flux Coreless Brushless DC Motor* dengan pengujian *breaking*

Berikut ini adalah hasil pengukuran tegangan dan arus pada pembebanan motor listrik dari hasil pengujian tersebut

Tabel 5.1 Hasil Pengujian Axial Coreless Brushless DC Motor

Putaran (rpm)	Tegangan (V)	Arus (I)	$P=V \times I$
834.6	51.03	2.55	130.1265
832.3	51.06	2.74	139.9044
828.6	51.13	2.8	143.164
825.1	51.1	2.93	149.723
813.7	51.03	3.49	178.0947
799.1	50.99	3.61	184.0739
780.7	50.86	3.99	202.9314
765.1	50.73	4.17	211.5441
749.3	50.66	4.36	220.8776
723.3	50.59	4.55	230.1845
710.7	50.35	4.73	238.1555
704.5	50.25	4.73	237.6825
679.1	50.12	5.17	259.1204
621.5	49.81	6.79	338.2099
570.8	49.68	7.29	362.1672
553.4	49.44	7.4	365.856
537.8	49.3	8.03	395.879
501.7	49.2	8.28	407.376
447.7	49.1	8.72	428.152
417.1	49.07	9.03	443.1021
389.5	49.03	10.03	491.7709
352.6	48.86	10.96	535.5056
338.2	48.76	11.33	552.4508
311	48.66	11.77	572.7282
278	48.66	12.83	624.3078
236	48.42	14.45	699.669
213	48.22	14.7	708.834
140	47.81	16.32	780.2592

Dari data pengujian diatas maka didapatkan data penting yaitu putaran maksimum tanpa beban pada 834.6 rpm.

5.2.1.3 Pengukuran Daya Output Efektif Maksimum Motor

Data pengukuran daya output efektif motor adalah parameter yang perlu didapatkan untuk mendapatkan daya, torsi, dan efisiensi motor. Pengujian pengukuran daya output efektif maksimum ini dilakukan dengan mengkoppel motor listrik pada generator dan diberi pembebanan yang meningkat sehingga didapatkan daya output yang maksimum, sebagaimana data generator pada subbab contoh perhitungan. Proses dan alat pengujian nampak pada gambar 5.5 dibawah.



Gambar 5.5 Axial Flux Coreless Brushless DC Motor yang dikoppel pada generator

Dari pengujian Daya Axial Coreless Brushless DC Motor diatas didapat data-data dan poin penting bahwa Axial Coreless Brushless DC Motor memiliki daya maksimum untuk membangkitkan generator sebagaimana nampak pada tabel hasil pengujian dibawah ini.

Tabel 5.2 Hasil Pengujian Daya Axial Coreless Brushless DC Motor

Beban (watt)	Putaran (rpm)	I in (A)	V in (volt)	I out (A)	Vout (volt)	P input	P Out Efektif (W)
100	766.8	4.05	49.2	0.26	95.3	199.26	91.31
200	737.3	4.67	48.8	0.52	89.1	227.89	170.81
300	717.1	5.11	48.6	0.76	80.9	248.34	226.67
400	709.9	6.04	48.02	0.96	75	290.04	265.44
500	709.2	7.6	49.85	1.18	75	378.86	326.28
600	688.1	8.03	49.81	1.34	67.9	399.97	335.44
700	629.7	8.41	49.74	1.49	62	418.31	340.58
800	563.1	8.84	49.71	1.62	56.5	439.43	337.45
900	524.9	9.34	49.68	1.78	52.6	464.01	345.18
1000	511.1	9.72	49.79	1.8	51.1	483.95	339.11

Dari data pengujian tabel 5.2 diatas didapatkan data penting bahwa motor sanggup membangkit output maksimum generator sebesar 1.78 ampere pada tegangan 52.6 volt AC maka daya output efektifnya adalah:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{output efektif}} &= \frac{(V_{\text{out}} \cdot I_{\text{out}} \cdot \sqrt{3})}{(eff_{\text{generator}} \cdot eff_{\text{mechanical}} \cdot eff_{\text{electrical}})} \\
 &= 49.68 \times 1.78 \times \sqrt{3} / (0.60 \times 0.90 \times 0.87) \\
 &= 345.18 \text{ watt}
 \end{aligned}$$

5.2.2 Interpolasi Data Pengujian Pengukuran Tegangan, Arus Motor dan Daya Output Efektif Maksimum Motor

Dengan hasil pengujian diatas maka grafik torsi vs kecepatan motor listrik dapat diketahui sebagaimana kita bisa mengetahui performa motor serta karakteristik daya output motor. Kurva torsi vs kecepatan bisa diperoleh dari persamaan dasar torsi motor listrik, yaitu:

$$T = \frac{P_{rot}}{\omega_m}$$

$$\omega = (T_s - T) \frac{\omega_m}{T_s}$$

$$P = - \left(\frac{T_s}{\omega_m} \right) \omega^2 + T_s \omega$$

Maka didapatkan bahwa P maksimum berada pada $\frac{1}{2} \omega_m$ dan torsi pada saat itu adalah $\frac{1}{2} T_s$, maka $T_s = 2 \times P / \frac{1}{2} \omega_m = 2 \times 345.18 / 0.5 \times 87.39 = 15.8545 \text{ Nm}$.

Sehingga dapat dilengkapi data torsi dan daya motor listrik serta dihitung pula efisiensi motor berdasarkan $P_{rotational}$ dan P_{input} . ditampilkan pada tabel 5.3 dibawah ini.

