



TUGAS AKHIR - TM091486

**RANCANG BANGUN DAN UJI PERFORMA AXIAL
BRUSHLESS DC MOTOR DENGAN DAYA OUTPUT
2000 WATT**

AGUS NURTRIARTONO
2109100076

Dosen Pembimbing
Dr. Muhammad Nur Yuniarto, ST

PROGRAM STUDI SARJANA
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2014



TUGAS AKHIR - TM091486

**DESIGN AND PERFORMANCE TEST AXIAL BRUSHLESS
DC MOTOR WITH OUTPUT POWER 2000 WATT**

AGUS NURTRIARTONO
2109100076

Faculty Advisor
Dr. Muhammad Nur Yuniarto, ST

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2014

**HALAMAN PENGESAHAN
TUGAS AKHIR (TM141585)**

**RANCANG BANGUN DAN UJI PERFORMA AXIAL
BRUSHLESS DC MOTOR DENGAN DAYA OUTPUT
2000 WATT**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik pada : Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Disusun Oleh :
AGUS NURTRIARTONO
NRP. 2109100076

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Muhammad Nur Yuniarto (Pembimbing)
NIP. 197506301998021001
2. Dr. Eng Sutikno, ST, MT (Penguji I)
NIP. 197407032000031001
3. Indra Sidharta, ST, MSc (Penguji II)
NIP. 198006192006041004
4. Wahyu Wijanarko, ST, MSc (Penguji III)
NIP. 198202092012121001

SURABAYA
Januari 2015

Rancang Bangun dan Uji Performa *Axial BLDC Motor* dengan Daya Output 2000 Watt

Nama Mahasiswa : Agus Nurtriatono
NRP : 2109 100 076
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Muhammad Nur Yuniarto

ABSTRAK

Sejak tahun 1980-an konsep baru tentang *permanent magnet brushless motor* telah berkembang. Isu pemanasan global dan penghematan Bahan Bakar Minyak (BBM) merupakan faktor pemicu berkembangnya motor listrik. Motor DC konvensional sudah dikenal efisien dan bebas polusi, namun diperlukan pengembangan maupun perancangan motor listrik baru untuk mendapatkan performa motor listrik yang lebih baik.

Berkembangnya motor listrik dc konvensional yang menggunakan transmisi mekanik yang berupa sikat (*brush*) terbuat dari arang (*carbon*) yang memerlukan pergantian berkala untuk umur pemakaian tertentu. Kekurangan itu diatasi oleh *Brushless DC motor* yang beroperasi tanpa transmisi mekanik. *Brushless DC motor* adalah motor dengan magnet permanen dimana fungsi sikat (*brush*) digantikan oleh sensor yang berfungsi sebagai penentu orientasi Bergeraknya motor listrik. *Brushless DC motor* tidak hanya memiliki efisiensi yang tinggi namun tidak membutuhkan perawatan. *Brushless DC motor* terdapat 2 tipe yaitu, *Brushless DC motor tipe radial* dan *Brushless DC motor tipe axial*. Namun *Brushless DC motor tipe radial* memiliki kekurangan. *Radial Brushless DC motor* memiliki berat yang lebih berat dibanding *Axial brushless DC motor* dengan daya yang sama dan dengan bentuk *radial* akan lebih berat jika di paralel untuk menghasilkan daya yang besar. Dari kekurangan *Brushless DC motor tipe radial* diatas, dirancang *Axial brushless DC motor*.

Tugas akhir ini menghasilkan *Axial Brushless DC Motor* dengan konstruksi satu stator dan dua rotor. *Axial Brushless DC Motor* ini terdiri dari 24 slot stator dan 20 pole magnet pada tiap rotornya. Pada uji performa *Axial Brushless DC Motor* ini didapatkan efisiensi maksimal sebesar 95%, power output rated sebesar 1100 watt, dan torsi rated sebesar 3,8 Nm pada rpm 2790 dengan menggunakan controller IQUTECH.

Kata kunci: *Axial Brushless DC Motor*, rancang bangun motor listrik, uji performa motor listrik

Design and Test Performance of Axial BLDC Motor with Power Output 2000 Watt

Name : Agus Nurtriatono
NRP : 2109 100 076
Department : TeknikMesin FTI-ITS
Faculty Advisor : Dr.M.NurYuniarto

ABSTRAK

Since the 1980s a new concept of permanent magnet brushless motors has evolved. The issue of global warming and saving fuel oil is a trigger factor development of electric motors. Conventional DC motors are well known efficient and pollution-free, but required the development and design of new electric motors for performance electric motor better.

The development of a conventional dc electric motor that uses a mechanical transmission in the form of a brush from carbon which require periodic replacement for a certain service life. Shortcomings were overcome by a Brushless DC motors that operate without mechanical transmission. Brushless DC motors are motors with permanent magnet in which the function of the brush is replaced by a sensor that functions as a determinant of the orientation of the movement of the electric motor. Brushless DC motors not only have a high efficiency but does not require treatment. Brushless DC motors are two types, namely, Brushless DC motors radial and axial type Brushless DC motors. However Brushless DC motors radial type has its drawbacks. Radial Brushless DC motors have a heavier weight than the Axial brushless DC motors with the same power and the radial shape will be more severe if in parallel to generate great power. Brushless DC motors of deficiency above the radial type, designed Axial brushless DC motors.

This final project resulted in Brushless DC Motor with Axial construction of the stator and the two rotors. Axial Brushless DC Motor is comprised of 24 slots and 20 pole stator magnets on each rotor. In the test performance Brushless DC Motor Axial is obtained maximum efficiency of 95%, the rated power output is 1100 watts, and the rated torque is 3.8 Nm at 2790 rpm using a controller IQUTECH.

Keyword: Axial Brushless DC Motor, rancang bangun motor listrik, uji performa motor listrik

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena atas anugerah, berkah dan hidayah-Nya laporan Tugas Akhir yang berjudul “Rancang Bangun dan Uji Performa *Axial BLDC Motor* dengan Daya Output 2000 Watt” ini dapat diselesaikan.

Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Bapak Dr. Muhammad Nur Yuniarto selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan, bimbingan serta pelajaran selama pembuatan dan penyelesaian mobil juga selama perlombaan berlangsung.
2. Orangtua serta seluruh keluarga yang telah banyak memberikan dukungan moral.
3. Seluruh tim *ITS Solar Car Racing Team* dan tim *Molina ITS* yang telah banyak membantu dalam pembuatan Tugas Akhir ini.
4. Octavia Setya yang telah memberi dukungan dan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih belum sempurna, baik dari analisis yang penulis lakukan maupun dalam penulisan laporan. Semoga laporan ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca pada umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, 14 January 2014

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pendahuluan.....	5
2.2 Konstruksi Motor DC Brushless	6
2.3 Bagian-Bagian Brushless DC Motor.....	9
2.3.1 Stator.....	9
2.3.2 Rotor	12
2.3.3 Core.....	13
2.3.4 Hall Sensor.....	15
2.3.5 Phase Commutation	16
2.4 Prinsip Kerja Rangkaian Kontrol Motor DC Brushless 3 Fasa.....	17
2.5 Penelitian sebelumnya	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Umum	22
3.2. Peralatan Penelitian.....	25
3.3 Perancangan Axial Brushless DC Motor	25
3.3.1 Basic Study Literature.....	25
3.3.2 Motor Design	26
3.3.2.1 Mechanical Design.....	26
3.3.2.2 Synchronization control	30

3.4. Pengujian Efisiensi Axial Flux Brushless DC Motor	31
3.4.1 Pengujian Unjuk Kerja Mesin.....	31
3.5 Analisa dan Kesimpulan	34
BAB IV RANCANG BANGUN DAN ANALISA DATA UNJUK KERJA AXIAL BRUSHLESS DIRECT CURENT (DC) MOTOR	
4.1. Penentuan Spesifikasi Motor	35
4.1.1 Perhitungan Kebutuhan Arus	36
4.1.2 Inisialisasi Awal Dimensi motor.....	38
4.2 Proses Pembuatan Motor	39
4.2.1 Proses Desain	39
4.2.2 Pembuatan stator.....	41
4.2.3 Pembuatan rotor	47
4.2.3 Pembuatan rotor	48
4.3 Perhitungan Unjuk Kerja <i>Axial Brushless DC Motor</i>	49
4.3.1 Data Unjuk Kerja <i>Axial Brushless DC Motor</i>	49
4.3.2 Perhitungan Unjuk Kerja <i>Axial Bushless DC Motor</i>	51
4.4 Analisa Unjuk Kerja <i>Axial Brushless DC Motor</i>	55
4.4.1. Analisa Daya.....	55
4.4.1.1. Analisa Daya konsumsi Input	55
4.4.1.2. Analisa Daya Output Efektif Motor Listrik.....	57
4.4.2 Analisa Torsi.....	59
4.4.3 Efisiensi Motor Listrik.....	61
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	63
5.2 Saran	66
DAFTAR PUSTAKA	69

DAFTAR TABEL

Tabel 1 <i>Combination Of Numbers Slot And Pole With Balanced Concentration Winding</i>	36
Tabel 2 Kemampuan Hantar Arus	37
Tabel 3 pengaruh kadar resin pada core terhadap kuat medan magnet	43
Tabel 4 pengujian <i>Axial Flux PM DC Motor</i> dengan controller MITSUBA	50
Tabel 5 pengujian <i>Axial Brushless DC Motor</i> dengan controller IQUTECHE	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Motor Brushless DC.....	2
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 dan (b) Stator dan Rotor Ganda	7
Gambar 2.4 The axial flux motor design.....	8
Gambar 2.5 Konfigurasi Listrik Stator (Tiga Tahap, Tiga Kumparan).....	9
Gambar 2.6 Rotor Motor Listrik Axial	12
Gambar 2.7 Magnet Neodymium Trapesium.....	13
Gambar 2.8 core pada Axial BLDC Motor	14
Gambar 2.9 Grafik Hysteresis core	15
Gambar 2.10 Sensor Hall Sensor	16
Gambar 2.11 Logic Sederhana Komutasi pada 3 Phase	16
Gambar 2.12 Rangkaian Kontrol Sederhana Komutasi pada 3 Phase	17
Gambar 2.13 Posisi Urutan Gerak Motor DC Brushless 3 Fase.....	18
Gambar 2.14 Stator dan Rotor Axial coreless Brushless yang diassembly.....	21
Gambar 3.1 Flowchart Perancangan, pembuatan dan pengujian Axial Brushless DC Motor.....	24
Gambar 3.2 Gambar Perancangan dan Ukuran dasar Axial BLDC Motor.....	28
Gambar 3.3 Gambar Perancangan dan Ukuran dasar stator Axial BLDC Motor.....	29
Gambar 3.4 Gambar Perancangan dan Ukuran dasar Rotor Axial BLDC Motor.....	30

Gambar 3.5 Skema Pengujian.....	32
Gambar 4.1.Penampang Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor.....	38
Gambar 4.2 Gambar Desain <i>Axial Brushless DC Motor</i>	40
Gambar 4.3 Gambar Part Bagian Stator Motor	40
Gambar 4.4 Gambar Part Casing dan Pattern Magnet Rotor	41
Gambar 4.5 Grafik pengaruh kadar resin pada core terhadap kuat medan magnet.....	43
Gambar 4.6 Alat Untuk Menggulung Kumparan danKumparan dengan Armature	46
Gambar 4.7 Stator Axial Brushless DC Motor dan Kumparan	47
Gambar 4.8 phase commutation dengan picoscope dan Axial Brushless DC Motor	48
Gambar 4.9 Grafik efisiensi generator	53
Gambar 4.10 generator STC-3	53
Gambar 4.11 Grafik hubungan antara power input terhadap rpm motor pada controller Mitsuba dan controller Iquteche.	56
Gambar 4.12 Grafik hubungan antara power output terhadap rpm motor pada controller Mitsuba dan controller Iquteche.	58
Gambar 4.13 Grafik hubungan antara torsi terhadap rpm motor pada controller Mitsuba dan controller Iquteche.	60
Gambar 4.14 Grafik hubungan antara efisiensi terhadap rpm pada controller Mitsuba dan controller Iquteche	61
Gambar 5.1 Grafik hubungan antara efisiensi terhadap rpm pada controller Iquteche.....	64