Tabel 5.3 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor

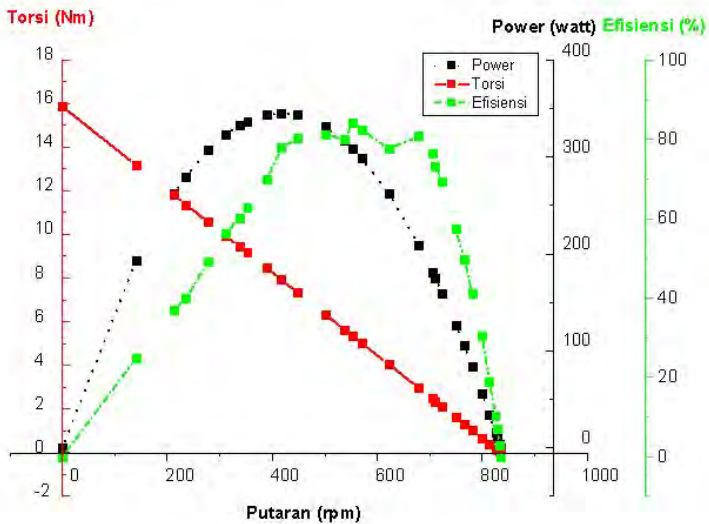
rpm	V in (volt)	I in (amp)	P in (watt)	Torsi (Nm)	P rot (watt)	eff (%)
834.60	51.03	2.55	130.13	0.00	0.00	0.00
832.30	51.06	2.74	139.90	0.04	3.79	2.71
828.60	51.13	2.80	143.16	0.11	9.85	6.88
825.10	51.10	2.93	149.72	0.18	15.54	10.38
813.70	51.03	3.49	178.09	0.40	33.71	18.93
799.10	50.99	3.61	184.07	0.67	56.23	30.55
780.70	50.86	3.99	202.93	1.02	83.41	41.10
765.10	50.73	4.17	211.54	1.32	105.40	49.83
749.30	50.66	4.36	220.88	1.62	126.69	57.36
723.30	50.59	4.55	230.18	2.11	159.57	69.32
710.70	50.35	4.73	238.16	2.35	174.54	73.29
704.50	50.25	4.73	237.68	2.47	181.68	76.44
679.10	50.12	5.17	259.12	2.95	209.32	80.78
621.50	49.81	6.79	338.21	4.05	262.53	77.62
570.80	49.68	7.29	362.17	5.01	298.47	82.41
553.40	49.44	7.40	365.86	5.34	308.46	84.31
537.80	49.30	8.03	395.88	5.64	316.40	79.92
501.70	49.20	8.28	407.38	6.32	331.06	81.27
447.70	49.10	8.72	428.15	7.35	343.35	80.19
417.10	49.07	9.03	443.10	7.93	345.18	77.90
389.50	49.03	10.03	491.77	8.46	343.65	69.88
352.60	48.86	10.96	535.51	9.16	336.88	62.91
338.20	48.76	11.33	552.45	9.43	332.78	60.24
311.00	48.66	11.77	572.73	9.95	322.78	56.36
278.00	48.66	12.83	624.31	10.57	306.72	49.13
236.00	48.42	14.45	699.67	11.37	280.03	40.02
213.00	48.22	14.70	708.83	11.81	262.45	37.02
140.00	47.81	16.32	780.26	13.20	192.76	24.70
0.00	47.11	19.20	904.51	15.85	0.00	0.00

5.3. Kurva Karakteristik Torsi Vs Kecepatan Axial Flux Coreless Brushless DC Motor

5.3.1 Kurva Karakteristik Torsi Vs Kecepatan Axial Flux Coreless Brushless DC Motor Hasil Eksperimen

Kurva torsi vs kecepatan bisa digunakan untuk mengetahui karakteristik perubahan torsi terhadap beban pada kecepatan. Dengan kurva ini kita bisa mengetahui performa motor serta karakteristik range kerja pada output motor listrik.

GRAFIK KARAKTERISTIK TORSI, DAYA, EFISIENSI vs RPM
 AXIAL CORELESS BRUSHLESS DC MOTOR



Gambar 5.6 Grafik Karakteristik Torsi Vs Kecepatan Axial Flux Coreless Brushless DC Motor

Pada gambar 5.6 grafik torsi Axial Coreless Brushless DC Motor didapatkan karakteristik motor, bahwa pemakaian motor peak power 350 w att. Pada operasionalnya memiliki grafik torsi puncak pada 15.85 Nm yang menurun mulai dari rpm

rendah hingga rpm maksimumnya sebagaimana grafik torsi vs kecepatan motor listrik pada umumnya.

Untuk faktor keamanan dari Grafik Torsi vs Rpm tersebut dapat ditarik garis lurus Axial Coreless Brushless DC Motor tersebut memiliki operasional torsi kontinunya berada pada 8 Nm. Hal ini dijelaskan dari persamaan dasar motor listrik pada bab III, yaitu:

$$T = \frac{P}{\omega_m} = \frac{N_{ph} E_{ph} I_{ph}}{\omega_m}$$

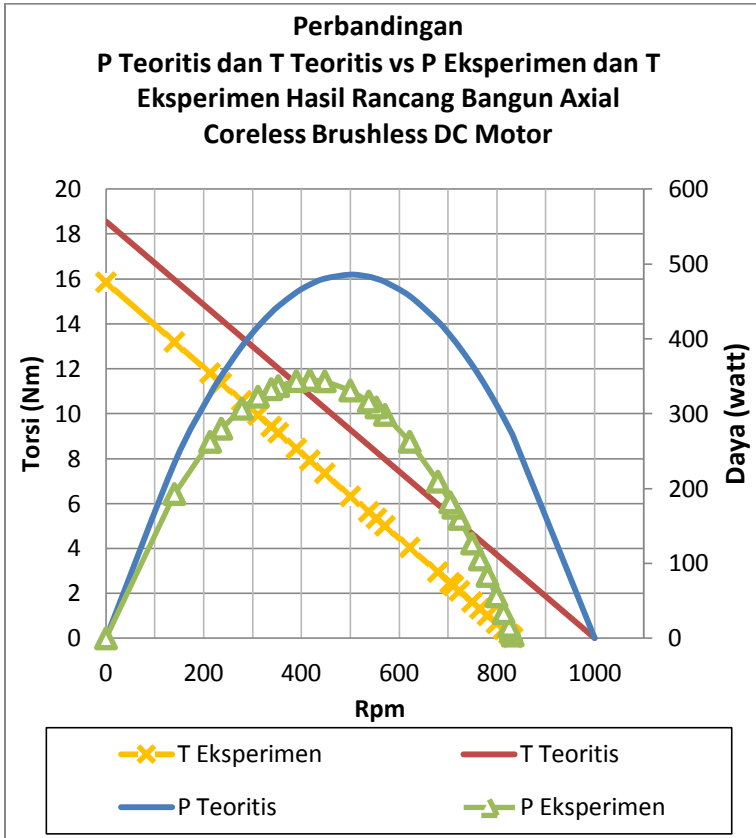
$$T = \frac{N_{ph} N_m N_{spp} K_w B_g n_s I_{ph} (R_0^2 - R_i^2)}{\omega_m}$$

Dari persamaan diatas dapat disimpulkan bahwa untuk meningkatkan torsi motor listrik diperoleh dengan menaikkan variable $N_{ph}, N_m, N_{spp}, K_w, B_g, n_s, I_{ph}, R_0, R_i$. Dari banyak variable tersebut variable yang mungkin untuk rubah adalah banyaknya lilitan (N_m), dan arus yang dipakai (I_{ph}). Namun ketika kita menaikkan arus yang dipakai (I_{ph}) akan mengakibatkan daya motor listrik pun berubah. Sehingga bila kita ingin menaikkan torsi motor dengan daya konsumsi tetap (daya motor tetap) adalah dengan jalan mengganti lilitan yang lebih banyak dengan diameter kawat yang sama.

5.3.2 Kurva Karakteristik Torsi dan Daya Axial Flux Coreless Brushless DC Motor Hasil Perhitungan Teoris vs Hasil Eksperimen.

Berdasarkan hasil perhitungan teoritis yang telah dilakukan pada bab sebelumnya untuk merancang Axial Flux Coreless Brushless DC Motor yang diharapkan maka telah didesain dan dirancang bangun Axial Flux Coreless Brushless DC Motor. Dari Axial Flux Coreless Brushless DC Motor yang telah jadi maka dibandingkan bagaimana hasil perhitungan secara teoritis dan hasil dari eksperimen. Di bawah ini akan

ditampilkan perbandingan grafik Daya , Torsi vs rpm secara teoritis dan yang telah dibuat sebagai eksperimen sebagaimana gambar 5.7 dibawah ini.



Gambar 5.7 Grafik Perbandingan P Teoritis dan T Teoritis vs P Eksperimen dan T Eksperimen Hasil Rancang Bangun Axial Coreless Brushless DC Motor

5.4 Kurva Karakteristik Torsi Vs Kecepatan Axial Flux Coreless Brushless DC Motor dengan Pembatasan Torsi Maksimum untuk Pemakaian Aman pada Aplikasi Umum.

Motor listrik memiliki karakteristik operasionalnya pada kecepatan (rpm) yang sangat dapat menghasilkan torsi yang tinggi. Mulai dari torsi puncak yang kemudian turun seiring dengan bertambah kecepatan angularnya. Pada kekurangannya jika motor listrik mendapatkan beban yang melebihi kemampuan dari torsi yang dimiliki maka akan terjadi *over charging* pada kumparan statornya akibat motor tidak sanggup berputar ataupun ketika berputar terlalu pelan. Mengakibatkan kumparan statornya dapat terbakar bila terjadi dalam waktu yang lama. Sehingga pada aplikasinya, control motor listrik memiliki pembatasan pada torsi maksimumnya, dengan cara membatasi arus konsumsi ketika motor mendapatkan beban berlebih.

Pembatasan arus maksimum konsumsi pada motor listrik yang menjadi acuan adalah nilai dari setengah torsi maksimum yang dimiliki. Karena pada motor listrik daya maksimumnya dihasilkan pada saat motor listrik menghasilkan setengah torsi maksimumnya. Pada saat itu pula motor listrik berputar pada kecepatan angular setengah dari kecepatan angular maksimumnya. Berikut ini mengulas tentang analisa pembatasan torsi maksimum yang menjadi kriteria control pada motor listrik, dengan pembatasan secara berurutan 6 Nm, 7 Nm, 8 Nm, 9 Nm, dan 10 Nm dari torsi maksimum 15.85Nm

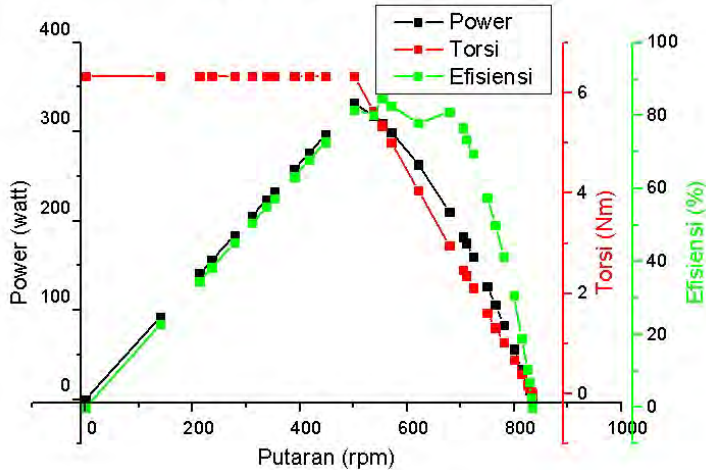
1. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 6 Nm.

Pada pembatasan torsi maksimum pada 6 Nm hal yang perlu dilakukan adalah dengan menseting pada kontroler untuk keluaran arus maksimum adalah sebesar 8.28 ampere seperti tertera pada tabel 5.4 di bawah ini.

Tabel 5.4 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Torsi Maksimum 6 Nm.

Rpm	V in (volt)	Arus (I)	T (Nm)	P in	P rot	eff (%)
834.60	51.03	2.55	0.00	130.13	0.00	0.00
832.30	51.06	2.74	0.04	139.90	3.79	2.71
828.60	51.13	2.80	0.11	143.16	9.85	6.88
825.10	51.10	2.93	0.18	149.72	15.54	10.38
813.70	51.03	3.49	0.40	178.09	33.71	18.93
799.10	50.99	3.61	0.67	184.07	56.23	30.55
780.70	50.86	3.99	1.02	202.93	83.41	41.10
765.10	50.73	4.17	1.32	211.54	105.40	49.83
749.30	50.66	4.36	1.61	220.88	126.69	57.36
723.30	50.59	4.55	2.11	230.18	159.57	69.32
710.70	50.35	4.73	2.35	238.16	174.54	73.29
704.50	50.25	4.73	2.46	237.68	181.68	76.44
679.10	50.12	5.17	2.94	259.12	209.32	80.78
621.50	49.81	6.79	4.03	338.21	262.53	77.62
570.80	49.68	7.29	4.99	362.17	298.47	82.41
553.40	49.44	7.40	5.32	365.86	308.46	84.31
537.80	49.30	8.03	5.62	395.88	316.40	79.92
501.70	49.20	8.28	6.30	407.38	331.06	81.27
447.70	49.20	8.28	6.30	407.38	295.43	72.52
417.10	49.20	8.28	6.30	407.38	275.23	67.56
389.50	49.20	8.28	6.30	407.38	257.02	63.09
352.60	49.20	8.28	6.30	407.38	232.67	57.11
338.20	49.20	8.28	6.30	407.38	223.17	54.78
311.00	49.20	8.28	6.30	407.38	205.22	50.38
278.00	49.20	8.28	6.30	407.38	183.45	45.03
236.00	49.20	8.28	6.30	407.38	155.73	38.23
213.00	49.20	8.28	6.30	407.38	140.55	34.50
140.00	49.20	8.28	6.30	407.38	92.38	22.68
0.00	49.20	8.28	6.30	407.38	0.00	0.00

**GRAFIK SEBARAN TORSI, DAYA, DAN EFISIENSI vs RPM
PADA BATAS TORSI MAKSIMUM 6 Nm**



Gambar 5.8 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 6 Nm

Pada pembatasan torsi maksimum 6 Nm dapat diketahui bahwa torsi tersebut berada dibawah dari setengah torsi maksimum motor listrik yang diketahui bahwa pada ketika setengah torsi maksimumnya motor listrik berada pada daya output maksimumnya. Sehingga nampak pada grafik daya peaknya turun namun pada karakteristik efisiensinya mengalami kenaikan meskipun tidak memiliki perbedaan yang cukup jauh, dapat terlihat pada gradien garis efisiensinya hampir sama mulai dari saat putaran rendah sampai putaran saat torsiya 6 Nm..

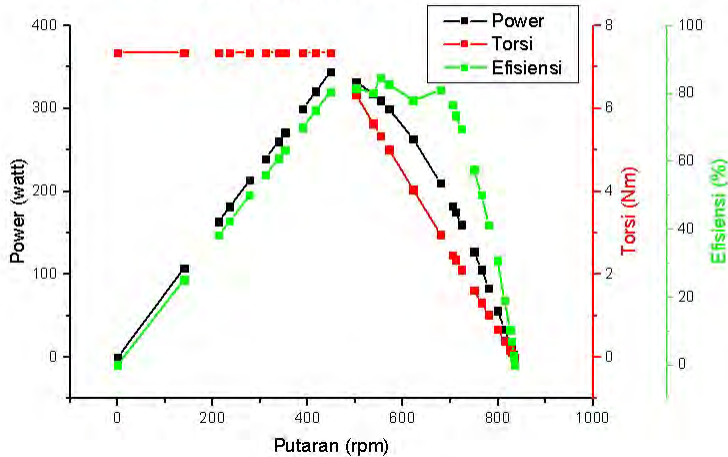
2. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 7 Nm.

Pada pembatasan torsi maksimum pada 7 Nm hal yang perlu dilakukan adalah dengan *mensetting* pada *controller* untuk keluaran arus maksimum adalah sebesar 8.72 ampere seperti tertera pada tabel 5.5 di bawah ini.

Tabel 5.5 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Torsi Maksimum 7 Nm.