Gambar 5.2 Grafik hubungan antara power output terhadap rpm pada controller Iquteche	64
Gambar 5.3 Trendline grafik hubungan antara power output terhadap rpm	65
Gambar 5.3 Grafik hubungan antara torsi terhadap rpm pada controller Iquteche	66

BIODATA PENULIS



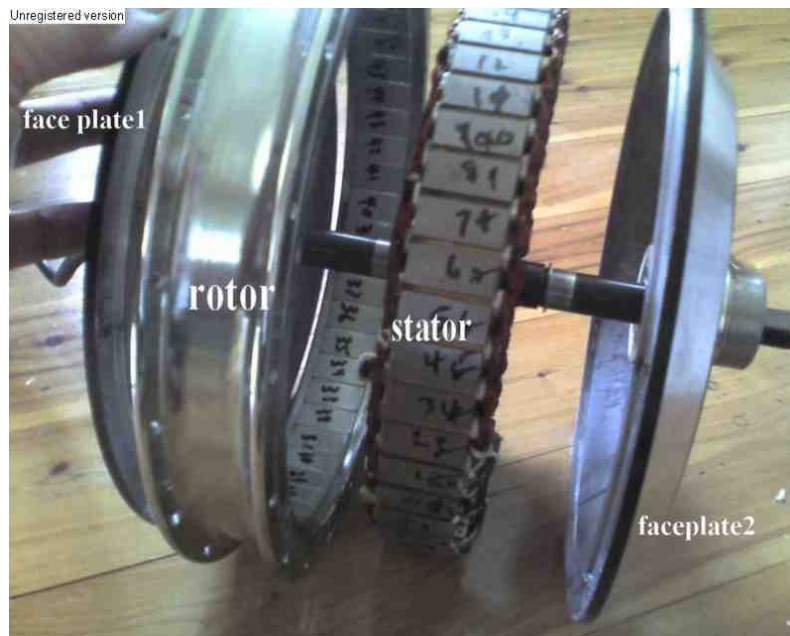
Agus Nurtriartono dilahirkan di Balikpapan, 14 Agustus 1991. Anak ketiga dari Djamil dan Sutini. Penulis menyelesaikan masa studi sekolah dasar di SDN 008 Balikpapan pada tahun 2003, dilanjutkan ke SMP YASPORBI 2 Jakarta pada tahun 2006 dan SMAN 28 Jakarta lulus pada tahun 2009.

Selepas SMA penulis melanjutkan studinya di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Mesin pada tahun ajaran 2009/2010. Selama kuliah di ITS penulis aktif mengikuti organisasi Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin. Tidak hanya itu penulis juga telah bergabung dalam tim mobil surya ITS yang telah berkompetisi di Australia pada *World Solar Challenge 2013* serta turut aktif dalam tim Molina (Mobil Listrik Nasional) ITS. Di teknik mesin penulis memilih untuk masuk Laboratorium Otomasi dan mengerjakan tugas akhir dengan topic Rancang Bangun dan Uji Performa motor listrik dibawah bimbingan Dr. Muhammad Nur Yuniarto. Pada tahun 2015 penulis menyelesaikan studi S1-nya

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Sejak tahun 1980-an konsep baru tentang permanent magnet brushless motor telah berkembang. Isu pemanasan global dan penghematan Bahan Bakar Minyak (BBM) merupakan faktor pemicu berkembangnya motor listrik. Berkembangnya motor listrik dc konvensional yang menggunakan transmisi mekanik yang berupa sikat (*brushed*) terbuat dari arang (carbon) yang memerlukan pergantian berkala untuk umur pemakaian tertentu. Kekurangan itu diatasi oleh *Brushless DC motor* yang beroperasi tanpa transmisi mekanik (Gambar 1.1). *Brushless DC motor* adalah motor dengan magnet permanen dimana fungsi sikat (brush) digantikan oleh sensor yang berfungsi sebagai penentu orientasi Bergeraknya motor listrik. *Brushless DC motor* tidak hanya memiliki efisiensi yang tinggi namun tidak membutuhkan perawatan.



Gambar 1.1 Motor Brushless DC
(www.electricbike.com)

Brushless DC motor terdapat 2 tipe yaitu, *Brushless DC motor* tipe radial dan *Brushless DC motor* tipe axial. Namun *Brushless DC motor* tipe radial memiliki kekurangan. *Radial Brushless DC motor* memiliki berat yang lebih berat dibanding *Axial brushless DC motor* dengan daya yang sama dan dengan bentuk radial akan lebih berat jika di paralel untuk menghasilkan daya yang besar. Dari kekurangan *Brushless DC motor* tipe radial diatas, dirancang *Axial brushless DC motor*. Salah satu program pengembangan *Axial Brushless DC motor* untuk prototype mobil surya Widya Wahana V yang akan diikuti pada perlombaan World Solar Challenge 2015 di Australia.

1.2 Perumusan Masalah

Tugas akhir ini berfokus pada mendesain *Axial Brushless DC motor*. Rumusan masalah dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana mendesain *Axial Brushless DC motor* dengan daya output 2000 Watt dan efisiensi 90%?

1.3 Batasan Masalah

Agar tugas akhir ini sesuai dengan tujuan penelitian maka diperlukan batasan-batasan masalah sebagai berikut :

1. Perancangan *Axial Brushless DC Motor* dengan daya output 2000 watt dengan permanen magnet

1.4 Tujuan Permasalahan

1. Mendesain, membuat, dan menguji motor *Axial Brushless DC Motor* dengan daya output 2000 Watt dan efisiensi 90%.

1.5. Manfaat Penulisan

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

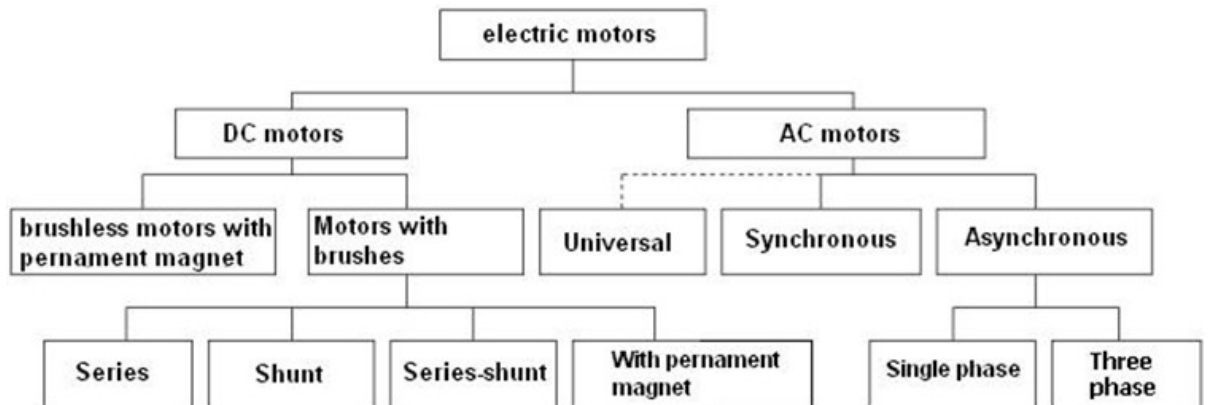
1. Memberikan informasi kepada masyarakat luas terkait tentang *Axial Brushless DC Motor*.
2. Mampu meningkatkan potensi dari *Axial Brushless DC Motor* dibandingkan *Brushless DC Motor* konvensional yang umumnya berstruktur radial.
3. Sebagai acuan dari penelitian yang lebih lanjut.

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 TINJAUAN PUSTAKA

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.



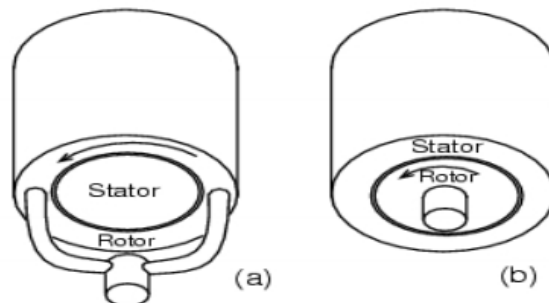
Gambar 2.1 Klasifikasi dan Jenis Motor Listrik
(www.il5.p.lodz.pl)

Motor listrik jenis AC menggunakan prinsip induksi pada langkah kerjanya, memiliki masalah pada saat starting. Berbeda halnya dengan motor DC, perkembangan motor DC diawali oleh *Brushed DC motor*.

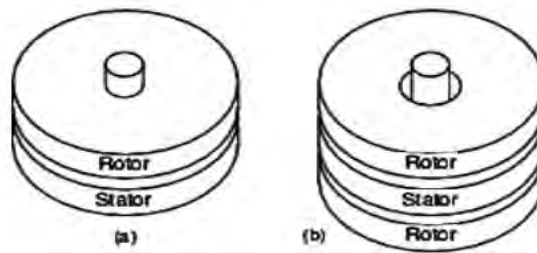
Brushed Motor DC yang menggunakan sikat untuk mengalirkan arus ke rotor seringkali menimbulkan masalah yaitu ausnya ‘sikat’. Maka dikembangkan motor listrik DC tanpa sikat atau *Brushless DC Motor* yang mempunyai kelebihan yaitu efisiensi tinggi, umur yang panjang, konsumsi energi yang kecil.

2.2 Konstruksi Motor DC Brushless

Bentuk konstruksi yang umum pada *Brushless DC motor* 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

Axial flux brushless DC motor memiliki medan magnetik aksial searah sumbu putarnya. Motor jenis pancake dengan dua buah rotor (gambar 2.3 b). Sedangkan ada yang satu stator dan satu rotor (gambar 2.3 a).

Karakteristik dan keistimewaan dari desain *axial flux* BLDC antara lain:

- Dengan power yang sama *axial flux* BLDC memiliki berat yang lebih ringan dibandingkan dengan yang radial BLDC.
- fluks magnet yang dihasilkan memiliki arah aksial terhadap sumbu mesin sehingga gaya yang diterima bantalan motor lebih minim sehingga lifetime bantalan lebih panjang.
- Dengan sistem join paralel seharusnya sanggup menghasilkan daya yang besar dengan dimensi motor yang lebih kecil.
- Field medan magnet lebih besar sehingga torsi yang dihasilkan lebih besar dibanding motor dc yang lain dengan daya yang sama.



Gambar 2.4 The axial flux motor design
(www.endles-sphere.com)

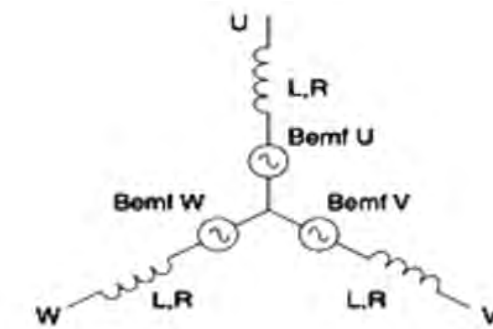
Pada lomba internasional seperti *World Solar Challenge* di Australia disuatu kondisi mobil membutuhkan power dan torsi yang cukup besar untuk menggerakkan mobil sapu angin surya, pada sisi inilah penggunaan *axial flux brushless motor* DC sangat tepat untuk mendapatkan power dan torsi yang cukup besar.

2.3 Bagian-Bagian Brushless DC Motor

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

2.3.1 Stator

Stator *Brushless DC motor* tiga fasa pada dasarnya memiliki tiga gulungan. Kebanyakan *Brushless DC motor* jumlah kumparan direplikasi untuk memenuhi karakteristik dari torsi yang akan di hasilkan. Gambar 2.4 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.