Rpm	V in (volt)	Arus (I)	T (Nm)	P in	P rot	eff (%)
834.60	51.03	2.55	0.00	130.13	0.00	0.00
832.30	51.06	2.74	0.04	139.90	3.79	2.71
828.60	51.13	2.80	0.11	143.16	9.85	6.88
825.10	51.10	2.93	0.18	149.72	15.54	10.38
813.70	51.03	3.49	0.40	178.09	33.71	18.93
799.10	50.99	3.61	0.67	184.07	56.23	30.55
780.70	50.86	3.99	1.02	202.93	83.41	41.10
765.10	50.73	4.17	1.32	211.54	105.40	49.83
749.30	50.66	4.36	1.61	220.88	126.69	57.36
723.30	50.59	4.55	2.11	230.18	159.57	69.32
710.70	50.35	4.73	2.35	238.16	174.54	73.29
704.50	50.25	4.73	2.46	237.68	181.68	76.44
679.10	50.12	5.17	2.94	259.12	209.32	80.78
621.50	49.81	6.79	4.03	338.21	262.53	77.62
570.80	49.68	7.29	4.99	362.17	298.47	82.41
553.40	49.44	7.40	5.32	365.86	308.46	84.31
537.80	49.30	8.03	5.62	395.88	316.40	79.92
501.70	49.20	8.28	6.30	407.38	331.06	81.27
447.70	49.10	8.72	7.32	428.15	343.35	80.19
417.10	49.10	8.72	7.32	428.15	319.88	74.71
389.50	49.10	8.72	7.32	428.15	298.71	69.77
352.60	49.10	8.72	7.32	428.15	270.41	63.16
338.20	49.10	8.72	7.32	428.15	259.37	60.58
311.00	49.10	8.72	7.32	428.15	238.51	55.71
278.00	49.10	8.72	7.32	428.15	213.20	49.80
236.00	49.10	8.72	7.32	428.15	180.99	42.27
213.00	49.10	8.72	7.32	428.15	163.35	38.15
140.00	49.10	8.72	7.32	428.15	107.37	25.08
0.00	49.10	8.72	7.32	428.15	0.00	0.00

**GRAFIK SEBARAN TORSI, DAYA, DAN EFISIENSI vs RPM
PADA BATAS TORSI MAKSIMUM 7 Nm**



Gambar 5.9 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 7 Nm

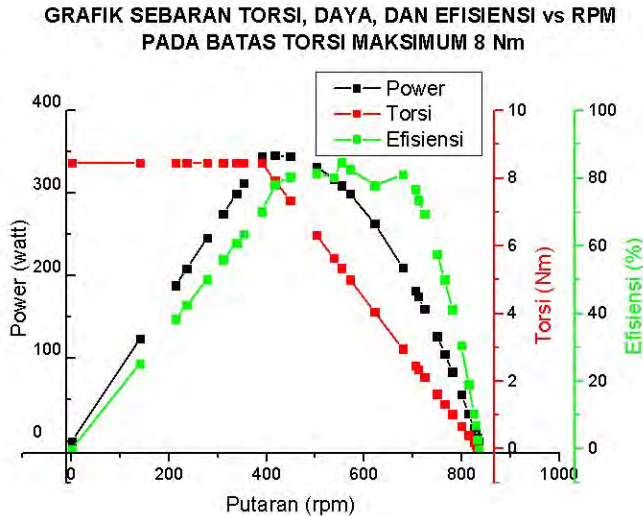
Pada gambar 5.9 grafik pembatasan torsi maksimum 7 Nm dapat diketahui bahwa torsi tersebut berada dibawah dari setengah torsi maksimum motor listrik yang diketahui bahwa pada ketika setengah torsi maksimumnya motor listrik berada pada daya output maksimumnya. Sehingga nampak pada grafik daya peaknya turun namun pada karakteristik efisiensinya mengalami kenaikan meskipun tidak memiliki perbedaan yang cukup jauh, dapat terlihat pada gradien garis efisiensinya hampir sama mulai dari saat putaran rendah sampai putaran saat torsi nya 7 Nm.

3. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 8 Nm.

Pada pembatasan torsi maksimum pada 8 Nm hal yang perlu dilakukan adalah dengan mensetting pada kontroler untuk keluaran arus maksimum adalah sebesar 10.03 ampere seperti tertera pada tabel 5.6 di bawah ini.

Tabel 5.6 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Torsi Maksimum 8 Nm.

Rpm	V in (volt)	Arus (I)	T (Nm)	P in	P rot	eff (%)
834.60	51.03	2.55	0.00	130.13	0.00	0.00
832.30	51.06	2.74	0.04	139.90	3.79	2.71
828.60	51.13	2.80	0.11	143.16	9.85	6.88
825.10	51.10	2.93	0.18	149.72	15.54	10.38
813.70	51.03	3.49	0.40	178.09	33.71	18.93
799.10	50.99	3.61	0.67	184.07	56.23	30.55
780.70	50.86	3.99	1.02	202.93	83.41	41.10
765.10	50.73	4.17	1.32	211.54	105.40	49.83
749.30	50.66	4.36	1.61	220.88	126.69	57.36
723.30	50.59	4.55	2.11	230.18	159.57	69.32
710.70	50.35	4.73	2.35	238.16	174.54	73.29
704.50	50.25	4.73	2.46	237.68	181.68	76.44
679.10	50.12	5.17	2.94	259.12	209.32	80.78
621.50	49.81	6.79	4.03	338.21	262.53	77.62
570.80	49.68	7.29	4.99	362.17	298.47	82.41
553.40	49.44	7.40	5.32	365.86	308.46	84.31
537.80	49.30	8.03	5.62	395.88	316.40	79.92
501.70	49.20	8.28	6.30	407.38	331.06	81.27
447.70	49.10	8.72	7.32	428.15	343.35	80.19
417.10	49.07	9.03	7.90	443.10	345.18	77.90
389.50	49.03	10.03	8.43	491.77	343.65	69.88
352.60	49.03	10.03	8.43	491.77	311.09	63.26
338.20	49.03	10.03	8.43	491.77	298.39	60.68
311.00	49.03	10.03	8.43	491.77	274.39	55.80
278.00	49.03	10.03	8.43	491.77	245.27	49.88
236.00	49.03	10.03	8.43	491.77	208.22	42.34
213.00	49.03	10.03	8.43	491.77	187.93	38.21
140.00	49.03	10.03	8.43	491.77	123.52	25.12
0.00	49.03	10.03	8.43	491.77	0.00	0.00



Gambar 5.10 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 8 Nm

Pada gambar 5.10 grafik sebaran pembatasan torsi maksimum 8 Nm dapat diketahui bahwa torsi tersebut berada diatas dari setengah torsi maksimum motor listrik. Diketahui bahwa pada setengah torsi maksimumnya motor listrik berada pada daya output maksimumnya. Sehingga nampak pada grafik daya peaknya tidak terpengaruh begitu pula efisiensinya.

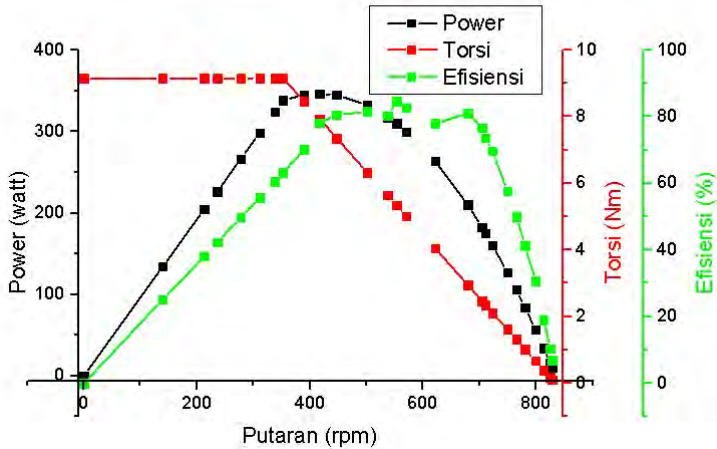
4. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 9 Nm.

Pada pembatasan torsi maksimum pada 9 Nm hal yang perlu dilakukan adalah dengan menseting pada kontroler untuk keluaran arus maksimum adalah sebesar 10.96 ampere seperti tertera pada tabel 5.7 di bawah ini.

Tabel 5.7 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Torsi Maksimum 9 Nm.

Rpm	V in (volt)	Arus (I)	T (Nm)	P in	P rot	eff (%)
834.60	51.03	2.55	0.00	130.13	0.00	0.00
832.30	51.06	2.74	0.04	139.90	3.79	2.71
828.60	51.13	2.80	0.11	143.16	9.85	6.88
825.10	51.10	2.93	0.18	149.72	15.54	10.38
813.70	51.03	3.49	0.40	178.09	33.71	18.93
799.10	50.99	3.61	0.67	184.07	56.23	30.55
780.70	50.86	3.99	1.02	202.93	83.41	41.10
765.10	50.73	4.17	1.32	211.54	105.40	49.83
749.30	50.66	4.36	1.61	220.88	126.69	57.36
723.30	50.59	4.55	2.11	230.18	159.57	69.32
710.70	50.35	4.73	2.35	238.16	174.54	73.29
704.50	50.25	4.73	2.46	237.68	181.68	76.44
679.10	50.12	5.17	2.94	259.12	209.32	80.78
621.50	49.81	6.79	4.03	338.21	262.53	77.62
570.80	49.68	7.29	4.99	362.17	298.47	82.41
553.40	49.44	7.40	5.32	365.86	308.46	84.31
537.80	49.30	8.03	5.62	395.88	316.40	79.92
501.70	49.20	8.28	6.30	407.38	331.06	81.27
447.70	49.10	8.72	7.32	428.15	343.35	80.19
417.10	49.07	9.03	7.90	443.10	345.18	77.90
389.50	49.03	10.03	8.43	491.77	343.65	69.88
352.60	48.86	10.96	9.12	535.51	336.88	62.91
338.20	48.86	10.96	9.12	535.51	323.12	60.34
311.00	48.86	10.96	9.12	535.51	297.14	55.49
278.00	48.86	10.96	9.12	535.51	265.61	49.60
236.00	48.86	10.96	9.12	535.51	225.48	42.11
213.00	48.86	10.96	9.12	535.51	203.51	38.00
140.00	48.86	10.96	9.12	535.51	133.76	24.98
0.00	48.86	10.96	9.12	535.51	0.00	0.00

**GRAFIK SEBARAN TORSI, DAYA, DAN EFISIENSI vs RPM
PADA BATAS TORSI MAKSIMUM 9 Nm**



Gambar 5.11 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 9 Nm

Pada gambar 5.11 grafik sebaran daya, torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 9 Nm dapat diketahui bahwa torsi tersebut berada diatas dari setengah torsi maksimum motor listrik. Diketahui bahwa pada setengah torsi maksimumnya motor listrik berada pada daya output maksimumnya. Sehingga nampak pada grafik daya *peak*nya tidak terpengaruh begitu pula efisiensinya.