Gambar 2.5 Konfigurasi Listrik Stator (Tiga Tahap, Tiga Kumparan)
(www.muhammadluthfil23.blogspot.com)

Jumlah lilitan dapat dihitung berdasarkan berapa kuat medan magnet yang akan dihasilkan oleh armature core. Dengan menentukan target torsi akan mendapatkan informasi untuk menghitung kuat medan magnet yang harus dihasilkan oleh armature core. Setelah mendapatkan kuat medan magnet maka dapat dihitung jumlah lilitan minimum. Seperti persamaan di bawah

$$T = F \times r$$

$$F = T/r$$

Dimana

T= Torsi target (Nm)

F = Gaya pada saat torsi target (gaya tolak menolak medan magnet) (N)

r = Jari-jari (m)

Selanjutnya menghitung gaya tolak menolak pada setiap slot stator saat motor berputar. Pada saat motor berputar slot yang aktif sebanyak 16 slot maka gaya tolak menolak tiap slot dapat dihitung

$$F \text{ tiap slot} = F/16$$

Setelah mengetahui gaya tolak menolak pada tiap slot kita dapat menghitung kuat kutub medan magnet pada tiap slot dengan menggunakan persamaan gaya tolak menolak medan magnet

$$F = (k.m_1.m_2)/r^2$$

$$m_1 = (F.r^2)/k.m_2$$

Dimana

F = Gaya tolak menolak pada tiap slot (N)

k = Konstanta

m₁ = Kuat kutub medan magnet pada stator

m₂ = Kuat kutub medan magnet pada magnet

r = Jarak antara stator dan magnet (m)

dari persamaan di atas maka kita akan mendapatkan m₁, setelah itu kita dapat menghitung gaya Lorentz dengan persamaan di bawah ini

$$F = H.m$$

Dimana

H = Kuat medan magnet saat I maksimum (T)

F = gaya Lorentz yang dihasilkan (N)

m = kuat kutub medan magnet pada stator

dari gaya Lorentz di atas, kuat medan magnet yang harus dihasilkan oleh tiap slot stator dengan persamaan di bawah ini

$$F = B I l$$

$$B = F/I.l$$

Dimana

F = gaya Lorentz (N)

B = Kuat medan magnet (T)

l = Panjang lilitan

setelah kuat medan magnet didapat maka kita dapat menghitung jumlah lilitan minimum dengan persamaan

$$B = (\mu_0 . I . N) / 2a$$

$$N = (B . 2a) / I . \mu_0$$

Dimana

B = Kuat medan magnet (T)

μ_0 = Permeability core

I = Arus

a = jari-jari lilitan

N = jumlah lilitan

2.3.2 Rotor

Rotor pada *Brushless DC motor* terdiri dari beberapa magnet permanen. Jumlah kutub magnet di rotor juga mempengaruhi ukuran langkah dan torsi dari motor. Magnet permanen terdiri dari 4, 5 bisa 8 pasang kutub atau lebih seperti pada gambar 2.5.



Gambar 2.6 Rotor Motor Listrik Axial
(endless-sphere.com)

Magnet yang digunakan pada *axial Brushless DC motor* ini yaitu jenis neodymium (gambar 2.7). Neodymium Magnet merupakan magnet tetap yang paling kuat Magnet neodymium (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet Neo), merupakan sejenis magnet langka-bumi, terbuat dari campuran logam neodymium, besi, dan boron yang membentuk struktur kristal $Nd_2Fe_{14}B$ tetragonal.



Gambar 2.7 Magnet Neodymium Trapezium
(www.hissupplier.com)

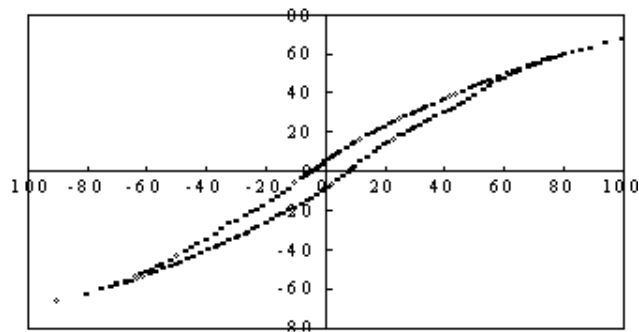
2.3.3 Core

Core pada motor listrik dc axial berfungsi sebagai penghasil fluks maksimum (gambar 2.8). Core merupakan sebagai media untuk menghasilkan gaya *ferromagnetic* yang biasanya menggunakan bahan besi lunak. Besi lunak banyak digunakan sebagai inti (core) dari induktor yang disebut ferit. Ada bermacam-macam bahan ferit yang disebut ferromagnetik. Besi lunak memiliki sifat magnet-magnet elementer yang mudah diatur, tetapi juga lebih mudah berubah susunannya. Itulah sebabnya besi sangat mudah dijadikan magnet, akan tetapi juga sangat mudah kehilangan sifat magnetnya Jadi kemagnetan besi bersifat sementara. Core armature dibuat dari serbuk besi murni dengan kadar Fe 99% yang dicampur dengan epoxy untuk komposit karbon sebagai bondingnya. Campuran

serbuk besi dan resin ini menggunakan kadar resin sebesar 14% dari total berat campuran serbuk besi dan resin.



Gambar 2.8 Core pada Axial BLDC Motor
(www.endless-sphere.com)



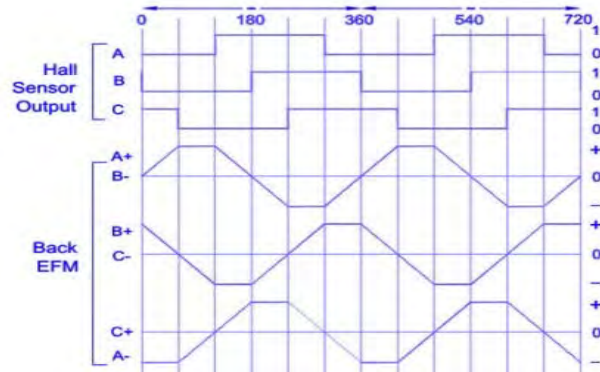
Gambar 2.9 Grafik Hysteresis
(<http://mulyonoabdullah.wordpress.com>)

2.3.4 Hall Sensor

Untuk menentukan orientasi posisi rotor fungsi komutasi dilakukan oleh sensor, sensor yang digunakan bisa beragam. Misalkan *optical encoder*, *magnetic encoder* atau *hall effect magnetic sensor*. Motor DC brushless dilengkapi dengan tiga sensor *hall effect magnetic* yang ditempatkan dengan posisi tertentu, sebagaimana pada gambar 2.10. *hall effect magnetic sensor* akan berfungsi memberikan sinyal digital akibat adanya medan magnetik yang tegak lurus terhadap sensor. Sensor hall ini harus diletakkan sedekat mungkin dengan rotor magnet permanen untuk mendeteksi posisi kutub magnet pada rotor. Output hall akan akan dibaca oleh decoder. Dengan posisi tertentu sensor ini memiliki 6 komutasi logika yang berbeda, pergantian fase supply daya tergantung pada nilai-nilai sensor hall seperti pada gambar 2.11.



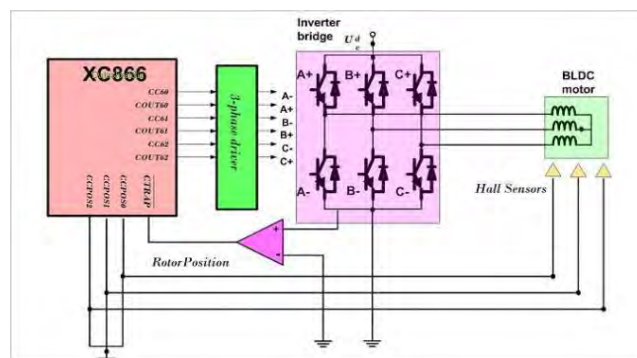
Gambar 2.10 Sensor Hall Sensor.
(www.goedn.com)



Gambar 2.11 Logic Sederhana Komutasi pada 3 Phase.
(www.instructables.com)

2.3.5 Phase Commutation

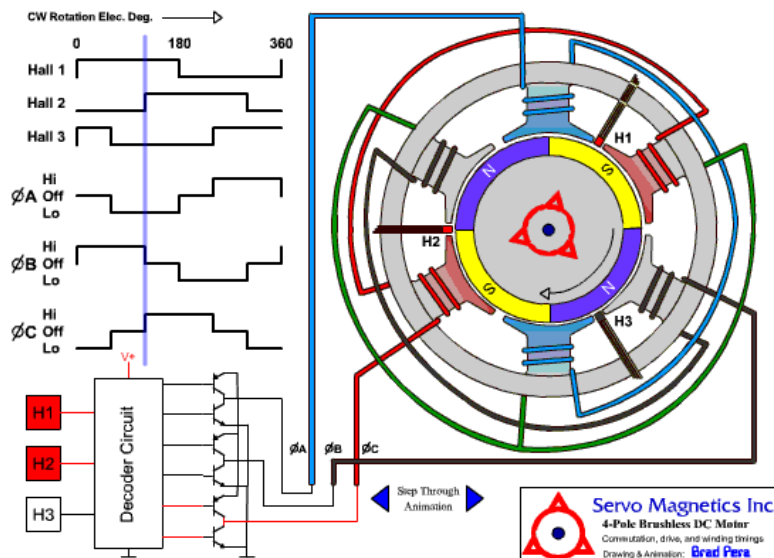
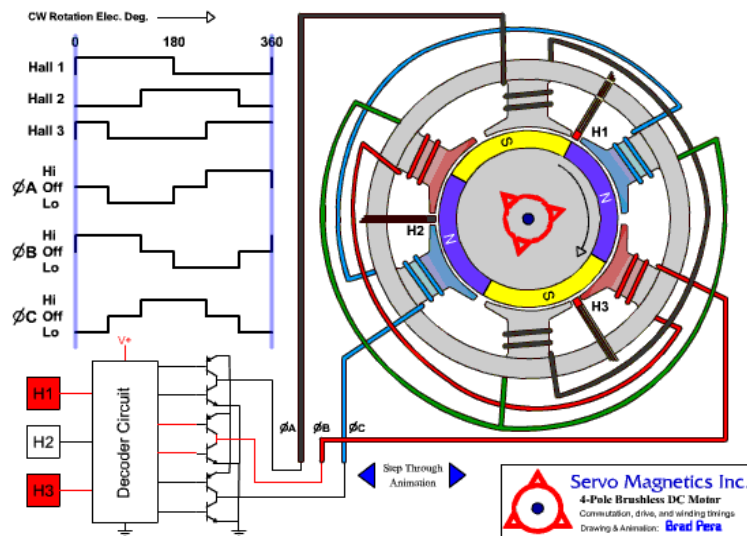
Rangkaian kontrol pada motor DC brushless selain sebagai pengontrol perpindahan arus juga sebagai pengarah rotasi rotor. Oleh karena itu, controller membutuhkan beberapa cara untuk menentukan orientasi rotor. Beberapa kontroler menggunakan rancangan efek hall sensor dan rotary encoder untuk menentukan posisi rotor. Kontroler motor listrik 3 fase berisi 3 fase bi-directional output, fase U, V, dan W. Untuk mendorong daya motor listrik DC ke tingkat yang lebih tinggi (meningkatkan kecepatan putarannya), dengan menggunakan rangkaian logika. kontroler sederhana menggunakan pembandingan untuk menentukan kapan fase output harus maju, sementara kontroler modern menggunakan mikrokontroler dengan logika tertentu, decoder akan mengatur switching transistor sehingga mendapatkan pola yang tepat pada tiap fase untuk mengelola akselerasi, kontrol kecepatan dan menyempurnakan efisiensi.

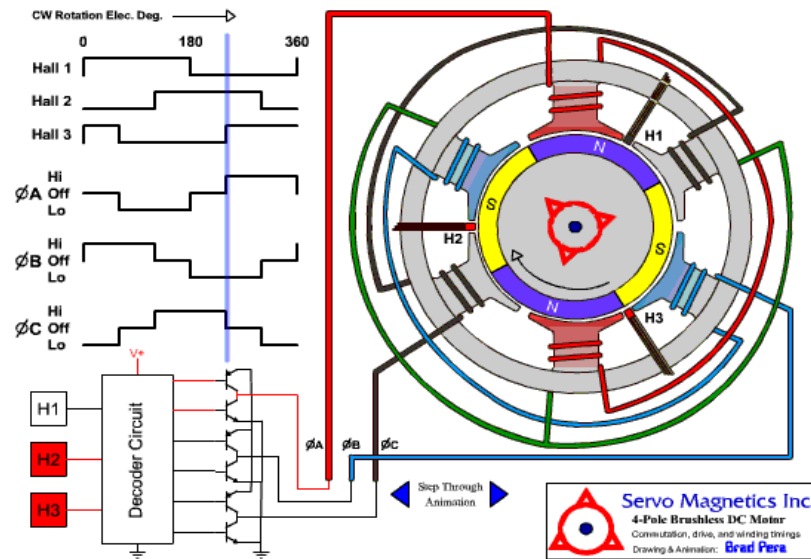


Gambar 2.12 Rangkaian Kontrol Sederhana Komutasi pada 3 Phase.
(www.datasheetdir.com)

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. Pada gambar 2.7 dibawah ini menunjukkan bahwa motor DC brushless tiga fasa 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 mendeteksi posisi kutub magnet rotor sesuai dengan urutan tertentu. Pada gambar yang pertama, H2 mendeteksi flux magnetik kutup selatan dan decoder mengaktifkan fase 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.





Gambar 2.13 Posisi Urutan Gerak Motor DC Brushless 3 Fase

Begitu seterusnya, 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.

2.5 Penelitian Sebelumnya

Penelitian mengenai BLDC Motor sudah banyak dilakukan, perkembangannya dilakukan baru-baru ini. Agar penelitian ini tidak dimulai dari awal, maka diperlukan studi literatur perkembangan BLDC Motor saat ini. Berikut beberapa referensi yang dapat dijadikan acuan dalam penelitian ini :

2.5.1 Hudha Rencana, Rancang Bangun dan Uji Performa Axial coreless BLDC motor.

Hudha Rencana meneliti motor axial BLDC coreless. Motor BLDC axial yang tidak menggunakan core pada statornya (gambar 2.14). Tugas akhir saudara Hudha bertujuan menghilangkan hambatan cogging, yang pada umumnya motor listrik konvensional masih menggunakan armature bersegmen-segmen dan meningkatkan potensi outputpower to weight ratio yang dimiliki Axial Brushless DC Motor dibandingkan Brushless DC Motor konvensional. Namun terdapat kekurangan dari motor axial BLDC coreless ini yaitu torsi yang dihasilkan masih kecil. Pada penelitian ini didapatkan hasil pengujian dari motor axial BLDC coreless yaitu torsi peak sebesar 1,61 N/m, memiliki efisiensi maksimum 93.73 % pada beban 600 watt pada kecepatan operasional 50 km/jam.

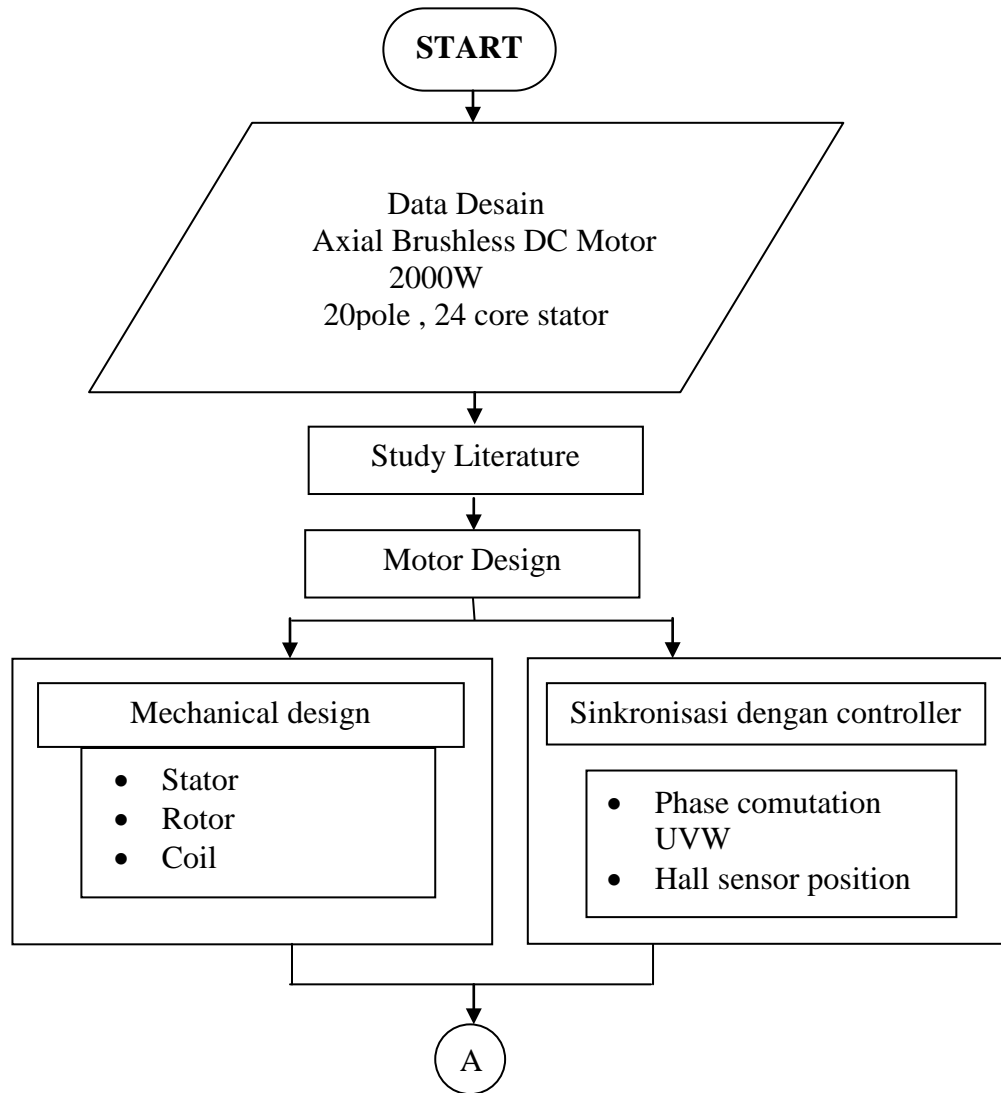


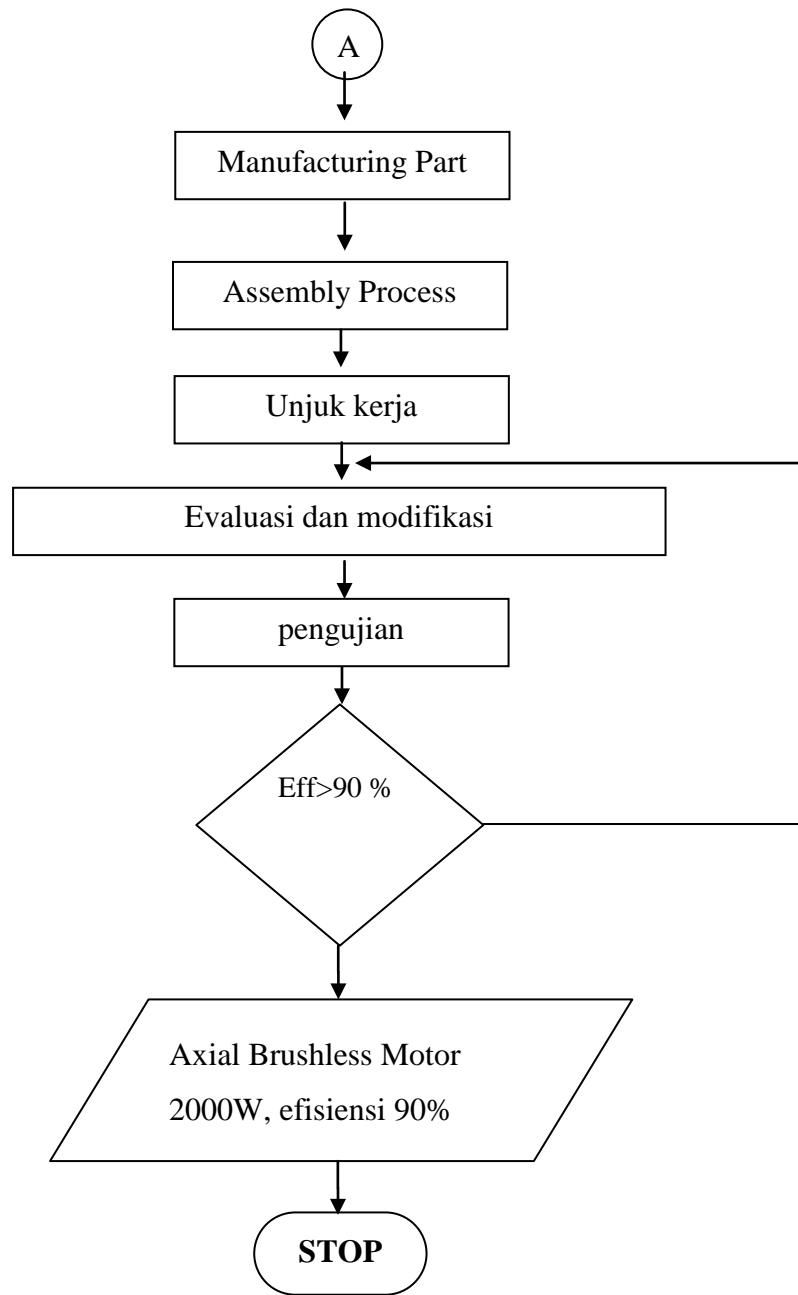
Gambar 2.14 Stator dan Rotor Axial coreless Brushless yang diassembly
(Tugas Akhir Hudha Rencana)

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:

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

- Dynamometer:
 - Merk : sportdevice
 - Tipe : inersia
 - Range Operasi : 0 – 50 hp

- 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 dua 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:

$$\begin{aligned} P &= T\omega_m = N_{ph}E_{ph}I_{ph} \Rightarrow T = \frac{P}{\omega_m} = \frac{N_{ph}E_{ph}I_{ph}}{\omega_m} \\ &= N_{ph}N_mN_{spp}K_wB_gn_sI_{ph}(R_0^2 - R_i^2) \\ &= N_{ph}N_mN_{spp}K_wB_gI_s(R_0^2 - R_i^2) \end{aligned}$$

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

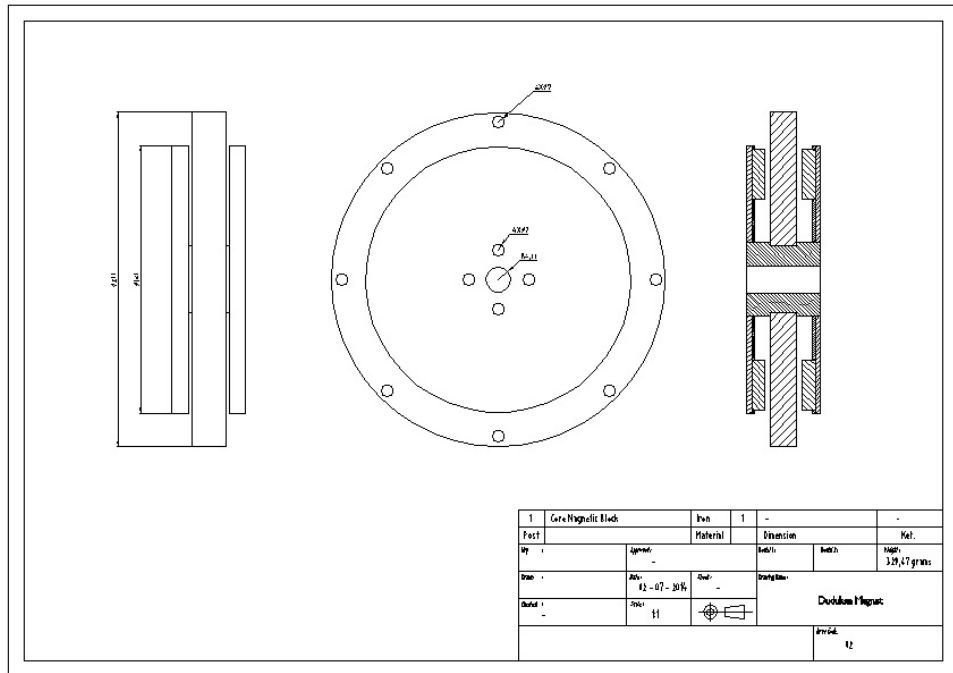
$$T = N_{ph} N_m N_{spp} K_w B_g I_s (R_o^2 - R_i^2 / 3)$$

$$= \frac{2N_{ph} N_m N_{spp} K_w B_g I_s R_o^2}{3} \Rightarrow R_o = \sqrt{\frac{3T}{2N_{ph} N_m N_{spp} K_w B_g I_s}}$$

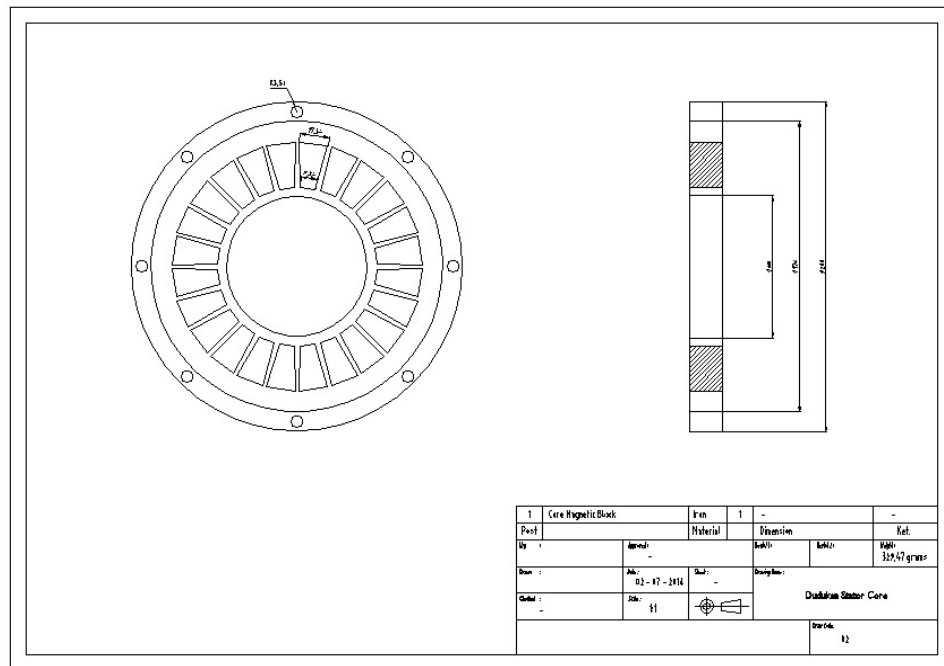
dimana:

- 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

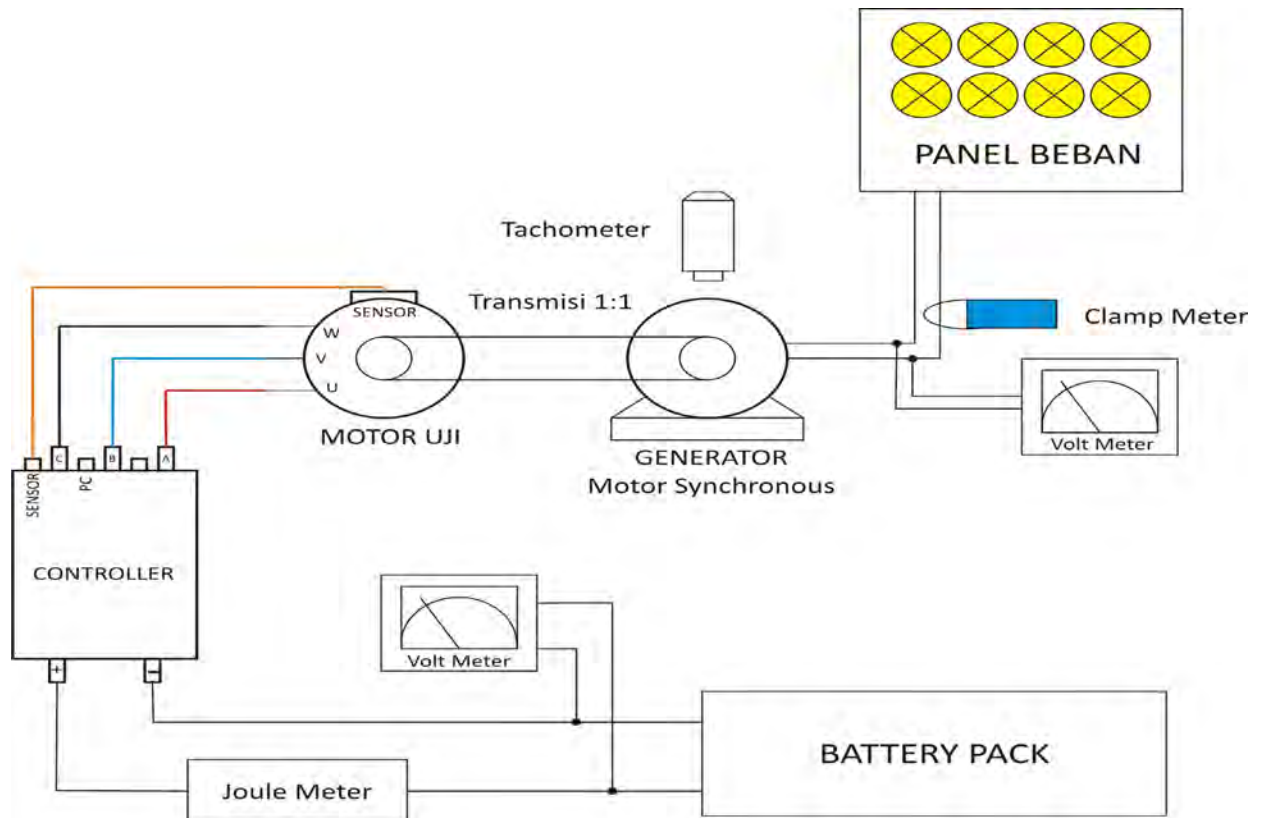
Dengan mengetahui radius luar, R_o radius bagian dalam dapat dihitung. Dimana nilai $N_m N_{spp} N_g I_s$ adalah konstan. N_m adalah jumlah kutub, N_g adalah besarnya air gap, N_{spp} adalah jumlah slot / kutub / fase dan K_w faktor untuk lilitan, I_s rapat arus B_g kerapatan fluks airgap.



Gambar 3.2 Gambar Perancangan dan Ukuran dasar Axial BLDC Motor .



Gambar 3.3 Gambar Perancangan dan Ukuran dasar stator Axial BLDC Motor.



Gambar 3.5 Skema Pengujian

2. Pengujian

- Mulai memakai roller dan mengaturbukaan throttle sampai mendapatkan yang rpm diinginkan.
- Pada setiap putaran motor listrik yang sudah stabil dilakukan pencatatan data pada Dynotest sebagai berikut :
 1. Putaran poros (rpm).
 2. Torsi.
 3. Daya.

3. Akhir Pengujian

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

4. Perhitungan Performa *Axial Brushless DC Motor*

Efisiensi motor dihitung dengan persamaan :

$$Eff(\%) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

dimana:

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

$$\begin{aligned}
 &= \frac{V}{t} \int_0^t I(t) dt \\
 &= V I \\
 P_{out} &= \frac{1}{t} \int_0^t (T_l \cdot \omega) dt
 \end{aligned}$$

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 :kecepatansudut(rad/s)

3.5 Analisa dan Kesimpulan

Setelah dilakukan pengujian, kemudian dilakukan analisa dan pembahasan dan diambil kesimpulan mengenai kemampuan *Axial Brushless DC Motor* ini.

BAB IV

RANCANG BANGUN DAN ANALISA DATA UNJUK KERJA AXIAL BRUSHLESS DIRECT CURENT (DC) MOTOR

4.1. Penentuan Spesifikasi Motor

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

- Daya = 2000 watt
- Tegangan operasional = 100 Volt
- Jumlah phasa = 3
- Faktor daya = 0,966
- Efisiensi (Target) = 0,9
- Torsi = 7 Nm di rpm 1900
- Daya Output = 1800 watt di rpm 1900

Dari data di atas kita bisa menentukan spesifikasi pendukung, baik secara mekanik maupun elektrik.

4.1.1 Perhitungan Kebutuhan Arus

Berdasarkan teori kelistrikan kenaikan daya beban motor akan sebanding dengan kenaikan arus listrik. Nilai faktor daya ($\cos\theta$) yaitu 0,966 berdasarkan tabel *Combination Of Numbers Slot And Pole With Balanced Concentration Winding*. Nilai efisiensi η ditentukan dengan nilai 0,9. Sehingga arus yang dibutuhkan jika dihubungkan dengan konfigurasi bintang dapat dihitung.

Tabel 1 *Combination Of Numbers Slot And Pole With Balanced Concentration Winding*

TABLE I
COMBINATION OF NUMBER OF SLOTS AND POLES WITH BALANCED CONCENTRATED WINDING

P \ S	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
3	0.866	0.866		0.866	0.866		0.866	0.866		0.866
6		0.866		0.866	0.866		0.866	0.866		0.866
9			0.866	0.945	0.945	0.866	0.945	0.945		0.945
12				0.866	0.966		0.966	0.966		0.866
15					0.866		0.866	0.866		0.866
18						0.866	0.945	0.945		0.945
21							0.866	0.932		0.953
24								0.866		0.966

$$I = 2000 / (100 \times 0,9 \times 0,966) = 23 \text{ A}$$

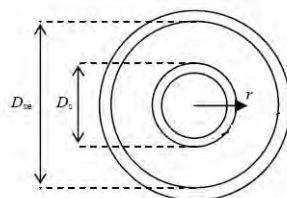
Apabila sudah diketahui arus yang dihitung mengalir ke stator maka kita bisa menentukan ukuran kawat tembaga yang akan digunakan dalam belitan stator. Untuk arus 23A digunakan kawat berlaminasi standart *American Wire Gauge* (AWG) yaitu kawat tembaga berlaminasi dengan ukuran diameter 1 mm.

Tabel 2 Kemampuan Hantar Arus (Igu Chainflex)

No	Diameter (mm)	Arus (Amper)
1	0,75	18
2	1	23
3	1,5	25
4	2,5	28
5	4	36
6	6	44
7	10	61
8	16	82
9	25	108
10	35	135
11	50	168
12	70	207
13	95	250
14	120	292

4.1.2 Awal Dimensi motor

Dalam rancang bangun sebuah motor listrik harus dihitung dimensi/ukuran dari beberapa bagian motor sebagai acuan untuk perhitungan selanjutnya. Gambar di bawah ini menunjukkan penampang stator ataupun rotor dari *Axial Flux Induction 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 4.1. Penampang Axial Flux Permanent Magnet 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 awal acuan ukuran harus ditentukan salah satu antara D_s atau D_{se} . Untuk membatasi luas permukaan maka ditentukan diameter terluar (D_{se}) adalah 15,6 cm atau 0,156m. Dengan demikian nilai D_s bisa kita dapatkan dari

$$K_d = D_s/D_{se} = 0.58$$

$$D_s = 0.58 \times 0.156 = 0.09048 \text{ m}$$

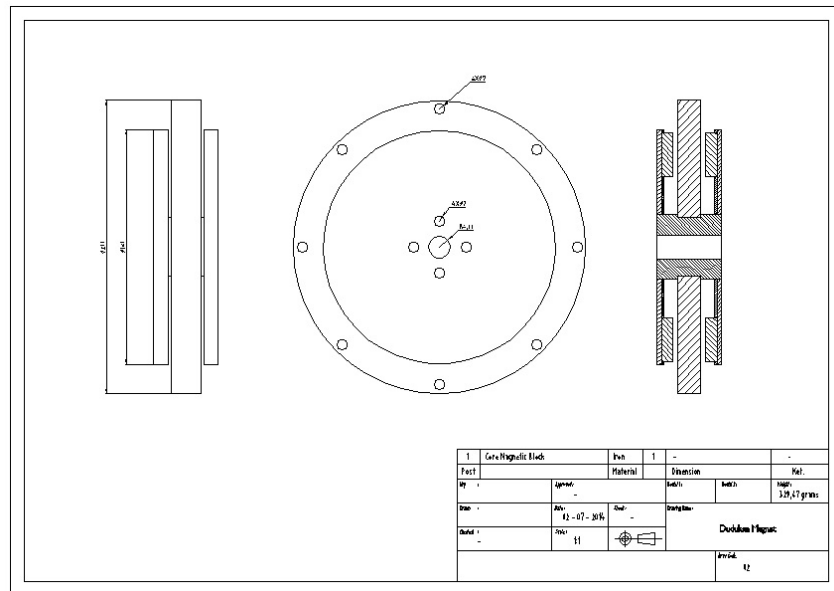
Maka dapatkan :

- Rin (jari jari dalam) = 0.5×0.09048 = 0.045 m
- Rout (jari jari luar) = $0,5 \times 0.156$ = 0.078 m
- Panjang core (l_e) = $0,078 - 0,09048$ = 0.033 m

4.2 Proses Pembuatan Motor

4.2.1 Proses Desain

Setelah spesifikasi motor *Axial Brushless DC Motor* didapatkan maka dilanjutkan dengan proses desain dengan software drawing. Berikut ini gambar susunan desain motor listrik axial flux.



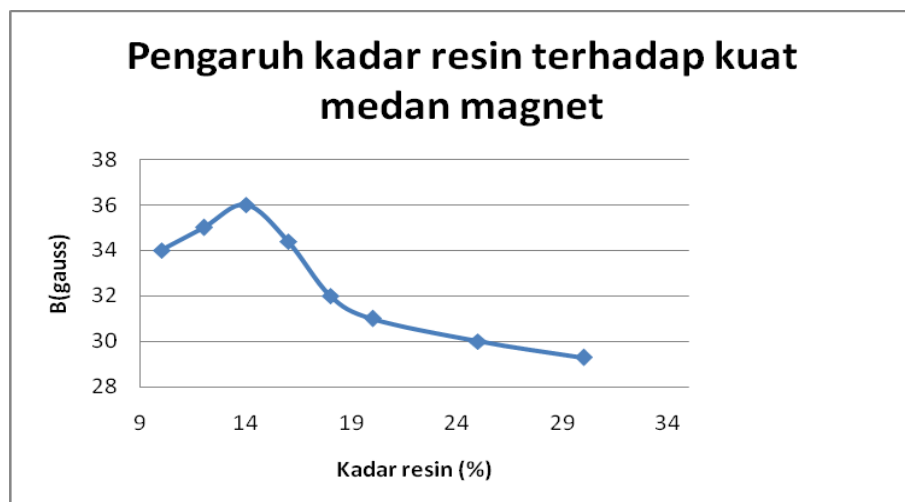
Gambar 4.2 Gambar Desain *Axial Brushless DC Motor*

gambar melalui software maka mesin akan beroperasi secara otomatis untuk bentuk yang diharapkan.

Selanjutnya adalah pembuatan *armature core*. *Armature core* dibuat dari serbuk besi murni dengan kadar Fe 99% yang dicampur dengan resin carbon fiber sebagai bindingnya. Campuran serbuk besi dan resin ini menggunakan kadar resin sebesar 14% dari total berat campuran serbuk besi dan epoxy untuk komposit karbon. Setelah itu campuran serbuk besi dan epoxy untuk komposit karbon di cetak dengan cetakan yang terbuat dari akrilik yang telah di *laser cutting*. Setelah cetakan sudah terisi campuran serbuk Fe dan resin carbon fiber diamkan selama 24 jam sampai mengeras secara sempurna. Dari berbagai campuran serbuk fe dan epoxy untuk komposit karbon yang telah diuji menggunakan Gaussmeter diperoleh hasil seperti pada tabel 3. Kuat medan magnet terbesar terdapat pada campuran dengan kadar resin 14% yaitu sebesar 36 gauss.

Tabel.3 pengaruh kadar resin pada core terhadap kuat medan magnet

Kadar Resin (%)	B (Gauss)
10	34
12	35
14	36
16	34,4
18	32
20	31
25	30
30	29,3



Gambar 4.5 Grafik pengaruh kadar resin pada core terhadap kuat medan magnet

Tahapan selanjutnya adalah pembuatan kumparan. Dengan menggunakan alat sederhana, dibuat kumparan dengan jumlah lilitan yang sama dan geometri yang seidentik mungkin. Lalu pasang kumparan pada core yang sudah jadi.

Jumlah lilitan dapat dihitung berdasarkan berapa kuat medan magnet yang akan dihasilkan oleh *armature core*. Dengan menentukan target torsi akan mendapatkan informasi untuk menghitung kuat medan magnet yang harus dihasilkan oleh *armature core*. Setelah mendapatkan kuat medan magnet maka dapat dihitung jumlah lilitan minimum. Seperti persamaan di bawah

Data awal:

- Torsi target = 5 Nm
- r berdasarkan central of gravity = 0,0475 m
- $\mu_0 = 2 \times 10^{-4}$
- B saat I max = 2,5 T
- $m_2 = 3,26$
- $k = 10^{-7}$

Berdasarkan data diatas maka gaya tolak menolak pada saat motor berputar adalah

$$\begin{aligned} F &= T/r \\ &= 5/0,0475 \\ &= 105 \text{ N} \end{aligned}$$

Selanjutnya gaya tolak menolak pada tiap slot dapat dihitung sebagai berikut

$$\begin{aligned} F \text{ tiap slot} &= F/16 \\ &= 105/16 \\ &= 6,56 \text{ N} \end{aligned}$$

Setelah gaya tolak menolak didapat, kuat kutub medan magnet dan gaya lorentz yang dihasilkan pada tiap slot stator dapat dihitung

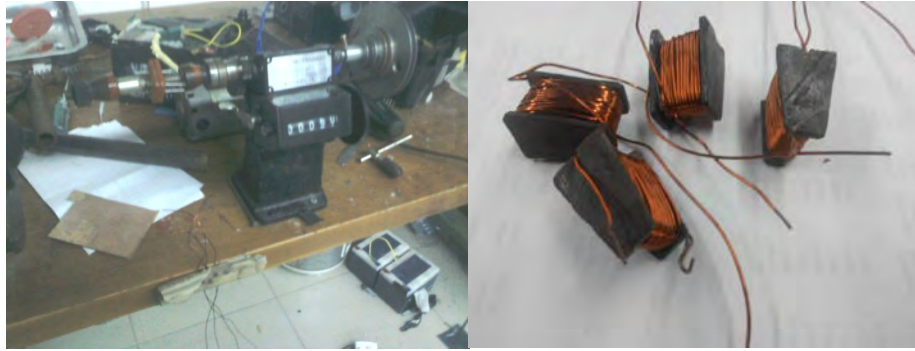
$$\begin{aligned} m_1 &= F_{\text{tiap slot}} \cdot r^2/k.m_2 \\ &= 6,56 \cdot 2,25 \cdot 10^{-6} / 10^{-7} \cdot 3,62 \\ &= 45 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F &= H.m_1 \\ &= 2,5 \cdot 45 \\ &= 112,5 \text{ N} \end{aligned}$$

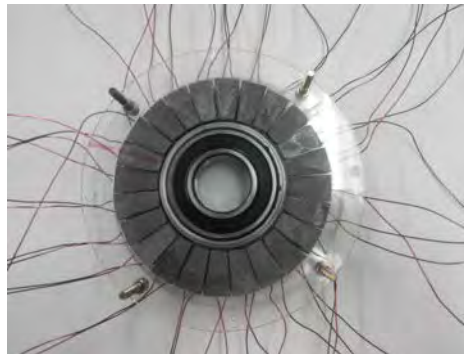
Dengan mengetahui gaya lorentz yang dihasilkan maka dapat menghitung kuat medan magnet yang dihasilkan tiap slot stator dan dapat dihitung jumlah lilitan minimum yang harus dipakai

$$\begin{aligned} B &= F/I.l \\ &= 112,5 / 20 \cdot 2,25 \\ &= 2,5 \text{ T} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N &= B \cdot 2a/\mu_0 \cdot I \\ &= 2,5 \cdot 2 \cdot 0,04 / 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 20 \\ &= 35 \text{ lilitan} \end{aligned}$$



Gambar 4.6 Alat Untuk Menggulung Kumbaran dan Kumbaran dengan Armature



Gambar 4.7 Stator Axial Brushless DC Motor dan Kumbaran

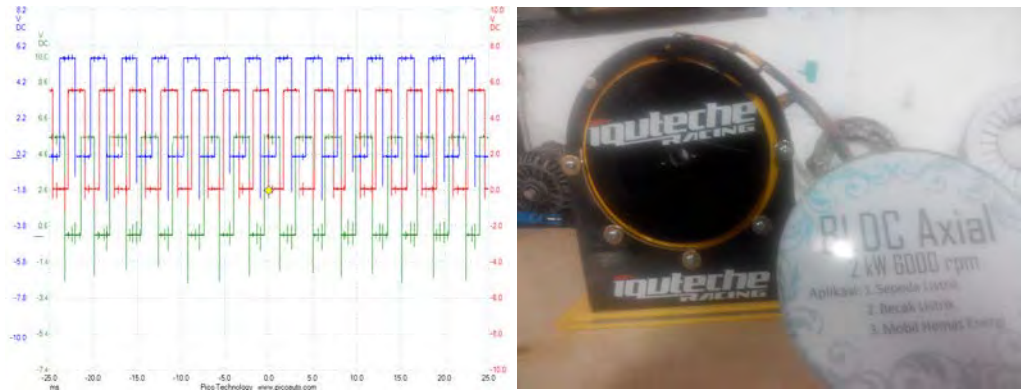
Proses pemasangan kumbaran pada stator diakhiri dengan penggunaan epoxy resin untuk menempelkan kumbaran secara permanen pada stator.

4.2.3 Pembuatan rotor

Proses pembuatan rotor tidak jauh berbeda dengan stator yaitu menggunakan laser cutting CNC atau *Computerized Numeric Control* untuk patternnya, dan casing rotor terbuat dari bahan besi. Proses terakhir pembuatan rotor adalah menempelkan magnet pada rumah magnet dengan menggunakan lem. Setelah 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 Brushless DC Motor*. Pada proses assembly yang terpenting adalah pemasangan sensor hall magnetic pada posisi yang telah ditentukan. Pemasangan sensor dilakukan dengan diuji memakai picosope untuk mendapatkan phase commutation yang sama dengan phase commutation motor listrik pada umumnya. Setelah itu stator dan rotor di assembly. Seperti nampak pada gambar dibawah.



Gambar 4.8 phase commutation dengan picoscope dan Axial Brushless DC Motor yang telah diassembly

4.3 Perhitungan Unjuk Kerja Axial Brushless DC Motor

4.3.1 Data Unjuk Kerja Axial Brushless DC Motor

Dari hasil pengujian *Axial Brushless DC Motor* yang dirancang, didapatkan hasil daya konsumsi input dan daya yang dibangkitkan dari output generator didapatkan data sampling sebagai berikut:

Tabel 4 pengujian *Axial Flux PM DC Motor* dengan controller MITSUBA

Beban	I out	V out	Vin	I in	rpm
100	0,6	210	103,2	4,8	3300
200	0,7	198	103,2	5,3	3032
300	0,8	183	103,2	5,6	2956
400	1,2	128	103,2	6,0	2850
500	1,3	127	103,1	6,5	2780
600	1,7	100	103,1	6,7	2735
700	2	94	103,1	7,4	2705
800	2,2	87	103,0	7,6	2685
900	2,5	78	103,0	7,8	2620
1000	2,6	75	102,8	7,9	2560
1100	2,7	72	102,8	8,0	2400
1200	2,8	68	102,5	8,0	2250
1300	2,9	65	102,5	8,0	2135
1400	3,1	62	102,3	8,2	2055
1500	3,5	60	102,3	9,0	1958
1600	3,7	59	102,3	9,5	1905
1700	3,8	58	102,0	9,7	1860
1800	4	56	102,0	9,8	1805

Tabel 5 pengujian *Axial Brushless DC Motor* dengan controller IQUTECHE.

Beban	I out	V out	I in	V in	rpm
100	0,9	200	7,9	92,0	3700
200	1	199	8,7	92,0	3550
300	1,1	197	9,4	91,8	3350
400	1,4	170	10,2	91,8	3155
500	1,8	160	12,2	91,7	2930
600	1,9	157	12,6	91,6	2790
700	2,1	142	12,7	91,6	2635
800	2,3	140	13,8	91,6	2540
900	2,6	132	15,1	91,6	2370
1000	2,7	129	15,4	91,4	2260
1100	2,8	120	15,8	91,4	2200
1200	3	119	16,5	91,4	2140
1300	3,2	115	17,3	91,3	2044
1400	3,4	112	18,2	91,2	1950
1500	3,7	109	19,1	91,2	1980
1600	3,9	104	19,3	91,2	1960
1700	4,2	98	19,8	91,2	1940
1800	4,5	95	20,7	91,2	1900

4.3.2 Perhitungan Unjuk Kerja *Axial Brushless DC Motor*

Tujuan dari perhitungan yang dilakukan ini adalah untuk mengetahui besar nilai dari setiap unjuk kerja motor listrik *Axial Brushless DC Motor* yang telah dirancang dan dibuat sehingga diketahui nilai daya, torsi, dan efisiensi pada keluaran beban tertentu. Contoh perhitungan unjuk kerja *Axial Brushless DC Motor* ini diambil data diperoleh pada putaran motor adalah 2370 rpm dengan data awal seperti berikut:

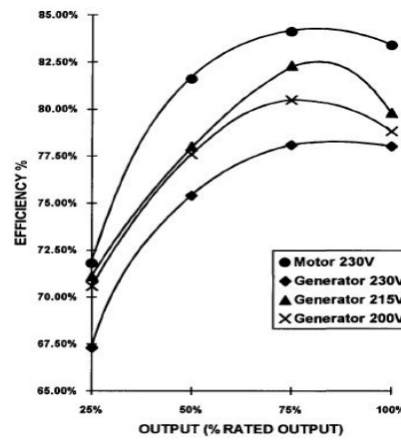
A. Daya motor

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

$$\begin{aligned}
 P_{\text{input}} &= V_{\text{input}} \cdot I_{\text{input}} \\
 &= 100\text{V} \times 23\text{ A} \\
 &= 2300\text{ watt}
 \end{aligned}$$

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 diambil dari grafik efisiensi generator.



Gambar 4.9 Grafik efisiensi generator
(General Generator)



Gambar 4.10 generator STC-3
(General Generator)

Generator yang digunakan adalah 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 60% dan bekerja bekerja pada rpm minimal 1500 rpm

$P_{out\ generator} = (P_{out\ efektif} \cdot Eff_{generator}) \cdot Eff_{mechanical} \cdot Eff_{electrical}$
 $P_{out\ efektif} = (V_{out} \cdot I_{out} \cdot \sqrt{3}) / (Eff_{generator} \cdot Eff_{mechanical} \cdot Eff_{mechanical})$

$$= 140 \times 2,3 \times \sqrt{3} / (0.60 \times 0.90 \times 0.87)$$

$$= 11187,1\text{watt}$$

B. Torsi

Dari hasil pengujian didapatkan nilai torsi pada saat putaran motor listrik sebesar 2370 rpm adalah 5,1 Nm berdasarkan daya yang di keluarkan oleh motor listrik.

Data awal :

- Daya Motor $P_{in} = V_{in} \cdot I_{in}$
- System transmisi single ratio (1:1)
- Putaran Motor 2370 rpm

Diperoleh dari perhitungan dasar:

$$\begin{aligned} P &= \tau \omega \\ \tau &= P / \omega \\ &= 1265,3 \times 60 / (2 \times 3,14 \times 2370) \\ &= 5,1 \text{ Nm} \end{aligned}$$

C. 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:

- $P_{input} = 1380 \text{ watt}$
- $P_{output \text{ efektif}} = 1265,3 \text{ watt}$

$$\begin{aligned} \text{Eff Generator} &= (P_{output \text{ efektif}} / P_{input}) \times 100\% \\ &= (1265,3 \text{ watt} / 1380 \text{ watt}) \times 100 \% \\ &= 91,7 \% \end{aligned}$$

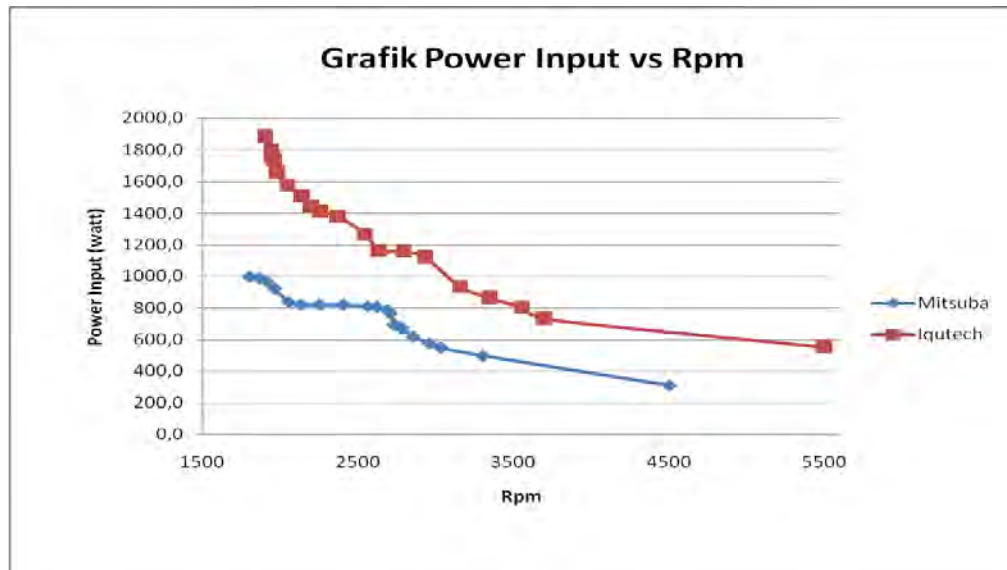
4.4 Analisa Unjuk Kerja Axial Brushless DC Motor

Dari hasil pengujian didapatkan data daya konsumsi input maupun daya output dari generator terhadap pemberian beban sehingga didapatkan beberapa variabel yang berpengaruh pada efisiensi putaran motor listrik untuk perancangan Axial Brushless DC Motor selanjutnya.

4.4.1. Analisa Daya

4.4.1.1. Analisa Daya konsumsi Input

Daya konsumsi input merupakan parameter awal untuk perancangan motor listrik sebagai target yang ingin dicapai. Variabel ini sangat ditentukan oleh besarnya tegangan operasional yang di Berikut adalah grafik hasil konsumsi motor listrik pada rpm tertentu dengan menggunakan controller Mitsuba dan controller Iquteche.



Gambar 4.11 Grafik hubungan antara power input terhadap rpm motor pada controller Mitsuba dan controller Iquteche.

Gambar 4.11 menunjukkan bahwa daya yang dikonsumsi *Axial Brushless DC Motor* pasti akan menurun seiring bertambahnya rpm pada motor listrik tersebut. Hal itu dikarenakan rpm motor listrik bertambah seiring berkurangnya beban yang diberikan pada motor listrik. Pada gambar diatas dapat dilihat dengan menggunakan controller yang berbeda didapatkan tren grafik yang serupa yaitu daya yang dikonsumsi *Axial Brushless DC motor* akan menurun seiring bertambahnya rpm.

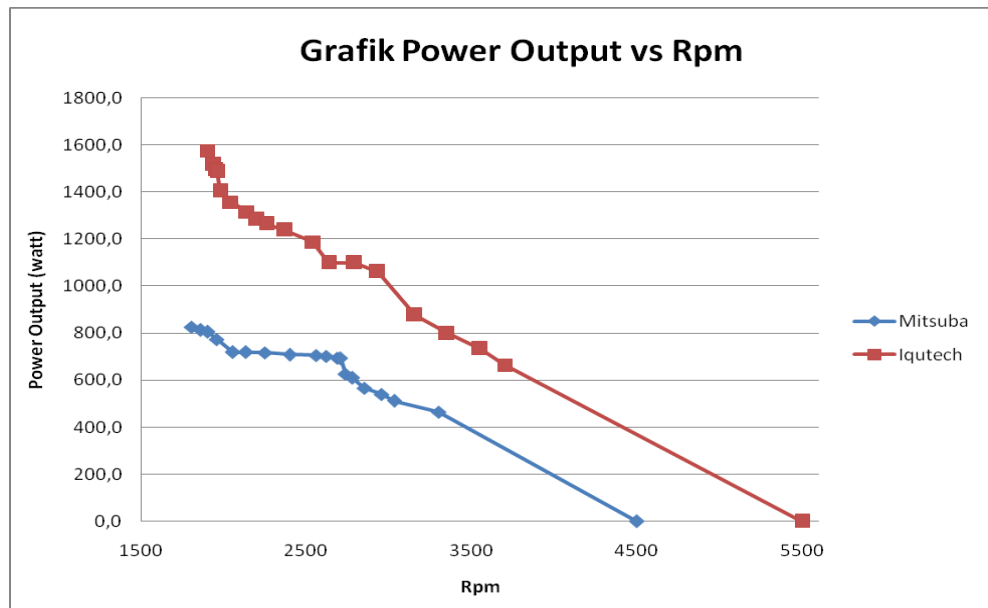
Dari grafik diatas dengan menggunakan controller Mitsuba power input tertinggi sebesar 999,6 watt pada rpm 1860, sedangkan dengan controller Iquteche power input tertinggi sebesar 1886 watt pada rpm 1900.

4.4.1.2. Analisa Daya Output Efektif Motor Listrik

Daya yang dibangkitkan oleh generator akibat kerja motor listrik pada tiap variable beban dapat mempresentasikan kinerja motor listrik yang didesain. Sebagaimana motor listrik generator juga memiliki efisiensi pada tiap putarannya. Daya output generator sebenarnya merupakan hasil dari daya output efektif *Axial Brushless DC Motor* yang dikali efisiensi generator dikali efisiensi elektrikal dan dikali efisiensi mekanis alat pengujian. Sebagaimana sebelumnya:

$$P \text{ out generator} = (P \text{ out Efektif} \cdot \text{Eff Generator}) \cdot \text{Eff Mechanical} \cdot \text{Eff Electrical}$$

maka didapatkan grafik daya output efektif *Axial Brushless DC Motor* yang diuji menggunakan 2 controller yang berbeda.



Gambar 4.12 Grafik hubungan antara power output terhadap rpm motor pada controller Mitsuba dan controller Iquteche.

Gambar 4.12 menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan Axial Brushless DC Motor pasti akan menurun seiring bertambahnya rpm pada motor listrik tersebut. Hal itu dikarenakan rpm motor listrik bertambah seiring berkurangnya beban yang diberikan pada motor listrik. Pada gambar diatas dapat dilihat dengan menggunakan controller yang berbeda didapatkan tren grafik yang serupa yaitu daya yang dihasilkan Axial Brushless DC motor akan menurun seiring bertambahnya rpm.

Dari grafik diatas dengan menggunakan controller Mitsuba power input tertinggi sebesar 825,8 watt pada rpm 1860, sedangkan dengan controller Iquteche power input tertinggi sebesar 1576,5 watt pada rpm 1900.

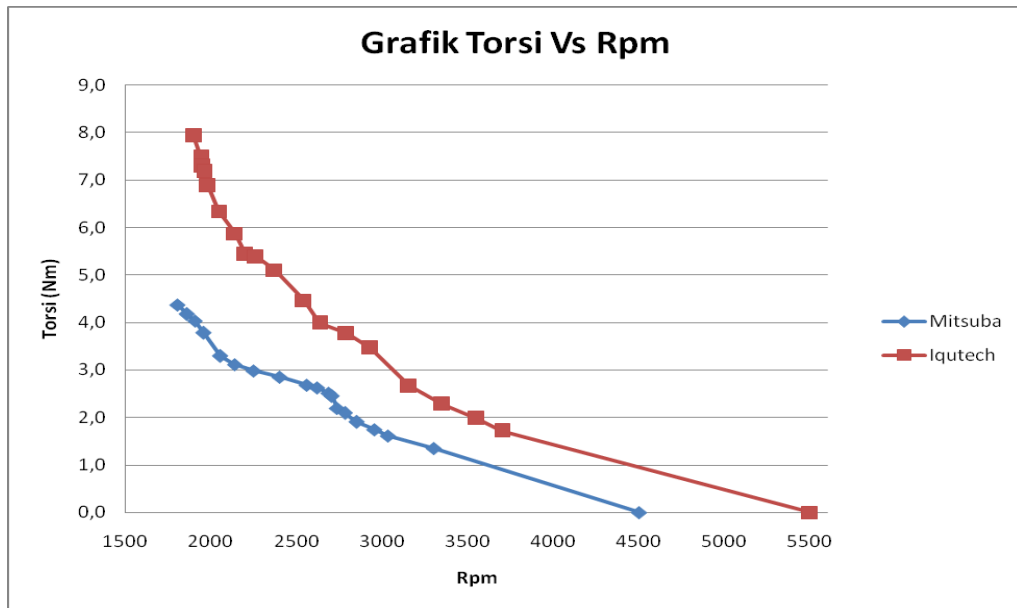
4.4.2 Analisa Torsi (T)

Torsi merupakan ukuran kemampuan dari mesin untuk menghasilkan kerja. Dalam prakteknya torsi dari mesin berguna untuk mengatasi hambatan sewaktu kendaraan terperosok atau untuk mempercepat laju kendaraan. Perancangan Axial Brushless DC Motor menghasilkan torsi dari hasil perumusan dasar motor listrik sebagaimana:

$$P = \tau \omega$$

$$\tau = P / \omega$$

Hal ini terlihat pada grafik di bawah ini:

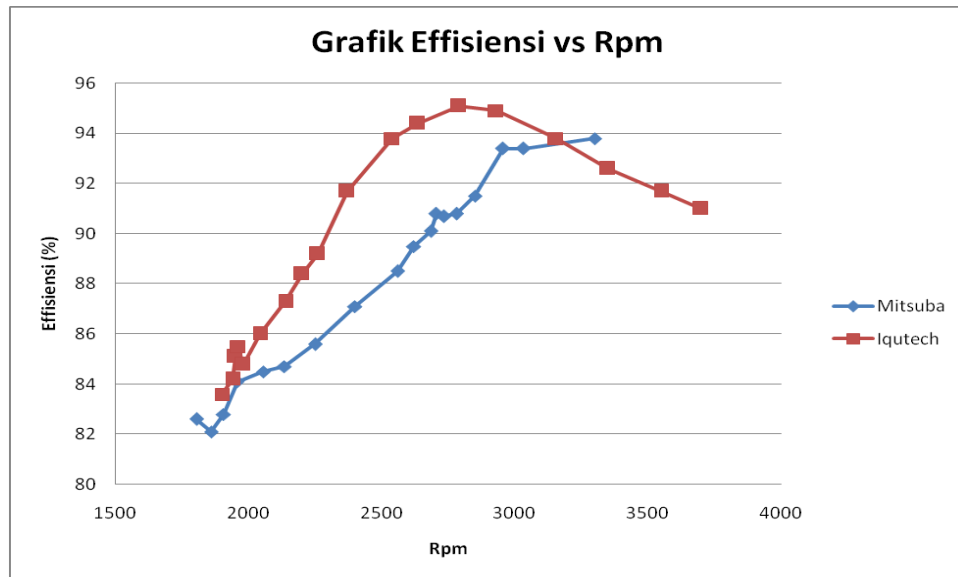


Gambar 4.13 Grafik hubungan antara torsi terhadap rpm motor pada controller Mitsuba dan controller Iquteche.

Pada grafik torsi Axial Brushless DC Motor menunjukkan bahwa torsi yang dihasilkan akan menurun seiring bertambahnya rpm pada motor listrik tersebut. Hal ini dikarenakan rpm pada motor listrik bertambah seiring berkurangnya beban yang diterima Axial Brushless DC Motor tersebut. Pada gambar diatas dengan menggunakan 2 controller yang berbeda didapatkan tren grafik yang serupa, yaitu torsi akan menurun seiring bertambahnya rpm. Dari pengujian performa Axial Brushless DC Motor didapatkan torsi maksimal sebesar 7,9 Nm pada rpm 1900 dengan menggunakan controller Iquteche dan 4,4 Nm pada rpm 1860 dengan menggunakan controller Mitsuba.

4.4.3 Efisiensi Motor Listrik

Efisiensi motor listrik adalah ukuran besarnya pemanfaatan energi input dari baterai yang tersimpan untuk diubah menjadi daya efektif oleh motor listrik. Nilai efisiensi tergantung besarnya daya konsumsi input motor listrik dan besarnya daya efektif motor listrik yang dihasilkan.



Gambar 4.14 grafik hubungan antara efisiensi terhadap rpm pada controller Mitsuba dan controller Iquteche

Pada Axial Brushless DC Motor dengan menggunakan 2 controller yang berbeda memiliki tren grafik yang sama, yaitu meningkat mulai dari rpm rendah hingga titik optimum, kemudian akan turun seiring bertambahnya rpm. Hal itu menunjukkan bahwa Axial Brushless DC Motor memiliki karakteristik efisiensi yang baik pada rpm dan beban tertentu, namun pasti turun ketika rpm Axial Brushless DC Motor bertambah. Pada pengujian ini yang menggunakan 2 controller yang berbeda memiliki karakter efisiensi yang sama.

Gambar 4.14 menunjukkan efisiensi Axial Brushless DC Motor meningkat seiring bertambahnya rpm motor tersebut. Hal itu sesuai dengan karakter efisiensi dasar motor listrik. Pada pengujian dengan menggunakan controller Iquteche, efisiensi tertinggi yang dihasilkan lebih baik yaitu sebesar 95,1% pada rpm 2790 dibandingkan dengan efisiensi yang dihasilkan dengan menggunakan controller Mitsuba yaitu sebesar 93,8% pada rpm 3300.

DAFTAR PUSTAKA

- Yedamale, Padmaraja. 2003. *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Microchip Technology Inc
- Hendershot, James R. 1986. Brushless DC Motor Phase, Pole, and Slot Configurations.
- Hopper, Ian. 2011. *Development of in-wheel motor system for formula SAE electric vehicle*.
- Fitzgerald A.E., Kingsley C. Jr., Umans S. D. 1988. *Electric Machinery*, McGraw-Hill.
- Şahin F. 2001. Design and Development of a High Speed Axial Flux Permanent Magnet Machine, PhD Thesis Technische Universiteit Eindhoven.
- Gieras F. J., Wang R., Kamper M. J. 2008. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Springer.

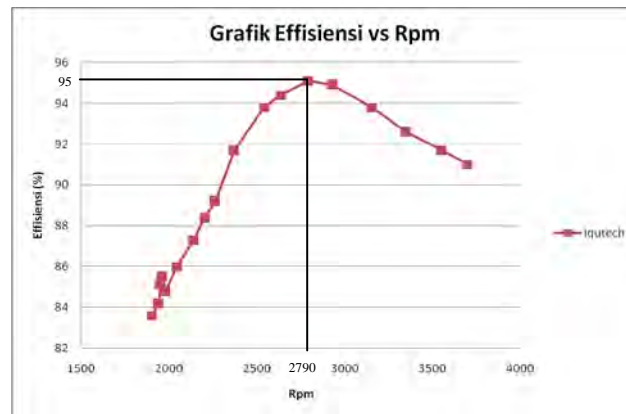
BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

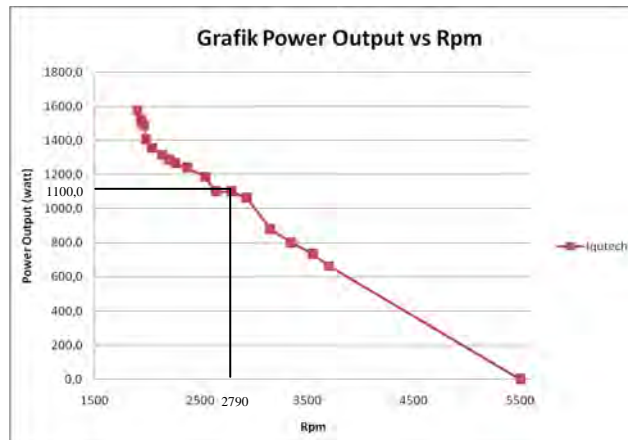
Dalam Tugas Akhir yang dikerjakan ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Berhasil mendesain dan membuat *Axial Brushless Direct Current Motor* dengan konstruksi satu stator dan dua rotor yang memiliki jumlah core stator sebanyak 24 dan dan magnet sebanyak 20 pole pada tiap rotornya.
2. Berhasil mendesain dan merancang bangun *Axial Brushless Direct Current Motor* yang memiliki efisiensi maksimum sebesar 95,1% pada rpm 2790 seperti yang ditunjukkan pada grafik dibawah ini.



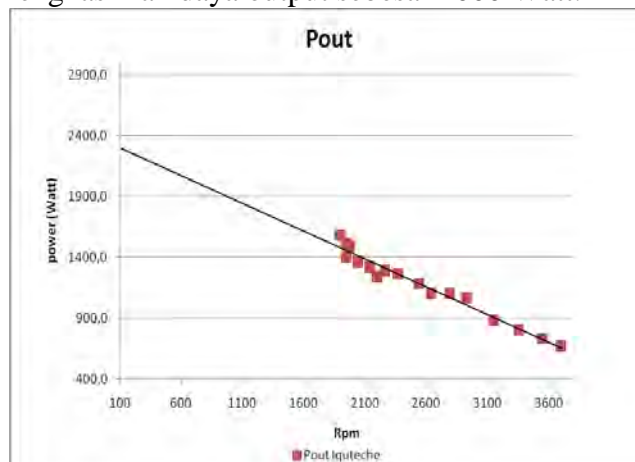
Gambar 5.1 grafik hubungan antara efisiensi terhadap rpm pada controller Iquteche

3. Performa *Axial Brushless Direct Current Motor* berdasarkan grafik dibawah ini memiliki daya output rated sebesar 1100watt pada rpm 2790.



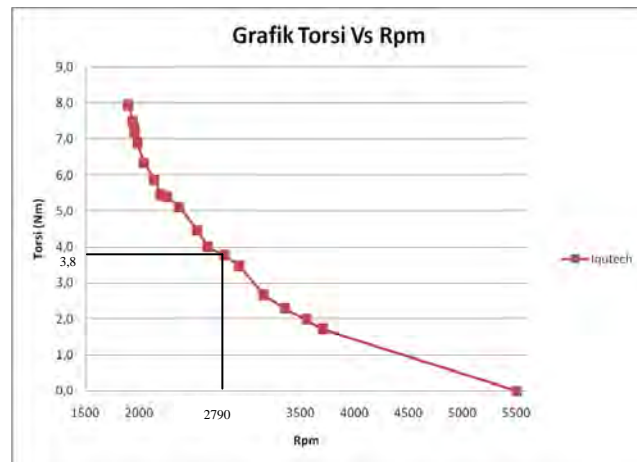
Gambar 5.2 grafik hubungan antara power output terhadap rpm pada controller Iquteche

4. Performa *Axial Brushless Direct Current Motor* berdasarkan grafik power output terhadap rpm dibawah ini dapat ditarik garis trendline linier, sehingga dapat diketahui *Axial Brushless Direct Current Motor* mampu menghasilkan daya output sebesar 2000 Watt.



Gambar 5.3 trendline grafik hubungan antara power output terhadap rpm

5. Performa dari *Axial Brushless direct Current Motor* berdasarkan grafik dibawah ini memiliki torsi rated sebesar 3,8 Nm pada rpm 2790.



Gambar 5.4 grafik hubungan antara torsi terhadap rpm pada controller Iquteche

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan memberi mekanisme pendinginan pada motor listrik agar tetap bekerja secara efektif dan optimal dan disarankan menggunakan alat uji dengan kualitas terbaik untuk mendapatkan hasil pengujian yang lebih akurat.