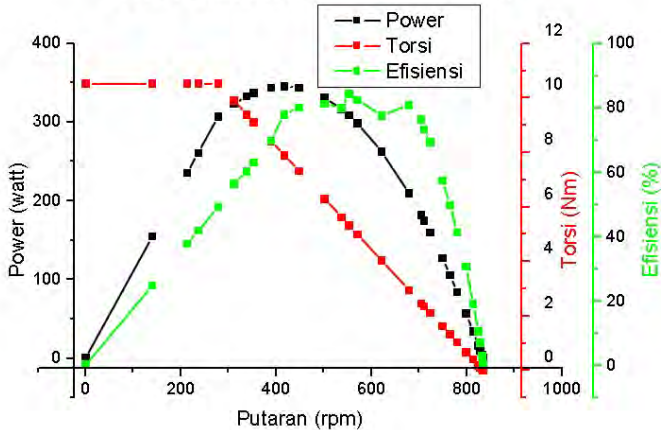
5. Pada Pembatasan Torsi Maksimum 10 Nm.

Pada pembatasan torsi maksimum pada 10 Nm hal yang perlu dilakukan adalah dengan menseting pada kontroler untuk keluaran arus maksimum adalah sebesar 10.96 ampere seperti tertera pada tabel 5.8 di bawah ini.

Tabel 5.8 Hasil Pengolahan Data Axial Coreless Brushless DC Motor Dengan Pembatasan Torsi Maksimum 10 Nm.

Rpm	V in (volt)	Arus (I)	T (Nm)	P in	P rot	eff (%)
834.60	51.03	2.55	0.00	130.13	0.00	0.00
832.30	51.06	2.74	0.04	139.90	3.79	2.71
828.60	51.13	2.80	0.11	143.16	9.85	6.88
825.10	51.10	2.93	0.18	149.72	15.54	10.38
813.70	51.03	3.49	0.40	178.09	33.71	18.93
799.10	50.99	3.61	0.67	184.07	56.23	30.55
780.70	50.86	3.99	1.02	202.93	83.41	41.10
765.10	50.73	4.17	1.32	211.54	105.40	49.83
749.30	50.66	4.36	1.61	220.88	126.69	57.36
723.30	50.59	4.55	2.11	230.18	159.57	69.32
710.70	50.35	4.73	2.35	238.16	174.54	73.29
704.50	50.25	4.73	2.46	237.68	181.68	76.44
679.10	50.12	5.17	2.94	259.12	209.32	80.78
621.50	49.81	6.79	4.03	338.21	262.53	77.62
570.80	49.68	7.29	4.99	362.17	298.47	82.41
553.40	49.44	7.40	5.32	365.86	308.46	84.31
537.80	49.30	8.03	5.62	395.88	316.40	79.92
501.70	49.20	8.28	6.30	407.38	331.06	81.27
447.70	49.10	8.72	7.32	428.15	343.35	80.19
417.10	49.07	9.03	7.90	443.10	345.18	77.90
389.50	49.03	10.03	8.43	491.77	343.65	69.88
352.60	48.86	10.96	9.12	535.51	336.88	62.91
338.20	48.76	11.33	9.40	552.45	332.78	60.24
311.00	48.66	11.77	9.91	572.73	322.78	56.36
278.00	48.66	12.83	10.54	624.31	306.72	49.13
236.00	48.66	12.83	10.54	624.31	260.38	41.71
213.00	48.66	12.83	10.54	624.31	235.00	37.64
140.00	48.66	12.83	10.54	624.31	154.46	24.74
0.00	48.66	12.83	10.54	624.31	0.00	0.00

**GRAFIK SEBARAN TORSI, DAYA, DAN EFISIENSI vs RPM
PADA BATAS TORSI MAKSIMUM 10 Nm**



Gambar 5.12 Grafik Sebaran Daya, Torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 10 Nm

Pada gambar 5.12 grafik sebaran daya, torsi vs rpm pada pembatasan torsi maksimum 10 Nm diketahui bahwa torsi tersebut berada diatas dari setengah torsi maksimum motor listrik. Diketahui bahwa pada setengah torsi maksimumnya motor listrik berada pada daya output maksimumnya. Sehingga nampak pada grafik daya peaknya tidak terpengaruh begitu pula efisiensinya.. Sehingga nampak pada grafik daya *peaknya* sama ketika pembatasan torsi pada 8 Nm, 9 Nm, dan 10 Nm, namun pada karakteristik efisiensinya tidak mengalami perubahan yang berarti, dapat terlihat pada gradien garis efisiensinya hampir sama mulai dari saat putaran rendah sampai putaran saat torsi maksimumnya pada pembatasan torsi 8 Nm, 9 Nm, dan 10 Nm.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dalam hasil pengujian *Axial Coreless Brushless DC Motor* yang yang dikerjakan ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil desain dan rancang bangun *Axial Coreless Brushless DC Motor* memiliki daya *output rated* 345 watt tidak terlalu jauh dari target yang diharapkan yaitu 500 watt. Sesuai dengan dasar bahwa $P=V \times I$ dengan maksimum arus yang dimanfaatkan merupakan maksimum arus yang mampu dialirkan oleh kawat kumparan (coil).
2. Hasil desain dan rancang bangun *Axial Coreless Brushless DC Motor* memiliki efisiensi maksimum 84.31% pada kecepatan putar 553.4 rpm, dan torsi *peak* 15.85 N/m. Operasional *Axial Brushless DC Motor* ini dapat ditinjau pada setengah torsi maksimumnya sebagai acuan untuk menentukan *continous* torsi atau *rated torquena* adalah 7.95 Nm.
3. Untuk faktor keamanan motor listrik umumnya memiliki pembatasan pada torsi outputnya sebagai *rated torque*. Pemberian batasan pada output torsi *Axial Coreless Brushless DC Motor* mulai dari 6 Nm, 7 Nm, 8 Nm, 9 Nm, 10 Nm. Pengaruh batasan output torsi terhadap daya maksimum dan efisiensi sebagai berikut:

Tabel 6.1 Pengaruh Batasan Output Torsi Terhadap Daya Maksimum Dan Efisiensi

T maks (Nm)	P maks (watt)	Efisiensi maks (%)
6	332.2486	84.61
7	344.58	84.61
8	346.4192	84.61
9	346.4192	84.61
10	346.4192	84.61

Dari tabel diatas dapat disimpulkan bahwa pembatasan arus dibawah setengah dari torsi maksimum motor listrik akan mengakibatkan daya optimum motor listrik turun. Dan hasil dari pembatasan arus tidak mempengaruhi efisiensi maksimum motor, karena efisiensi maksimumnya berada kecepatan angular (rpm) yang lebih tinggi.

4. Saran pemilihan untuk pembatasan maksimum adalah pada pembatasan 8 Nm, karena pada torsi itu motor listrik sudah mencapai daya maksimumnya.

6.2 Saran

Beberapa hal yang dapat disarankan untuk kelanjutan dan pengembangan Axial Coreless Brushless DC Motor yang telah dikerjakan ini adalah:

1. Hasil rancang bangun *Axial Coreless Brushless DC Motor* memiliki daya output maksimum 345 watt dari target 500 watt yang diharapkan. Untuk memenuhi hal tersebut maka yang harus dilakukan dengan menaikkan operasional *controler*, yang secara teoritis akan meningkatkan daya

sesuai dengan persamaan dasar $P=V \times I$. Daya output maksimum didapat pada 49.07 volt dan 9.03 amper, pada efisiensi 77.9%. Maka untuk tegangan dinaikkan pada $V = (500 / 77.9\%) / 9.03 = 71.09$ volt.

2. Diperlukan penggunaan material kumparan yang lebih baik untuk mengurangi hambatan dalam dan optimalisasi flukx electromagnet yang terbentuk.
3. Diperlukan control motor listrik yang bisa *disetting* dan dipantau agar lebih memudahkan dalam meninjau kondisi motor listrik dan untuk optimalisasi daya.

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

DAFTAR PUSTAKA

- Gieras J., Wang R., Kamper J., 2008. **Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines**, Springer.
- Şahin F., 2001. **Design and Development of a High Speed Axial Flux Permanent Magnet Machine**, Technische Universiteit Eindhoven.
- Fitzgerald E., Kingsley Jr., Umans D., 1998. **Electric Machinery**, McGraw-Hill.
- Chen Y., Pillay P., 2002. **An Improved Formula for Lamination Core Loss Calculations in Machines Operating with High Frequency and High Flux Density Excitation**, IEEE Industry Applications Conference.
- Sitapati K., Krishnan R., 2000. **Performance Comparisons of Radial and Axial Field Permanent-Magnet Brushless Machines**, Industry Applications Conference.
- Cavagnino A., Lazzari M., Profumo F., Tenconi A., 2002. **A Comparison Between the Axial Flux and the Radial Flux Structures for PM Synchronous Motors**, IEEE Transactions on Industry Applications.
- Muljadi E., Green J., 2002. **Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind Turbine Generator**, American Society of Mechanical Engineers Wind Energy Symposium, Nevada
- Colton, Shan, 2010, **Design and Prototyping Methods for Brushless Motors and Motor Control**, Massachusetts Institute of Technology.

www.energyefficiencyasia.org

www.allaboutcircuits.com

www.open-sport.org

www.goedn.com

www.digikey.com

www.google.com

RIWAYAT PENULIS



Hudha Rencana Panjaitan Sakti Wengi merupakan nama lengkap dari penulis tugas akhir ini. Penulis yang terlahir di Lamongan pada 13 januari 1990 ini merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Rasin dan Warti. Penulis memulai pendidikan formal di TK Pertiwi kemudian melanjutkan ke SD Negeri 3 Mojorejo. Setelah lulus tahun 2002 penulis melanjutkan ke SMP Negeri 1 Modo Lamongan dan

kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 1 Babat Lamongan pada tahun 2005. Setelah menyelesaikan studi tingkat menengah atas, penulis menempuh pendidikan di Jurusan Teknik Mesin FTI ITS Surabaya pada tahun 2008. Penulis mengambil bidang studi Teknik Produksi khususnya pada lab. Industrial System Automation.

Selama masa kuliah penulis aktif dengan berbagai kegiatan riset dan lomba. Penulis pernah juara 2 *Nasional Innovation Contest 2011, Futuristic Vehicle Competition*, pernah mengikuti *Shell Eco Marathon Asia 2012, Shell Eco Marathon Asia 2013 dan World Solar Challenge 2014*. Selain riset penulis juga aktif mengikuti organisasi Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM). Pada tahun perdana di LBMM menjadi staff pada divisi HRD.

Untuk informasi dan masukan dapat menghubungi penulis melalui email hudharencana@gmail.com

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN