

TUGAS AKHIR - EE184801

**DESAIN DAN PROTOTIPE MOTOR BRUSHLESS DC
RPM RENDAH UNTUK APLIKASI DRONE
AGRIKULTURA**

M NAILIL IN'AM HILMI

NRP 07111840000141

Dosen Pembimbing

Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP 198006032006041003

Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng

NIP 196510121990031003

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - EE184801

**DESAIN DAN PROTOTIPE MOTOR BRUSHLESS DC
RPM RENDAH UNTUK APLIKASI DRONE
AGRIKULTURA**

M NAILIL IN'AM HILMI

NRP 07111840000141

Dosen Pembimbing

Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP 198006032006041003

Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng

NIP 196510121990031003

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknik Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - EE184801

DESIGN AND PROTOTYPE LOW RPM BRUSHLESS DC MOTOR FOR AGRICULTURAL DRONE APPLICATIONS

M NAILIL IN'AM HILMI

NRP 07111840000141

Advisor

Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.

NIP 198006032006041003

Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng

NIP 196510121990031003

Electrical Engineering Undergraduate Program

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

LEMBAR PENGESAHAN
DESAIN DAN PROTOTIPE MOTOR BRUSHLESS DC RPM RENDAH
UNTUK APLIKASI DRONE AGRIKULTURA

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi Sarjana Teknik Elektro
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

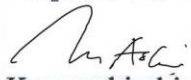
Oleh: **M NAILIL IN'AM HILMI**

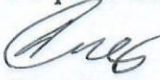
NRP 07111840000141


Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

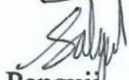
1. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
2. Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng
3. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
4. Prof. Dr.Ir. Soedibyoy, MMT.
5. Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi H., ST., MT.


Pembimbing


Ko-pembimbing


Penguji


Penguji


Penguji

SURABAYA

Juli, 2022

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

APPROVAL SHEET

DESIGN AND PROTOTYPE BRUSHLESS DC MOTOR LOW RPM FOR AGRICULTURAL DRONE APPLICATION

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a Bachelor of Engineering degree at
Electrical Engineering Undergraduate Program
Department of Electrical Engineering
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **M NAILIL IN'AM HILMI**

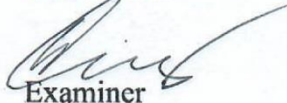
NRP 07111840000141

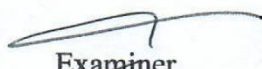
Approved by Final Project Proposal Examiner Team:

1. Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
2. Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng
3. Dr. Dimas Fajar Uman Putra, S.T., M.T.
4. Prof. Dr.Ir. Soedibyoy, MMT.
5. Dr. I Gusti Ngurah Satriyadi H., ST., MT.


Advisor


Co-Advisor


Examiner


Examiner


Examiner

SURABAYA

July, 2022

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : M Nailil In'am Hilmi / 07111840000141
Departemen : Teknik Elektro
Dosen Pembimbing / NIP : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. /
198006032006041003

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “**Desain dan Prototipe motor brushless DC rpm Rendah untuk Aplikasi Drone Agrikultura**” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 02 Juni 2022

Mengetahui,
Pembimbing,

Mahasiswa



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198006032006041003



M Nailil In'am Hilmi
NRP. 07111840000141

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : M Nailil In'am Hilmi / 07111840000141
Department : Electrical Engineering
Advisor / NIP : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. / 198006032006041003

hereby declare that the Final Project with the title of “**DESIGN AND PROTOTYPE BRUSHLESS DC MOTOR LOW RPM FOR AGRICULTURAL DRONE APPLICATIONS**” is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya, 02 Juni 2022

Acknowledged,
Advisor,

Student



Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 198006032006041003



M Nailil In'am Hilmi
NRP. 07111840000141

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

ABSTRAK

**DESAIN DAN PROTOTIPE MOTOR BRUSHLESS DC RPM RENDAH
UNTUK APLIKASI DRONE AGRIKULTURA**

Nama Mahasiswa / NRP : M Nailil In'am Hilmi / 07111840000141
Departemen : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Dosen Pembimbing 1 : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng

Abstrak

Saat ini motor brushless DC menjadi propulsi terbaik untuk pengaplikasian pada drone, misalnya drone agrikultura karena karakteristiknya yang sangat baik. Motor brushless DC memiliki efisiensi yang tinggi, torsi yang cukup besar serta perawatan yang mudah karena konstruksinya sederhana. Karakteristik motor brushless DC sangat dipengaruhi oleh material penyusunnya, seperti bahan inti stator dan tembaga konduktor belitan. Inti stator umumnya terbuat dari bahan jenis *electrical steel* dengan ketebalan 0,1 mm sehingga bisa mereduksi rugi panas arus eddy. Tembaga konduktor yang dipakai juga harus memiliki resistansi yang rendah untuk meminimalkan rugi-rugi tembaga yang berpengaruh pada daya output, namun bahan terbaik cukup sulit ditemukan di pasaran Indonesia. Pada penelitian ini membahas tentang pembuatan desain hingga prototipe motor brushless DC dengan menggunakan bahan yang tersedia di dalam negeri. Desain motor menggunakan metode *finite element* dengan mempertimbangkan kebutuhan spesifikasi motor dan pedoman artikel dan jurnal penelitian sebelumnya. Simulasi motor menggunakan software Simcenter Motorsolve untuk mengetahui parameter elektromagnetik motor dan desain 3D menggunakan software Autodesk Inventor. Proses pembuatan inti stator menggunakan metode *laser cutting* dan proses pembuatan rotor menggunakan metode bubut CNC. Pada proses pengujian motor prototipe menggunakan suplai daya baterai Lipo 6S 24V dan alat pengujian yang dibuat secara mandiri oleh peneliti. Pengujian tanpa beban diukur menggunakan *digital tachometer* dan mendapatkan kecepatan maksimal sebesar 6725rpm dan pada pengujian berbeban menggunakan *torque meter* torsi maksimal motor adalah 0,94Nm. Dari hasil penelitian didapatkan parameter rating daya input sebesar 1008W atau sekitar 1KW, dan efisiensi motor mencapai 62%.

Kata kunci: Brushless DC, Tembaga konduktor, *Finite element*, Torsi, Efisiensi.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

ABSTRACT

DESIGN AND PROTOTYPE BRUSHLESS DC MOTOR LOW RPM FOR AGRICULTURAL DRONE APPLICATIONS

Student Name / NRP : M Nailil In'am Hilmi / 07111840000141
Department : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Advisor 1 : Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D.
Advisor 2 : Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng

Abstract

Currently brushless DC motors are the best propulsion for drone applications, such as agricultural drones because of their excellent characteristics. Brushless DC motors have high efficiency, large enough torque and easy maintenance due to their simple construction. The characteristics of a brushless DC motor are greatly influenced by the constituent materials, such as the stator core material and the winding conductor copper. The stator core is generally made of electrical steel with a thickness of 0.1 mm so that it can reduce eddy current heat losses. The copper conductor used must also have a low resistance to minimize copper losses that affect the output power, but the best materials are quite difficult to find in the Indonesian market. In this study, we discuss the design and prototype of a brushless DC motor using materials available in the country. Motor design uses the finite element method by considering the needs of motor specifications and guidelines for previous research articles and journals. Motor simulation using Simcenter Motorsolve software to determine motor electromagnetic parameters and 3D design using Autodesk Inventor software. the process of making the stator core using the laser cutting method and the rotor making process using the CNC lathe method. In the process of testing the prototype motor, it uses a Lipo 6S 24V battery power supply and a test tool made independently by the researcher. The no-load test was measured using a digital tachometer and got a maximum speed of 6725rpm and in the load test using a torque meter the maximum torque of the motor was 0.94Nm. From the research results, the input power rating parameter is 1008W or about 1KW, and the motor efficiency reaches 62%.

Keywords: Brushless DC, Copper conductor, Finite element, Torque, Efficiency.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian yang berjudul “Desain dan Prototipe Motor Brushless DC rpm Rendah untuk Aplikasi Drone Agrikultura”. Harapan penulis, penelitian ini dapat dijadikan referensi penelitian selanjutnya.

Selama penulisan penelitian ini tentunya penulis mendapatkan banyak bantuan dari berbagai pihak yang telah mendukung dan membimbing penulis. Kasih yang tulus serta penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Orang tua dan Keluarga saya sebagai motivasi utama yang senantiasa memberi doa, semangat dan bantuan moral maupun materiil.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. dan Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik
4. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. selaku kepala Laboratorium Konversi Energi.
5. Keluarga Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik KESatuan, KESuksesan dan juga KEjayaan.
6. Tim Bayucaraka ITS yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini.
7. Teman-teman e58 yang telah berjuang bersama penulis sejak awal perkuliahan
8. Dan seluruh pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan selama ini. Penulis pun memohon maaf atas segala kekurangan pada penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, 02 Juni 2022

M Nailil In'am Hilmi

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
APPROVAL SHEET.....	v
PERNYATAAN ORISINALITAS	vii
STATEMENT OF ORIGINALITY	ix
ABSTRAK	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Permasalahan	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan	2
1.5 Manfaat	2
BAB 2	3
TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Perancangan Terdahulu.....	3
2.2 Konsep Dasar Motor Brushless DC	3
2.3 Prinsip Kerja	6
2.4 Konstruksi.....	7
2.4.1 Inti Stator.....	7
2.4.2 Belitan Stator.....	8
2.4.3 Permanen Magnet.....	9
2.4.4 Cangkang rotor	10
2.4.5 Pengontrol Kecepatan	11
2.5 Rugi-rugi.....	11
2.5.1 Rugi Inti.....	12
2.5.2 Rugi Tembaga	12
2.5.3 Rugi Mekanis	12

2.6 Sistem Propulsi pada Drone Agricultura.....	13
2.6.1 Motor Brushless DC Sebagai Propulsi drone agricultura.....	13
2.6.2 Thrust to Take off Weight Ratio.....	14
2.6.3 Suplai Daya.....	14
BAB 3	17
METODOLOGI.....	17
3.1 Finite Elemen Method (FEM)	18
3.2 Urutan pelaksanaan penelitian.....	18
3.2.1 Perencanaan desain sistem.....	18
3.2.2 Desain Motor Brushless DC	20
3.2.2 Simulasi sistem	28
3.2.2 Bahan dan peralatan yang digunakan	33
3.2.3 Implementasi pembuatan prototipe.....	34
3.2.4 Pengujian Alat	42
BAB 4	47
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	47
4.1 Realisasi prototipe	47
4.1.1 pengujian tanpa beban	47
4.1.2 pengukuran dimensi.....	50
4.1.3 pengukuran resistansi, kapasitansi, dan induktansi belitan fasa	50
4.1.4 pengujian berbeban dan termal	50
4.1.5 Analisis rugi-rugi.....	52
4.1.6 Analisis efisiensi.....	53
4.1.7 Sintesis.....	54
4.1.8 Evaluasi.....	55
BAB 5	57
KESIMPULAN.....	57
5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	59
LAMPIRAN.....	61
BIODATA PENULIS	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Rangkaian Inverter 3 fasa BLDC	3
Gambar 2. 2 Karakteristik Torsi-Kecepatan.....	5
Gambar 2. 3 Sketsa tipe rotor luar dan rotor dalam.....	6
Gambar 2. 4 Stator tipe dalam	6
Gambar 2. 5 Inti Stator	7
Gambar 2. 6 Gelombang trapezoidal back EMF	8
Gambar 2. 7 Gelombang sinusoidal back EMF.....	8
Gambar 2. 8 Beberapa macam penampang magnet rotor.....	9
Gambar 2. 9 Grafik gelombang cogging torque	10
Gambar 2. 10 Sketsa outer-rotor Motor Brushless DC	10
Gambar 2. 11 Pengontrol motor brushless DC tipe SSTPI	11
Gambar 2. 12 Control motor brushless DC tipe FSTPI.....	11
Gambar 2. 13 Konfigurasi arah rotor pada drone	13
Gambar 2. 14 Blok diagram sistem instrumentasi propulsi	14
Gambar 3. 1 Diagram Alir penelitian	17
Gambar 3. 2 Desain 3D konsep Rancangan Drone	19
Gambar 3. 3 (a). desain 3D tampak depan, (b). desain 3D tampak belakang	21
Gambar 3. 4 Ilustrasi belitan stator.....	22
Gambar 3. 5 Untaian kawat tembaga.....	24
Gambar 3. 6 Desain geometri stator	25
Gambar 3. 7 Desain magnet pole.....	27
Gambar 3. 8 Hasil simulasi cogging Torque	29
Gambar 3. 9 Hasil simulasi back EMF.....	29
Gambar 3. 10 Hasil simulasi arus.....	30
Gambar 3. 11 Hasil simulasi torsi	30
Gambar 3. 12 Hasil simulasi airgap flux	31
Gambar 3. 13 Hasil simulasi kecepatan	31
Gambar 3. 14 Hasil simulasi losses	32
Gambar 3. 15 Hasil simulasi efisiensi motor.....	33
Gambar 3. 16 (a). import desain ke mesin laser cutting (b). proses cutting plat stainless steel	35
Gambar 3. 17 (a). penyusunan plat laminasi (b). bentuk stator setelah laminasi	36
Gambar 3. 18 (a). pengecekan desain sebelum di bubut (b). proses bubut (c). proses milling	38
Gambar 3. 19 (a). rotor dan stator tampak atas (b). rotor dan stator tampak bawah (c). pemasangan inti stator dan magnet permanen	39
Gambar 3. 20 (a). stator dilapisi kertas isolasi (b). stator dilapisi kertas dan cairan sirlak isolasi.....	40
Gambar 3. 21 (a). belitan terpasang (b). belitan dirapikan disambung kabel 3 fasa (c). belitan dilapisi cairan isolasi	41
Gambar 3. 22 Motor Brushless DC 3 fasa.....	42
Gambar 3. 23 Skema pengujian tanpa beban	42
Gambar 3. 24 Pengukuran induktansi, resistansi, dan kapasitansi fasa.....	43
Gambar 3. 25 (a). (b). (c). rangkaian pengujian berbeban.....	44

Gambar 4. 1 Grafik Arus-Kecepatan 48
Gambar 4. 2 grafik arus-daya input 49
Gambar 4. 3 grafik daya input-kecepatan 49
Gambar 4. 4 Grafik torsi-kecepatan..... 51
Gambar 4. 5 grafik arus-torsi 52

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Desain Thrust dan flight time Drone	20
Tabel 3. 2 Parameter desain motor	20
Tabel 3. 3 Parameter belitan stator	22
Tabel 3. 4 layout belitan stator	23
Tabel 3. 5 <i>Physical properties</i>	25
Tabel 3. 6 Parameter desain inti stator	26
Tabel 3. 7 Karakteristik magnet N35	26
Tabel 3. 8 Hasil simulasi rugi-rugi	32
Tabel 3. 9 Raw materials	33
Tabel 3. 10 Tools	34
Tabel 4. 1 Data pengujian tanpa beban.....	47
Tabel 4. 2 Pengukuran dimensi stator	50
Tabel 4. 3 Pengukuran dimensi rotor.....	50
Tabel 4. 4 Pengukuran LCR belitan fasa	50
Tabel 4. 5 Hasil pengujian berbeban dan efisiensi motor.....	51
Tabel 4. 6 Data efisiensi motor.....	53

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengembangan UAV (Unmanned Aerial Vehicle) dengan berbagai kegunaan semakin pesat seiring dengan berkembangnya teknologi. UAV memiliki banyak jenis, salah satu yang paling sering dipakai adalah UAV multicopter atau biasa disebut Drone. Penggunaan drone di bidang agrikultura meningkat tajam dalam beberapa tahun terakhir. Bidang aplikasinya meliputi analisis tanah dan lapangan, pemetaan dan deteksi hewan, irigasi, penyemprotan pestisida tanaman dan penebaran bibit tanaman (Klauser & Pauschinger, 2021). Drone agrikultura dituntut untuk memiliki gaya angkat yang tinggi, durasi terbang yang lebih lama, dan lingkup area tempuh yang lebih luas. Demi memenuhi karakteristik yang dibutuhkan, drone agrikultur harus memiliki propulsi yang paling sesuai. Dari semua jenis propulsi Drone, motor Brushless DC selalu menjadi pertimbangan karena memiliki bobot yang ringan, ketahanan yang baik, konstruksi sederhana, dan memiliki gaya angkat yang baik, sehingga sesuai dengan tuntutan karakteristik untuk Drone agrikultura. (Y.B. Adyapaka Apatya, 2017)

Motor Brushless DC semakin banyak digunakan pada aplikasi High-end vehicle, karena menghasilkan torsi yang tinggi dengan tingkat kebisingan rendah dan efisiensi motor yang tinggi (Chang et al., 2003). Motor DC Brushless lebih mudah dalam perawatannya karena tidak memerlukan brush, Motor brushless DC menggunakan sistem elektronik sebagai pengganti brush yang terdiri dari sensor posisi dan inverter. Sensor posisi yang dipakai adalah Hall Sensor sebagai pendeteksi posisi rotor, kelebihanannya adalah harga yang murah dan volume yang kompak. Inverter digunakan sebagai pengubah arus input DC menjadi AC tiga fasa (Y.B. Adyapaka Apatya et al., 2020). Di sisi lain ada beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam pembuatan motor brushless DC demi menunjang spesifikasi yang diinginkan yaitu Resistivitas tembaga (ρ_{Cu}), kerapatan fluks magnet (B), intensitas medan magnet (H), dan rugi-rugi per kg (W/kg , Hz). Parameter lain adalah dari karakteristik bahan feromagnetik dan bahan magnet permanen yang digunakan, kerapatan fluks (Br) permanen magnet, dan densitas magnet (qm), dari parameter desain yang dibuat, material dan komponen merupakan hal yang penting dalam penentuan performa motor Brushless DC. karena berpengaruh pada sifat magnetik, dan ketahanan dari motor tersebut (Shastri, 2020).

Studi ini akan berfokus pada pembuatan motor brushless DC tiga fasa berjenis outrunner dalam bentuk prototipe. Desain dari motor Brushless DC ini akan menggunakan parameter yang ditetapkan sehingga sesuai untuk pengaplikasian pada drone agrikultura dengan thrust sekitar 10 kg saat throttle 75%. Hasil pembuatan prototipe akan diuji di darat pada test bench yang tersedia untuk mengetahui karakteristik dan spesifikasi saat diaplikasikan pada drone agrikultura. Proses manufaktur akan mengacu pada desain dan simulasi menggunakan software simcenter motorsolve FEA dengan penyesuaian bahan yang tersedia dalam negeri. Hasil pembuatan prototipe akan diuji pada test bench yang ada di laboratorium konversi energi listrik Teknik elektro ITS untuk mengetahui karakteristik dan performa dari prototipe.

1.2 Rumusan Permasalahan

Potensi pengembangan motor listrik sangat besar untuk diaplikasikan pada kendaraan listrik, tak terkecuali kendaraan udara tanpa awak atau biasa disebut UAV. Motor brushless DC menjadi pilihan utama untuk menjadi propulsi pada UAV dan dapat disesuaikan performa dan karakteristiknya berdasarkan tujuan penggunaannya. Motor brushless DC memiliki dua bagian penting yaitu stator dan rotor, stator adalah bagian yang diam dan rotor adalah bagian yang

berputar. Stator terdiri dari kumparan dan inti stator. Kumparan pada stator berwujud kumpulan tembaga enamel yang dialiri arus tiga fasa, sedangkan inti stator terbuat dari lempengan stainless steel tipis yang disusun. Pada rotor terdiri dari magnet permanen yang dipasang sehingga membentuk medan magnet, selain itu pada rotor terdapat cangkang yang berputar dan menjadi tempat magnet permanen. Desain dan penggunaan bahan tentu akan berpengaruh pada karakteristik dan peforma dari motor brushless DC dan harus dianalisa hasilnya.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Karakteristik motor Brushless DC rpm rendah dan digunakan untuk aplikasi stand alone.
2. Implementasi prototipe motor Brushless DC menggunakan komponen – komponen yang terdapat di pasaran dalam negeri.
3. Pengujian menggunakan peralatan yang tersedia di Laboratorium Konversi Energi Listrik-Teknik Elektro ITS.
4. Pengujian prototipe menggunakan sumber baterai Li-Po 3300mAh 6 sel 24v, dengan Electric Speed Controller 60A.
5. Semua simulasi dilakukan dalam mode tunak (*steady state*). *Friction, windage, stray, dan core losses* diabaikan.

1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini diharapkan sebagai berikut:

1. Mendesain, melakukan simulasi, dan proses manufaktur prototipe motor brushless DC rpm rendah dengan menggunakan material yang ada di dalam negeri.
2. Mendapatkan perbandingan dan hasil analisis peforma prototipe motor brushless DC rpm rendah.
3. Mendapatkan analisis hasil peforma motor brushless DC untuk mengetahui kecocokan karakteristik untuk aplikasi propulsi drone agrikultura.

1.5 Manfaat

Hasil yang diperoleh dari pelaksanaan penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain:

1. Dapat digunakan sebagai referensi dalam manufaktur motor Brushless DC dengan material yang tersedia di dalam negeri.
2. Dapat digunakan sebagai referensi tim technology development Bayucaraka ITS dalam mengembangkan propulsi pesawat tanpa awak.
3. Dapat dijadikan referensi mahasiswa lain yang melakukan penelitian dibidang mesin listrik.

BAB 2

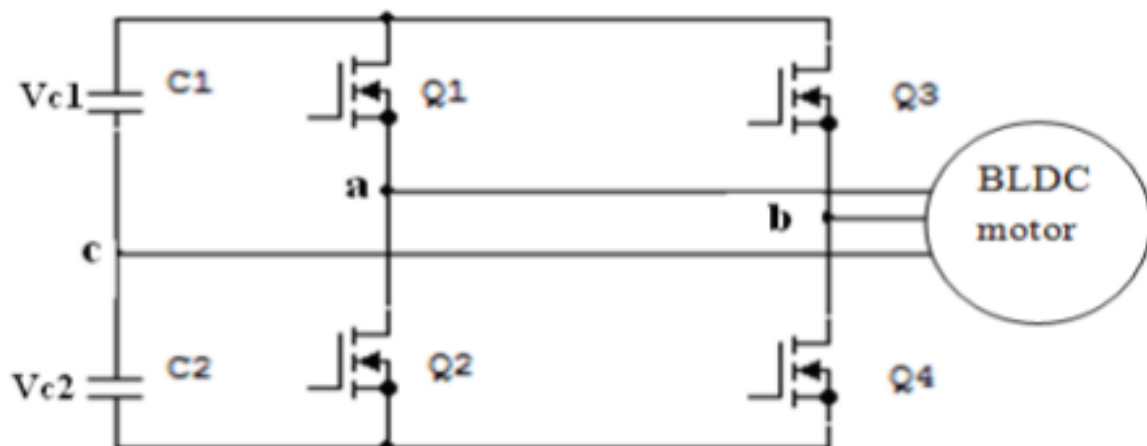
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perancangan Terdahulu

Pada penelitian tugas akhir Ilham Reindyto sebelumnya membahas tentang desain dan prototipe Motor Brushless DC pada aplikasi pesawat UAV (fixedwing) yang mana pada penelitian tersebut casing dan rotor menggunakan bagian dari motor existing T-Motor AT3520 sehingga hanya membuat stator saja, tujuan dari pembuatannya adalah untuk aplikasi pesawat UAV (fixedwing) yang mana dari karakteristiknya lebih menitikberatkan pada kecepatan yang tinggi dengan torsi yang cukup dengan stator slot berjumlah 12 dan kutub magnet yang berjumlah 14 (Reindyto, 2021). Sedangkan pada penelitian kali ini Motor Brushless DC diaplikasikan pada drone Multicopter. Seluruh komponen dibuat dan dirancang dengan desain sendiri mulai hingga stator sampai rotor dengan karakteristik yang lebih menonjolkan gaya dorong dengan kecepatan yang cukup.

2.2 Konsep Dasar Motor Brushless DC

Secara pengertian Motor Brushless DC dapat diklasifikasikan sebagai motor sinkron multi fasa karena kecepatan rotasi rotornya sama dengan perubahan polarisasi magnetnya. Pada motor Brushless DC, ada dua bagian penting yaitu rotor dan stator. rotor adalah bagian yang berputar dan stator adalah bagian yang diam. Stator terdiri dari kumparan dan inti. Sedangkan rotor terdiri atas magnet permanen yang tersebar secara sirkular. Komponen lain yang tak kalah penting adalah inverter yang digunakan untuk mengkonversi arus DC menjadi AC 3 fasa sehingga dapat mengatur besarnya arus yang harus di inputkan. Berikut rangkaian inverter 3 fasa pada motor Brushless DC.



Gambar 2. 1 Rangkaian Inverter 3 fasa BLDC

Pada motor brushless DC terdapat Back EMF yang merupakan tegangan yang terbangkit Ketika motor diputar dan polaritasnya berlawanan dengan sumber. Pemodelan sistem dapat ditunjukkan dengan rumus sebagai berikut.

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (1)$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (2)$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (3)$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (4)$$

Dimana v , i dan e masing-masing menyatakan tegangan antar fasa, arus fasa dan Back EMF. resistansi disimbolkan dengan R dan L adalah induktansi. T_e dan T_L adalah torsi listrik dan torsi beban. J adalah inersia rotor, k_f adalah konstanta gesekan, dan m adalah kecepatan rotor (Nizam, 2014).

Ketika motor BLDC berputar, setiap belitan menghasilkan tegangan yang dikenal sebagai gaya gerak listrik balik atau EMF balik, yang berlawanan dengan tegangan utama yang disuplai ke belitan menurut Hukum Lenz. Polaritas EMF belakang ini berlawanan arah dengan tegangan yang diberi energi. Kembali EMF terutama tergantung pada tiga faktor:

- Kecepatan sudut rotor
- Medan magnet yang dihasilkan oleh magnet rotor
- Jumlah lilitan pada belitan stator

Factor diatas dijelaskan pada persamaan :

$$\text{Back EMF} = (E) \propto N/rB\omega$$

dimana

N : jumlah lilitan belitan per fasa,

L : panjang rotor,

r : jari-jari internal rotor,

B : kerapatan medan magnet rotor

ω : kecepatan sudut motor

Setelah motor selesai dibuat, komponen magnet pada pole rotor dan belitan pada stator slot akan bersifat permanen dan tidak dapat diubah. Satu-satunya faktor yang dapat mempengaruhi Back EMF adalah kecepatan sudut atau kecepatan rotor, dengan bertambahnya kecepatan maka Back EMF juga akan semakin meningkat (Yedamale, 2003).

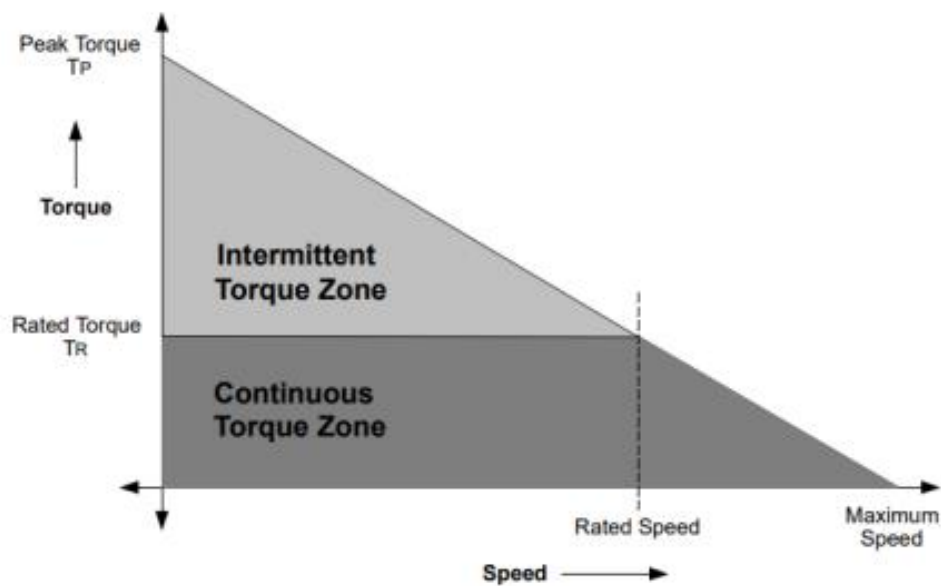
Keluaran dari motor brushless DC merupakan energi mekanik yang berupa torsi. Adapun persamaan yang merepresentasikan torsi pada konduktor motor brushless DC sebagai berikut

$$\tau_c = BI_c LR_{si}$$

$$\tau_c = 2x2_p BI_c LR_{si}$$

Pada persamaan diatas dapat dilihat bahwa torsi yang timbul pada konduktor adalah hasil perkalian antara gaya dengan jari-jari. Kemudian konduktor dililit hingga menjadi belitan dengan jumlah n . Pada setiap pertemuan kutub terdapat 3 kumparan sehingga rumus torsi berubah . Dari sini didapatkan bahwa torsi dipengaruhi oleh kerapatan fluks, arus, jumlah lilitan, panjang konduktor, serta diameter stator.

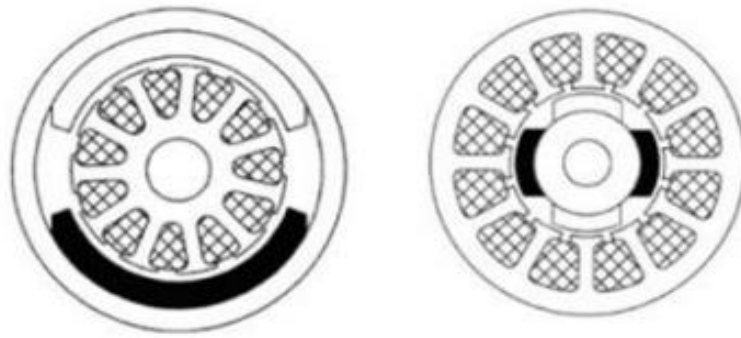
Ada dua parameter torsi yang digunakan untuk menentukan motor BLDC, yaitu peak torque dan rated torque. Peak torque merupakan torsi puncak atau torsi maksimal yang dapat dihasilkan oleh sebuah motor, sedangkan rated torque adalah nilai torsi yang dapat diukur dan bisa dijadikan perbandingan dengan parameter lainnya. Selama motor beroperasi, motor dapat dibebani hingga torsi dapat diukur. Pada motor BLDC torsi akan tetap konstan saat berputar pada kecepatan terukur atau rated speed. Saat motor dijalankan hingga kecepatan maksimum yang dapat mencapai 150% dari rated speed maka torsi akan mulai menurun. ketika motor mulai dari posisi diam dan selama akselerasi torsi ekstra diperlukan untuk mengatasi inersia beban dan rotor itu sendiri (Nizam, 2014).



Gambar 2. 2 Karakteristik Torsi-Kecepatan

Grafik diatas menjelaskan bahwa karakteristik torsi dan kecepatan pada motor brushless DC. sedangkan untuk mengetahui daya keluaran dari motor brushless DC bisa didapat melalui perhitungan torsi dikalikan kecepatan sudut.

Dalam hal struktur, motor brushless DC dibuat dengan struktur rotor luar atau rotor dalam seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2.3. Stator berada di dalam dan rotor berada di luar dalam struktur rotor luar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 motor brushless DC rotor luar memiliki kemampuan torsi yang lebih tinggi daripada struktur rotor dalam dengan ukuran yang sama. Namun, dari segi pengaturan termal lebih buruk daripada rotor bagian dalam karena kumparan stator berada di dalam. (Garip & Yasa, 2020)



Gambar 2. 3 Sketsa tipe rotor luar dan rotor dalam



Gambar 2. 4 Stator tipe dalam

2.3 Prinsip Kerja

Motor brushless DC adalah salah satu jenis motor sinkron dengan ketentuan medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor berputar pada frekuensi yang sama. Motor BLDC tidak mengalami “selip” yang biasanya terlihat pada motor induksi. Jenis konfigurasi pada motor Brushless DC yaitu konfigurasi fasa tunggal, 2 fasa dan 3 fasa. Sesuai dengan jenisnya konfigurasi tersebut pada statornya memiliki jumlah belitan yang sama dengan fasanya. Dari jumlah tersebut, motor 3 fasa adalah yang paling populer dan banyak digunakan. Dan pada penelitian kali ini akan membahas motor brushless DC 3 fasa.

Prinsip kerja pada motor brushless DC 3 fasa dipengaruhi oleh 2 komponen penting yaitu permanen magnet yang dipasang pada rotor, dan kumparan 3 fasa yang terdapat pada stator, dengan memanfaatkan gaya tarik-menarik dan tolak-menolak yang timbul pada kutub magnet permanen rotor akibat medan magnet yang terbentuk pada kumparan stator. Pembentukan medan magnet ini diatur oleh driver dari motor brushless DC, dalam hal ini Electronic Speed Controller. Medan magnet tiap fasa diatur oleh controller sehingga dapat menghasilkan kutub sesaat pada stator yang sesuai untuk memutar magnet permanen rotor. Ketika kutub magnet yang memiliki polaritas sama saling tolak-menolak, dan sebaliknya ketika memiliki polaritas

kutub yang berbeda menimbulkan gaya tarik-menarik. Prinsip kerja magnet tersebut dijadikan sumber penggerak motor brushless DC. (Yedamale, 2003)

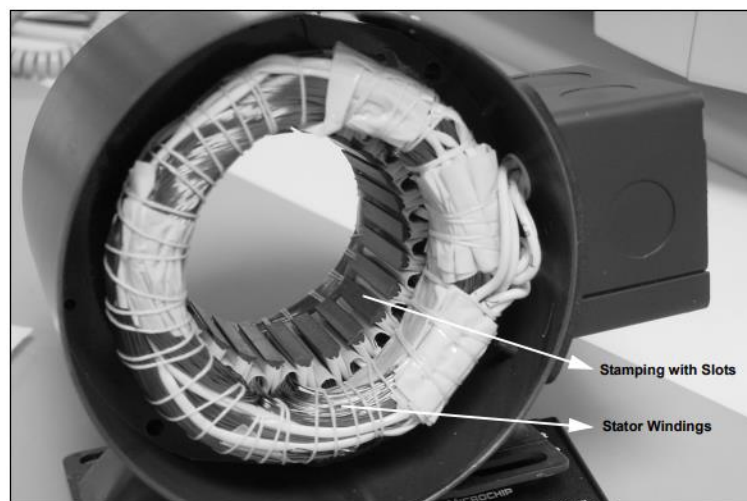
Dalam fase desain motor brushless DC, desainer harus bertujuan untuk mengoptimalkan torsi motor brushless dengan mempertimbangkan prinsip kerja dari motor brushless DC. Torsi motor adalah jumlah torsi yang dihasilkan oleh motor selama operasi. Komponen kunci yang mempengaruhi terbangkitnya torsi adalah magnet, belitan dan fluks. Ketika jumlah pasangan kutub magnet meningkat, jumlah torsi motor meningkat dengan daya input yang sama pula. Sementara jumlah kumparan atau belitan stator berpengaruh pada daya yang disuplai oleh motor, jalur aliran meminimalkan kerugian dengan mengarahkan seluruh medan magnet agar lebih merata. Fase desain motor sangat penting agar memperoleh hasil torsi yang maksimum yang diikuti oleh efisiensi penggunaan daya pada motor.

2.4 Konstruksi

Seperti motor listrik pada umumnya, motor brushless DC memiliki bagian yang diam dan bagian yang berputar. Bagian yang diam disebut stator dan bagian yang berputar disebut rotor. Pada stator terdapat inti stator, dan belitan stator. pada rotor terdapat permanen magnet, dan cangkang rotor. Bagian motor brushless DC dijelaskan pada penjelasan berikut

2.4.1 Inti Stator

Inti stator motor BLDC terdiri dari laminasi baja bertumpuk dengan belitan yang ditempatkan di slot yang dipotong secara aksial di sepanjang pinggiran bagian dalam (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5). Secara tradisional, stator menyerupai motor induksi; namun, belitan didistribusikan dengan cara yang berbeda. Kebanyakan motor brushless DC memiliki tiga belitan stator yang terhubung secara bintang atau delta. Masing-masing belitan ini dibangun dengan banyak kumparan yang saling berhubungan untuk membentuk belitan. Satu atau lebih kumparan ditempatkan di slot dan mereka saling berhubungan untuk membuat belitan. Masing-masing belitan ini didistribusikan di pinggiran stator untuk membentuk jumlah kutub yang genap.

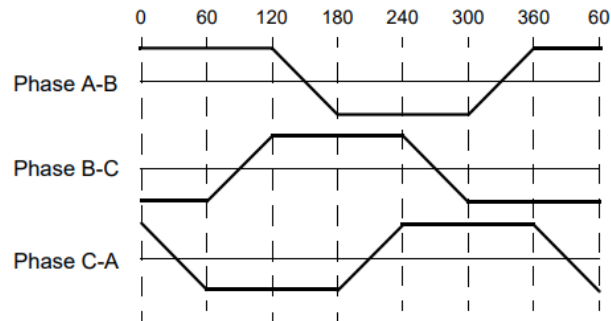


Gambar 2. 5 Inti Stator

Ada dua jenis varian belitan pada stator yaitu trapesium dan sinusoidal. Diferensiasi ini dibuat atas dasar interkoneksi kumparan di gulungan stator untuk memberikan berbagai jenis gaya gerak listrik balik (EMF). Tipe trapesium memberikan EMF balik secara trapesium dan EMF balik sinusoidal adalah sinusoidal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 dan Gambar

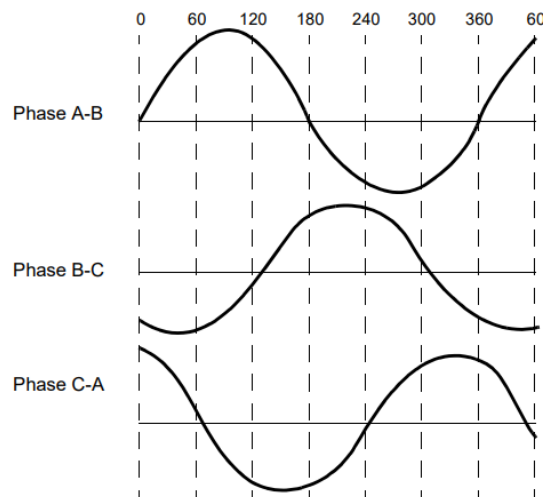
2.7 . Selain EMF balik, arus fasa juga memiliki variasi trapesium dan sinusoidal. (Yedamale, 2003)

TRAPEZOIDAL BACK EMF



Gambar 2. 6 Gelombang trapezoidal back EMF

SINUSOIDAL BACK EMF



Gambar 2. 7 Gelombang sinusoidal back EMF

2.4.2 Belitan Stator

Motor brushless DC memiliki sebuah kumparan yang disebut belitan stator, belitan stator merupakan kawat konduktor yang dilapisi email atau biasa disebut *enameled wire*. Belitan stator dililit pada inti stator tepatnya pada ujung inti stator yang berbentuk seperti gerigi yang dinamakan stator slot. Belitan stator yang dililit pada inti stator disebut dengan kumparan atau *coil*. Masing-masing belitan ini di tempatkan pada stator slot untuk membentuk jumlah kutub yang genap.

Belitan stator berfungsi untuk membangkitkan medan elektromagnetik yang menimbulkan gaya tarik-menarik dan gaya tolak-menolak dengan magnet permanen pada rotor. Setiap belitan yang dililit akan membentuk suatu jenis varian belitan yaitu belitan bintang atau belitan delta, sesuai karakteristik yang dibutuhkan. Perbedaan varian konfigurasi tersebut menghasilkan parameter elektrik dan keluaran yang berbeda. Variasi dari belitan dapat berpengaruh pada jenis motor yaitu motor tipe trapezoidal dan tipe sinusoidal. Diferensiasi ini

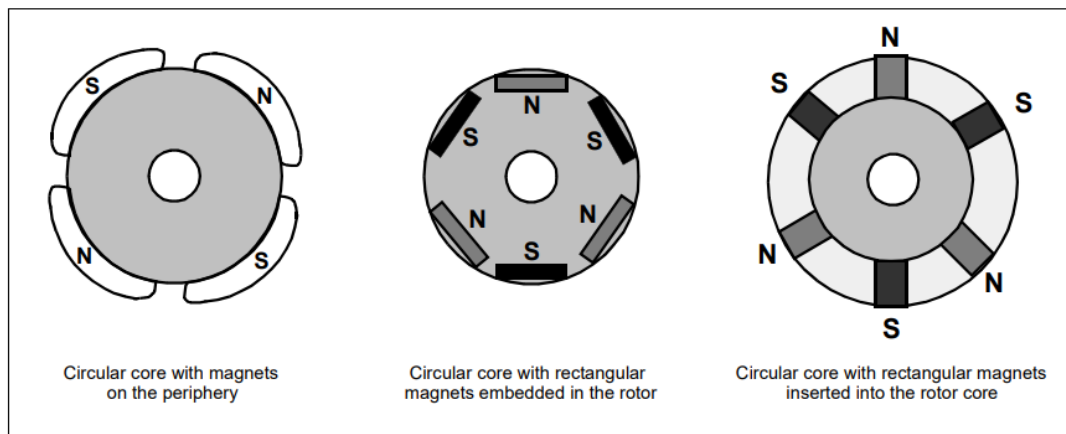
dibuat atas dasar interkoneksi belitan di inti stator untuk memberikan berbagai jenis gaya gerak listrik balik (EMF). gaya gerak listrik balik (EMF) adalah tegangan dengan polaritas yang terbalik dengan polaritas tegangan sumber dan terbangkit pada setiap belitan stator ketika motor sedang berputar gaya gerak listrik balik (EMF) dapat mempengaruhi sumber tegangan untuk mencukupi kebutuhan ketika pada keadaan arus nominal dan torsi nominal.

Arus fasa dari motor brushless DC juga memiliki variasi trapezoidal dan sinusoidal. Perbedaan variasi arus fasa terletak pada keluaran torsi dimana tipe sinusoidal lebih halus daripada motor trapezoidal. Namun keunggulan torsi pada tipe sinusoidal dipengaruhi penambahan interkoneksi belitan pada inti stator. (Yedamale, 2003)

2.4.3 Permanen Magnet

Permanen magnet terbuat dari magnet permanen dan dapat bervariasi dari dua hingga delapan pasang kutub dengan kutub Utara (N) dan Selatan (S) yang bergantian. Berdasarkan kerapatan medan magnet yang dibutuhkan dalam rotor, bahan magnet yang tepat dipilih untuk membuat rotor. Magnet ferit secara tradisional digunakan untuk membuat magnet permanen. Seiring kemajuan teknologi, magnet paduan tanah semakin populer. Magnet ferit lebih murah tetapi memiliki kelemahan kerapatan fluks rendah untuk volume tertentu. Sebaliknya, bahan paduan memiliki kerapatan magnetik tinggi per volume dan memungkinkan rotor untuk mengompresi lebih jauh untuk torsi yang sama. Juga, magnet paduan ini meningkatkan rasio ukuran terhadap berat dan memberikan torsi yang lebih tinggi untuk motor dengan ukuran yang sama menggunakan magnet ferit.

Neodymium (Nd), Samarium Cobalt (SmCo) dan paduan Neodymium, Ferrite dan Boron (NdFeB) adalah beberapa contoh magnet paduan tanah jarang. Penelitian berkelanjutan sedang dilakukan untuk meningkatkan kerapatan fluks untuk menekan rotor lebih jauh. Gambar 2.8 menunjukkan penampang dari pengaturan yang berbeda magnet pada rotor. (Yedamale, 2003)

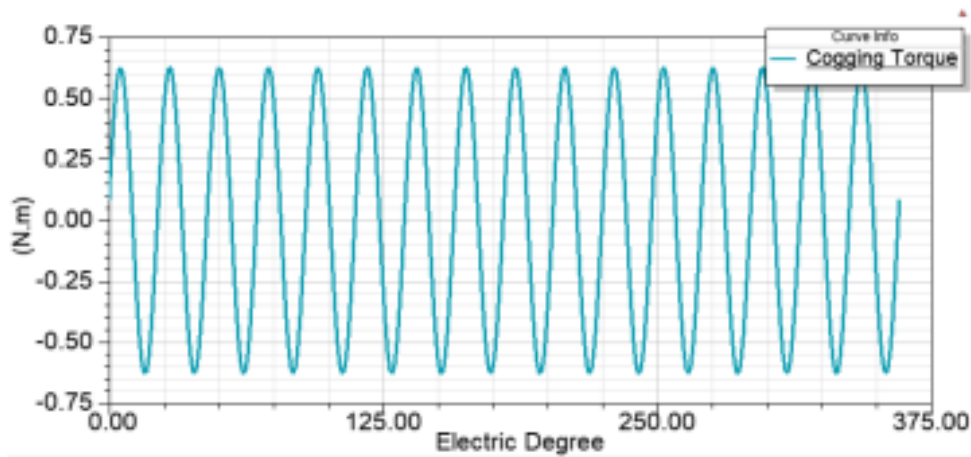


Gambar 2. 8 Beberapa macam penampang magnet rotor

Prinsip kerja dasar motor listrik didasarkan pada interaksi antara magnet pada rotor dan belitan pembawa arus pada stator. Namun, bahkan jika tidak ada arus yang melewati belitan, ada gaya tarik magnet antara magnet permanen rotor dan gigi feromagnetik stator. rasio kerapatan fluks yang di pengaruhi permanen magnet pada rotor ini menimbulkan efek torsi cogging.

Torsi cogging adalah efek dari interaksi magnetik antara magnet permanen rotor dan gigi feromagnetik pada stator. Profil torsi cogging motor tergantung pada jumlah magnet

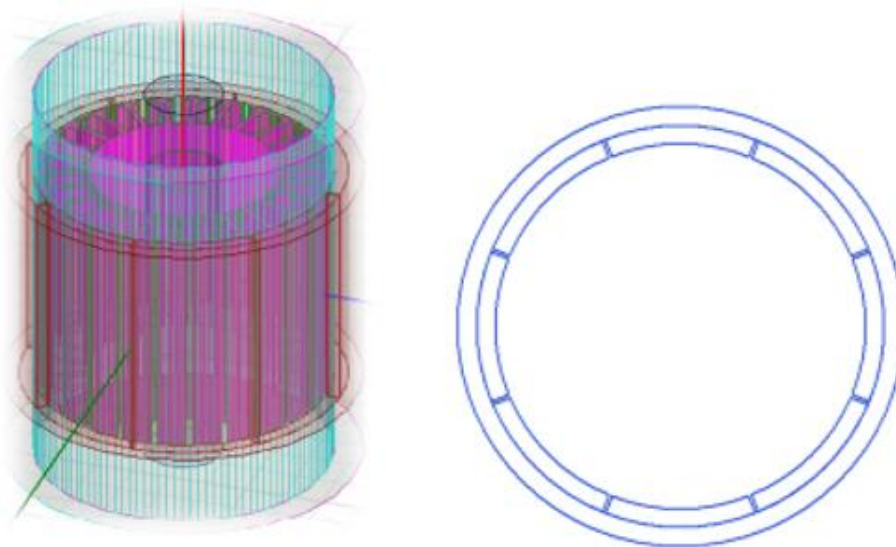
permanen di rotor dan jumlah gigi di stator. Karena momen cogging tidak diinginkan, dapat diminimalkan dengan mengoptimalkan jumlah kutub magnet dan gigi, atau dengan memutar atau membentuk magnet permanen. Torsi cogging terjadi pada motor yang memiliki magnet permanen. Kadang-kadang disebut torsi rangkaian terbuka karena terjadi pada motor yang bahkan tidak diberi arus listrik. Gambar 2.9 menunjukkan torsi cogging dari desain motor brushless DC yang memiliki torsi cogging kurang dari 2 NM dengan spesifikasi nyata mencapai nilai torsi nominal 42 Nm. Ini berarti bahwa nilai torsi cogging tidak lebih dari 4% dari torsi motor.



Gambar 2. 9 Grafik gelombang cogging torque

2.4.4 Cangkang rotor

Pada motor brushless DC jenis konstruksi *Out-runner*, magnet dilekatkan pada cincin atau cangkang di sekitar kumparan stator, yang disebut rotor. Dengan demikian, motor memiliki cangkang yang berputar, bukan poros yang berputar. Dengan konfigurasi ini, lebih banyak gaya elektromekanis yang dihasilkan dan dapat mencapai tingkat torsi yang jauh lebih tinggi.

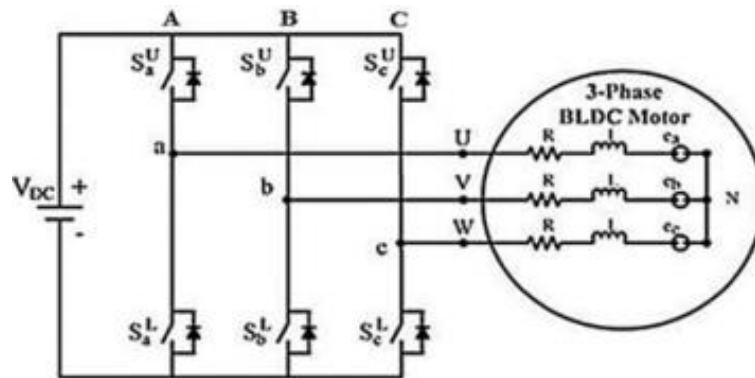


Gambar 2. 10 Sketsa outer-rotor Motor Brushless DC

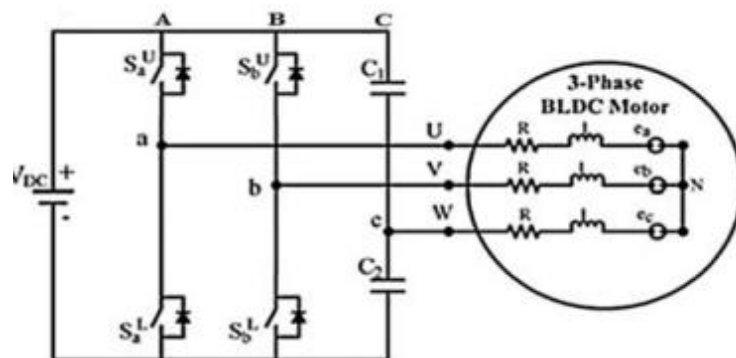
2.4.5 Pengontrol Kecepatan

Metode pengendalian kecepatan motor brushless DC sangat penting terutama saat digunakan pada kendaraan listrik misalnya mobil listrik atau drone bempulsi motor listrik, karena harus memiliki torsi yang konstan, efisiensi yang lebih tinggi, dan pengendalian kecepatan yang sangat mulus (Aspalli et al., 2015).

Sistem propulsi elektrik dengan menggunakan motor Brushless DC (BLDC) banyak digunakan saat ini pada Unmanned Aerial Vehicle (UAV), karena memiliki kinerja yang efisien dan peningkatan daya tahan terbang yang lama. Pengontrol kecepatan BLDC memiliki peran penting dalam sistem propulsi listrik ini. Inverter tiga fasa dengan desain enam sakelar adalah yang paling umum digunakan. Ada dua jenis sistem pengontrol motor brushless DC menggunakan enam sakelar atau six-switch three-phase inverter (SSTPI), dan empat sakelar atau four-switch three phase inverter (FSTPI). Secara teori sistem SSTPI lebih tidak efisien karena memiliki lebih banyak sakelar yang linier dengan rugi-rugi yang dihasilkan. Jumlah sakelar yang lebih sedikit dapat mengurangi rugi-rugi yang terjadi. Namun, topologi empat sakelar memiliki beberapa keterbatasan kinerja seperti kurang optimal dalam supply daya pada kumparan dan riak torsi yang besar. Motor brushless DC umumnya digerakkan oleh SSTPI ideal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 . FSTPI yang ditunjukkan pada Gambar 2.12 juga digunakan oleh Sebagian peneliti. (Y.B. Adyapaka Apatya et al., 2020)



Gambar 2. 11 Pengontrol motor brushless DC tipe SSTPI



Gambar 2. 12 Control motor brushless DC tipe FSTPI

2.5 Rugi-rugi

Saat merancang motor listrik, penting untuk mempelajari rugi-rugi motor untuk menemukan cara meningkatkan efisiensi motor dan merancang sistem pendinginan yang efisien. Rugi-rugi motor terdiri dari rugi-rugi elektrik dan mekanis. Secara eksistensi rugi-rugi

elektrik menjadi rugi-rugi utama dalam menurunkan efisiensi motor listrik, namun rugi-rugi mekanis juga berpengaruh, seperti rugi bantalan, rugi angin, dan rugi poros (Decker et al., n.d.).

2.5.1 Rugi Inti

Rugi-rugi inti (P_{fe}), terdiri dari rugi-rugi arus eddy dan efek histeresis. Pada motor DC brushless, variasi fluks pada inti stator tidak sinusoidal dan oleh karena itu rugi inti besi diberikan oleh:

$$P_{fe} = k_h f \hat{B}^a + \frac{k_e}{2\pi^2} \left\{ \frac{dB}{dt} \right\}_{rms}^2 \quad (w/kg)$$

Dimana bagian kiri adalah rugi histeresis dan bagian kanan adalah rugi arus eddy. B adalah nilai puncak kerapatan fluks dan f , k_h , dan k_e adalah konstanta yang ditentukan oleh penyesuaian kurva (Decker et al., n.d.). Rugi-rugi histeresis adalah rugi panas akibat proses magnetisasi demagnetisasi pada inti besi, rugi histeresis berkaitan dengan adanya momen dipole dengan ketentuan saat motor belum pernah dipakai maka momen arah momen dipole adalah acak. Rugi-rugi arus eddy adalah rugi panas akibat arus berputar pada inti besi, cara untuk mereduksi rugi panas tersebut adalah membuat laminasi pada inti besi yang digunakan sebagai stator atau tempat kumparan jangkar, semakin tipis laminasi akan semakin baik proses reduksi rugi panas akibat arus eddy.

2.5.2 Rugi Tembaga

Rugi-rugi tembaga (P_{cu}) yang disebabkan oleh pemanasan resistif dari belitan tembaga dan didefinisikan oleh :

$$P_{cu} = 3R_{\theta} I_{rms}^2$$

di mana R_{θ} dan I_{rms} masing-masing adalah resistansi fase belitan dan nilai RMS dari arus fase motor. Pada rugi - rugi tembaga , rugi - rugi yang ditimbulkan sebanding dengan nilai I , dimana I merupakan arus yang mengalir pada belitan tembaga. Sehingga semakin besar arus maka semakin besar rugi - rugi pada tembaga tersebut(Decker et al., n.d.).

2.5.3 Rugi Mekanis

Rugi secara teori memang tidak lebih berpengaruh ketimbang rugi elektrik, namun dalam beberapa kasus rugi mekanik menjadi sangat berpengaruh jika tidak diperhatikan adanya hingga menjadi kerusakan yang fatal terhadap motor listrik. Rugi-rugi mekanis dibagi menjadi dua bagian: rugi-rugi gesekan dan rugi-rugi angin, diproyeksikan dalam persamaan :

$$P_{mec} = P_{fr} + P_{wind}$$

Rugi-rugi gesekan pada bantalan atau *bearing* dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$P_{fr} \approx \frac{3}{2} n_r G_{rot} N \times 10^{-3}$$

Dimana n adalah banyaknya bearing, G_{rot} adalah berat rotor, dan N adalah kecepatan motor. Sedangkan rugi-rugi angin di proyeksikan dengan rumus :

$$P_{wind} \approx 2D_{out}^3 LN^3 \times 10^{-6}$$

Dimana D_{out} adalah diameter luar rotor dan L adalah Panjang rotor (Andrada et al., n.d.).

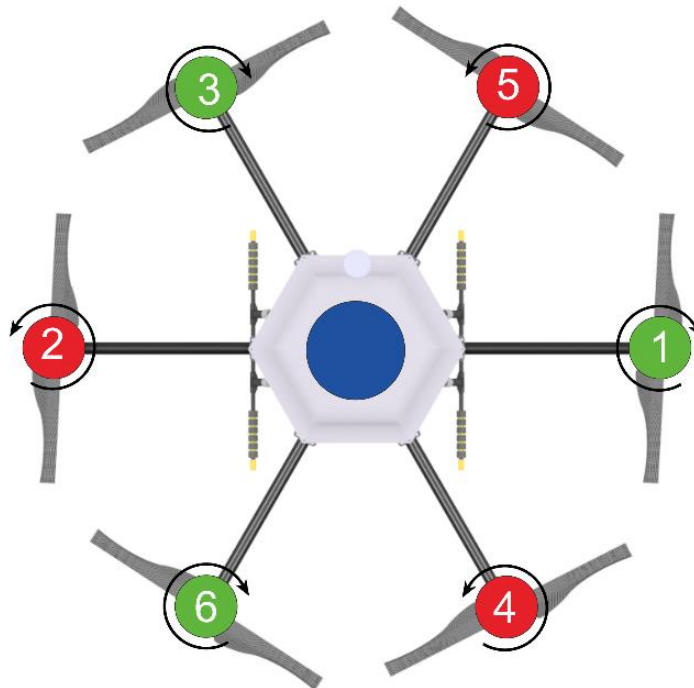
2.6 Sistem Propulsi pada Drone Agricultura

Drone biasanya menggunakan motor brushless DC sebagai propulsi karena memiliki efisiensi yang tinggi dan bobot yang ringan. Penggunaan baterai sebagai catu daya drone menyebabkan terbatasnya energi sehingga efisiensi sangat penting untuk menerbangkan drone selama mungkin. Motor brushless DC tidak memiliki bagian sikat yang berkontak sehingga meminimalkan gesekan. Minimalnya gesekan berdampak pada menurunnya potensi kehilangan energi sehingga motor jenis ini memiliki efisiensi yang tinggi (Prakosa et al., n.d.).

2.6.1 Motor Brushless DC Sebagai Propulsi drone agricultura

Drone biasanya menggunakan dua pasang baling-baling yang identik, yaitu dua searah jarum jam (CW) dan dua berlawanan arah jarum jam (CCW). Kontrol kecepatan setiap rotor secara khusus dapat menghasilkan gaya dorong total yang diinginkan, yang membuat drone dapat terbang. Kontrol kecepatan motor brushless DC sangat penting untuk menentukan posisi dan kecepatan drone secara akurat.

Drone merupakan pesawat tanpa awak multirotor sebagai contoh quadcopter. Quadcopter adalah drone multi-rotor, yang diterbangkan dan didorong oleh empat rotor atau aktuator. Kontrol posisi dapat dicapai dengan variasi kecepatan setiap arah rotor. Selain itu, perubahan kecepatan setiap rotor secara khusus dapat menghasilkan gaya dorong total yang diinginkan, setiap rotor tidak hanya menghasilkan gaya dorong tetapi juga torsi di sekitar pusat rotasi. Dorongan ini menciptakan gaya hambat yang berlawanan untuk membuat drone terbang.

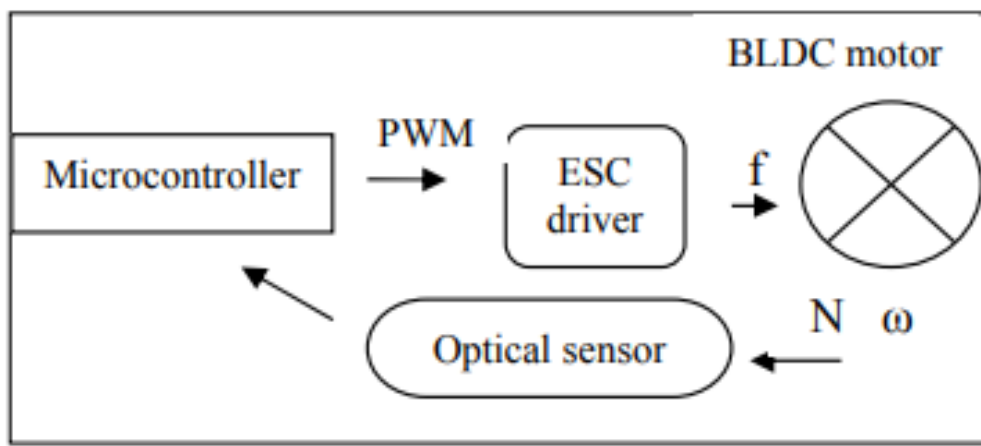


Gambar 2. 13 Konfigurasi arah rotor pada drone

Keuntungan utama menggunakan motor brushless DC pada drone adalah respons dinamisnya yang tinggi, efisiensi daya yang baik, struktur yang kompak, umur yang relatif panjang, biaya yang rendah, bobot yang ringan, dan persyaratan perawatan yang rendah karena

tidak adanya sikat karbon. Namun, penggunaan motor brushless DC mungkin dibatasi oleh tegangan maksimum yang diterapkan, oleh daya listrik yang tersedia yaitu baterai, dan oleh ketersediaan pengontrol kecepatan elektronik yang sesuai. Motor brushless DC dengan level tegangan dalam kisaran 6 hingga 24 V adalah yang paling umum (Carev et al., 2021).

Untuk memutar motor brushless DC tiga fasa, menggunakan inverter *six-step commutation* dengan membiarkan arus mengalir hanya dalam dua fase pada setiap saat. Fase ketiga berkaitan dengan back EMF sebagai indikator posisi rotor. Driver *electric speed controller* (ESC) digunakan untuk mengukur posisi rotor oleh sensor hall kemudian mengontrol kecepatan motor. Mikrokontroler mengirimkan pulsa PWM dengan menyesuaikan *duty cycle* ke transistor pada ESC untuk kontrol kecepatan motor. Skema propulsi pada drone dijelaskan pada gambar 2.14 yaitu :



Gambar 2. 14 Blok diagram sistem instrumentasi propulsi

2.6.2 Thrust to Take off Weight Ratio

Propulsi pada sebuah drone adalah yang menentukan karakter drone saat terbang seperti kelincahan, kekuatan melawan angin, hingga kekuatan membawa beban. Propulsi harus memiliki *thrust* atau gaya angkat yang sesuai dengan misi dari drone. Gaya angkat pada drone selain dipengaruhi motor penggerak juga dipengaruhi propeller.

Tipe dari motor juga berpengaruh seperti tipe *inrunner* yang lebih mengedepankan kelincahan dan lebih cocok untuk pesawat *fixed wing*. Dan untu tipe yang dipakai di penelitian ini adalah tipe *Outrunner* yang lebih stabil dan lebih baik dalam torsi dan sejalan dengan gaya angkat tiap motornya (Carev et al., 2021).

2.6.3 Suplai Daya

Drone agricultura menggunakan motor brushless DC sebagai propulsinya, dengan konfigurasi yang telah di jelaskan pada bab sebelumnya, controller motor brushless DC membutuhkan suplai daya berjenis arus searah atau DC. Umumnya suplai daya DC yang dipakai berasal dari baterai karena lebih simple dan portable. Ada dua jenis baterai yang umum digunakan pada sebuah drone untuk menyuplai motor propulsi, yaitu baterai ion litium dan Baterai Lithium Polymer.

Baterai ion litium (Li-ion atau LIB) bergerak dari elektroda negatif ke elektroda positif saat dilepaskan, dan kembali saat diisi ulang. Baterai Li-ion memakai senyawa litium interkalasi sebagai bahan elektrodanya, berbeda dengan litium metalik yang dipakai di baterai litium non-isi ulang. Baterai ion litium umumnya dijumpai pada barang-barang elektronik konsumen. Baterai ini merupakan jenis baterai isi ulang. yang paling populer untuk peralatan elektronik

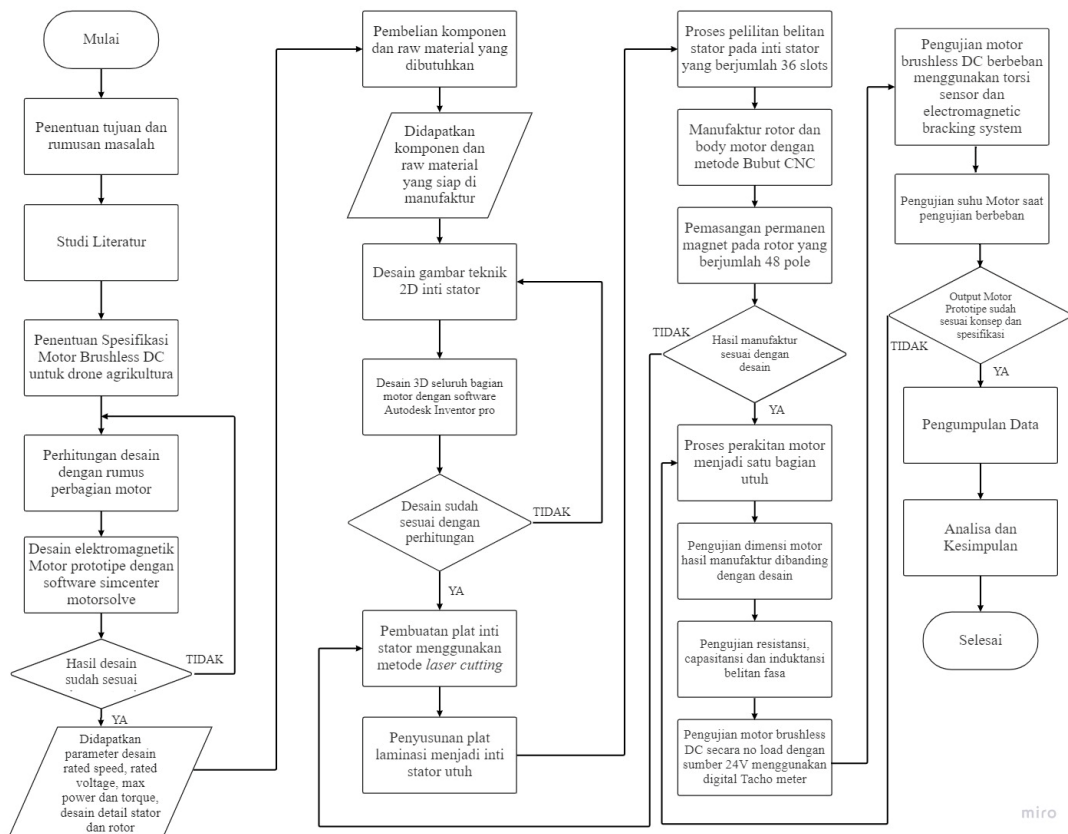
portabel, karena memiliki salah satu kepadatan energi terbaik, tanpa efek memori, dan mengalami kehilangan isi yang lambat saat tidak digunakan. Selain digunakan pada peralatan elektronik konsumen, LIB juga sering digunakan oleh industri militer, kendaraan listrik, dan dirgantara. Sejumlah penelitian berusaha memperbaiki teknologi LIB tradisional, berfokus pada kepadatan energi, daya tahan, biaya, dan keselamatan intrinsik.

Jenis lain adalah baterai Lithium Polymer (Li-Po) Hampir sama dengan baterai Li-Ion akan tetapi baterai Li-Po tidak menggunakan cairan sebagai elektrolit melainkan menggunakan elektrolit polimer kering yang berbentuk seperti lapisan plastik film tipis. Lapisan film ini disusun berlapis-lapis diantara anoda dan katoda yang mengakibatkan pertukaran ion. Dengan metode ini baterai LiPo dapat dibuat dalam berbagai bentuk dan ukuran. Diluar dari kelebihan arsitektur baterai LiPo, terdapat juga kekurangan yaitu lemahnya aliran pertukaran ion yang terjadi melalui elektrolit polimer kering. Hal ini menyebabkan penurunan pada charging dan discharging rate. Masalah ini sebenarnya bisa diatasi dengan memanaskan baterai sehingga menyebabkan pertukaran ion menjadi lebih cepat, namun metode ini dianggap tidak dapat untuk diaplikasikan pada keadaan sehari-hari. Seandainya para ilmuwan dapat memecahkan masalah ini maka risiko keamanan pada batera jenis lithium akan sangat berkurang (Afif et al., 2015).

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 3 METODOLOGI

Setelah memahami literatur dan konsep dasar yang dibutuhkan, pada bab ini akan membahas tentang metodologi penelitian meliputi proses desain, simulasi, dan proses manufaktur dari motor brushless DC prototipe. Referensi pembuatan motor brushless DC prototipe mengacu pada pengaplikasian motor untuk dipakai sebagai propulsi drone agrikultura, drone agrikultura merupakan jenis *heavy-lift drones* atau tergolong drone angkat berat. Muatan drone agrikultura tahap riset umumnya dalam cakupan 1-2 kg sehingga target daya motor prototipe pada penelitian ini adalah 0,53 KW dengan target torsi 4,7 Nm dirasa sudah cukup untuk memenuhi kebutuhan gaya angkat namun harus disesuaikan dengan propeller yang dipakai. Spesifikasi propeller umumnya berdiameter besar dengan sudut *pitch* yang kecil agar memiliki karakter stroke yang tinggi dan konstan velocity (KV) yang rendah (Carev et al., 2021). Stroke yang tinggi artinya motor harus memiliki torsi yang tinggi pula, sedangkan konstan velocity yang rendah menandakan tipe motor memiliki kecepatan yang rendah. Penelitian diawali dengan menentukan karakter motor yaitu motor brushless DC RPM rendah yang cocok untuk diaplikasikan pada drone agrikultura. Dilanjutkan proses desain dimulai dari merencanakan, melakukan perhitungan desain dan menentukan spesifikasi dan bahan motor. Proses simulasi menggunakan software simcenter motorsolve, dan proses desain 3D sebagai proyeksi menggunakan software Autodesk inventor. pembuatan prototipe dilakukan dengan mencetak inti stator menggunakan metode *laser cutting*, kemudian pembuatan rotor dan body motor dengan metode bubut CNC. Setelah komponen tercetak dilanjutkan proses pelilitan kumparan stator dan pemasangan magnet permanen secara manual. Setelah itu dilakukan pengujian yang dirangkai secara mandiri.



Gambar 3. 1 Diagram Alir penelitian

3.1 Finite Elemen Method (FEM)

Metode elemen hingga (*Finite Elemen Method (FEM)*) merupakan salah satu metode numerik yang diaplikasikan untuk menyelesaikan permasalahan fisik, khususnya pada desain dan analisis Teknik, seperti analisis tegangan, aliran fluida, persebaran fluks, medan magnet dan arus listrik, dan lain-lain. Metode elemen hingga membagi sistem menjadi beberapa elemen yang saling berhubungan seperti sebuah peta.

Dasar dari metode elemen hingga dibagi dalam tiga poin penting yaitu studi literatur, proses desain dan analisis, dilanjutkan proses manufaktur. Studi literatur dimulai dengan adanya kebutuhan spesifikasi dan implementasinya yang berlanjut pada pengumpulan informasi terkait dengan desain dan hasilnya merupakan konsep dari desain. Pada proses desain dimodelkan dalam bentuk dua dan tiga dimensi sehingga membentuk proyeksi dan gambaran sebagai pedoman proses manufaktur, dalam poin ini yang tak kalah penting adalah proses simulasi sistem menggunakan software yang mendukung sistem *Finite Elemen Analisis (FEA)*. Pada penelitian ini digunakan software *Simcenter Motorsolve FEA*. Setelah simulasi dan desain dilakukan evaluasi sebelum memulai proses manufaktur.

Pada proses manufaktur dimulai pembelian *raw material* sesuai yang terkonsep pada konsep desain, kemudian proses manufaktur dilakukan menggunakan alat dan bahan yang tersedia di dalam negeri.

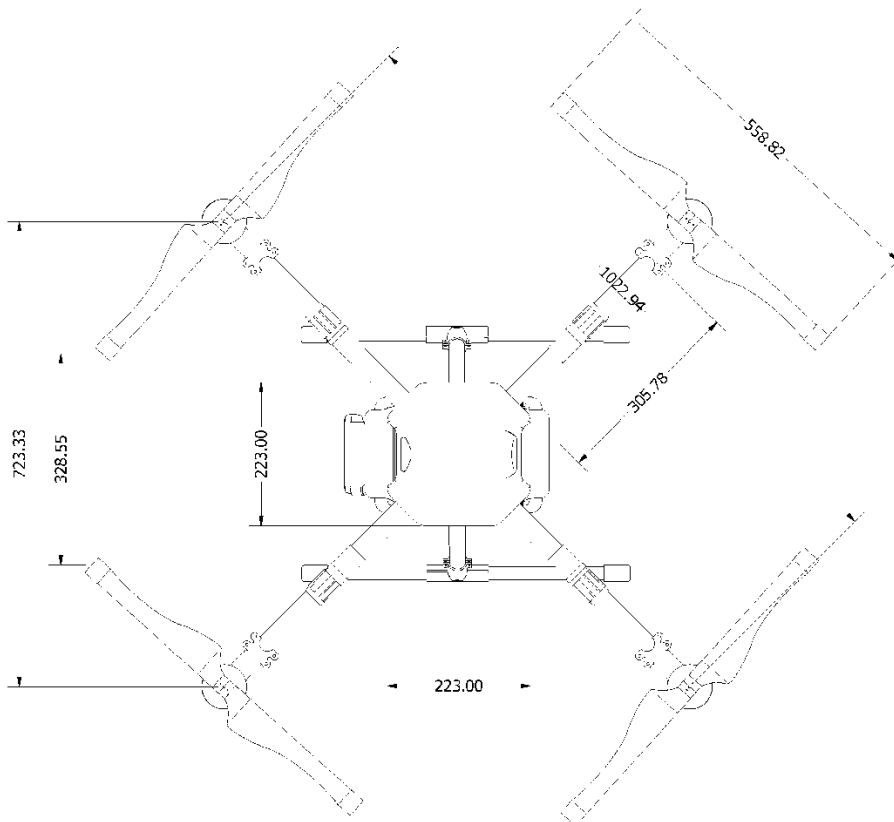
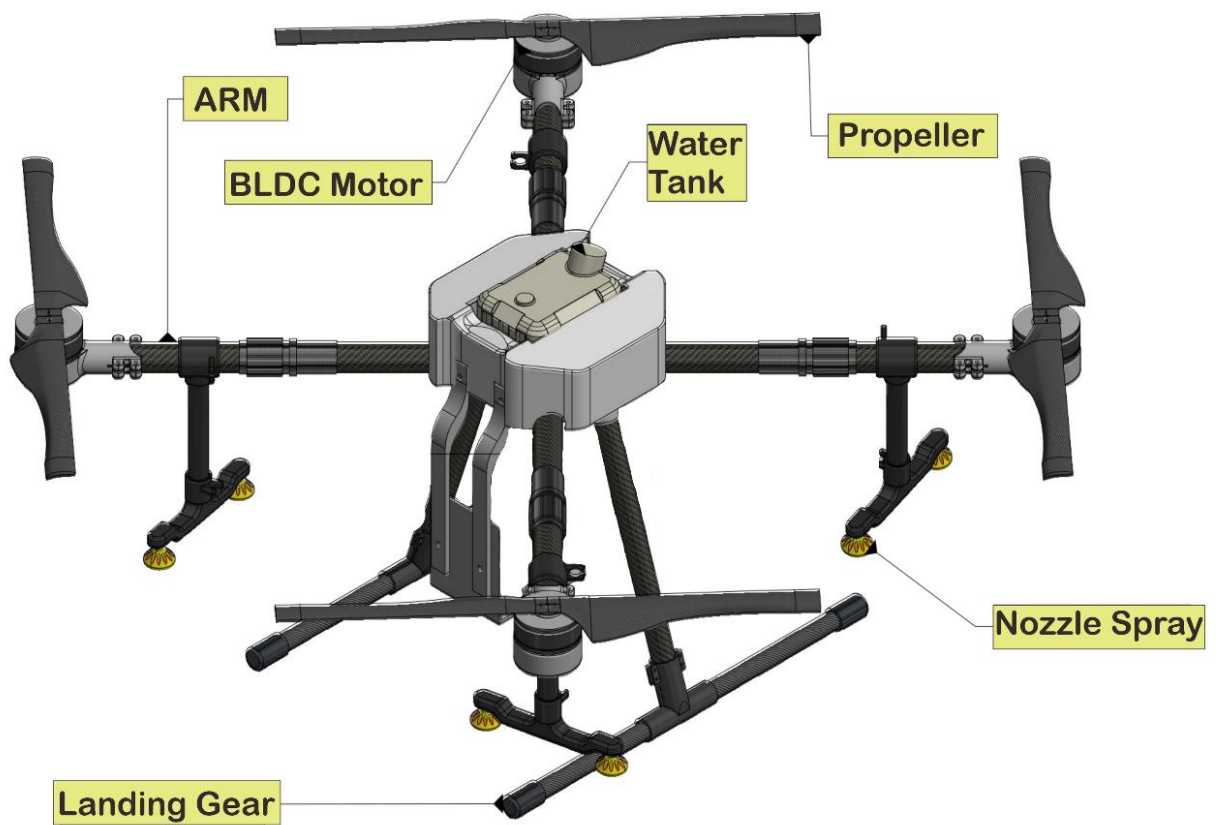
3.2 Urutan pelaksanaan penelitian

Pada penelitian ini dilaksanakan dalam beberapa tahapan. Dimulai dari studi literatur, simulasi sistem, implementasi sistem, proses manufaktur, pengujian alat, pengambilan dan pengolahan data, dan kesimpulan.

3.2.1 Perencanaan desain sistem

Pada penelitian ini perancangan motor brushless DC ditujukan untuk pengaplikasian pada pesawat tanpa awak (*UAV*) yaitu drone agrikultura. Drone agrikultura memiliki misi melakukan pekerjaan dibidang pertanian seperti pengairan via udara, penyemprotan pestisida, hingga penebaran bibit tanaman. Dengan misi tersebut drone dituntut memiliki karakteristik khusus yaitu memiliki waktu terbang yang lebih lama, memiliki daya angkat yang tinggi, dan memiliki efisiensi daya yang baik. Karakteristik yang dibutuhkan sangat dipengaruhi oleh pemilihan propulsi yang menjadi mesin penggerak utama, dalam penelitian ini akan merancang motor brushless DC sebagai propulsi dari drone agrikultura. Kontribusi penelitian ini terletak pada perancangan motor brushless DC dengan parameter yang telah didesain untuk meningkatkan torsi dalam kondisi kecepatan rendah yang memang diperuntukkan untuk drone agrikultura yang termasuk drone kelas berat (Carev et al., 2021).

Pada penelitian ini bertujuan untuk merancang motor untuk drone tipe *quadcopter* dengan menggunakan propeller yang telah ditentukan yaitu propeller full carbon berdiameter 20 inchi dengan pitch 6 inchi. Selain itu penggunaan drone dibidang agrikultura ini menggunakan nozzle di setiap armnya, yaitu 2 buah nozzle. Berikut dilampirkan desain konsep rancangan drone agrikultura beserta motor brushless DC. Selain itu juga ditampilkan tabel perhitungan konsep thrust drone dan flight time yang dihasilkan ketika drone menggunakan motor brushless DC prototipe, dengan mempertimbangkan thrust to weight ratio.



Gambar 3. 2 Desain 2D dan 3D konsep Rancangan Drone

Tabel 3. 1 Desain Thrust dan flight time Drone

DESAIN			
Berat Total			
Pixhawk Cube		75g	
ESC		26g	
Tattu 10000mAh		1309g	
motor		400g	
Quadcopter			
Pixhawk Cube		75g	
ESC		104g	
Tattu 10000mAh		1309g	
Desain Motor		1600g	
Frame		1200g	
Total		4288g	
Thrust Requirement		1072g	
Takeoff Current		60A	
Beban 10Kg			
Total		14288	
Thrust Requirement		3572	
Takeoff Current		37,6	
Flight Time		12,765957	
Desain Motor	Throttle	torque(Nm)	Thrust
prop 20x6	100%	2,3	10000

Dari konsep desain dan perhitungan thrust to weight ratio diatas dihasilkan thrust tertinggi yaitu 10kg per motor dengan torsi sebesar 2,3 Nm. Karena drone adalah tipe quadcopter maka thrust maksimal yang dihasilkan adalah 40kg dengan beban yang harus dibawa sekitar 15kg maka flight time yang diharapkan adalah drone mampu terbang selama 13 menit.

3.2.2 Desain Motor Brushless DC

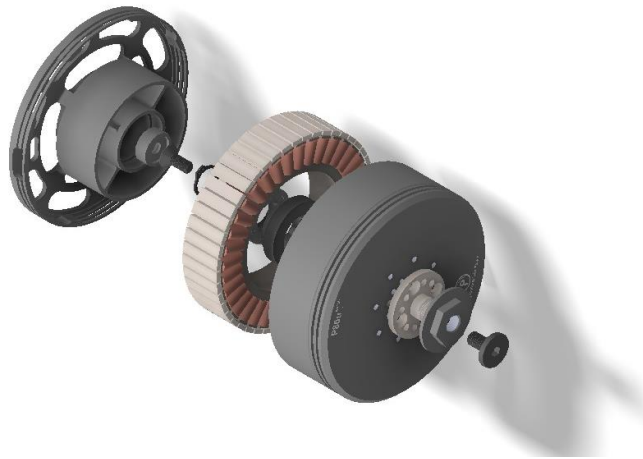
Pada proses mendesain motor listrik, perlu diperhatikan besar nilai dari parameter-parameter yang akan digunakan. Diantara parameter penyusun motor listrik adalah dimensi motor, kumparan jangkar, resistivitas medan magnet, jumlah lilitan N. Parameter tersebut harus sesuai dengan output yang akan dicapai oleh motor dan sesuai dengan kemampuan atau rating dari komponennya.

Tabel 3. 2 Parameter desain motor

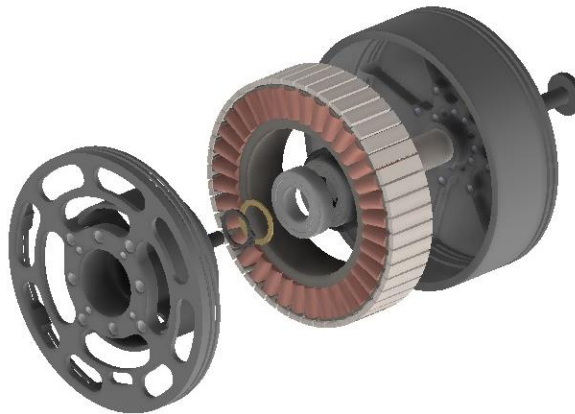
No	Parameter	Value
1	Outer diameter	91,6 mm
2	Air gap thickness	0,5 mm
3	Stack height	40 mm
4	Rotor type	Outrunner
5	Stator type	Square type
6	Number of phases	3
7	Number of stator slots	36
8	Number of magnet pole	48
9	Supply voltage	22,2 V (6s lippo battery)

10	Rater current	60 A
11	Rated speed	6500rpm
12	Rotor material	Alloy
13	Stator core material	Stainless steel
14	Permanent magnet	Neodymium n35
15	Stator Cooper Enamel	0,20 mm AI-EIW – 220°C

Setelah menentukan parameternya dilanjutkan pemodelan motor brushless DC yang diinginkan dengan design 3D untuk memproyeksikan dan sebagai pedoman proses manufaktur. Desain 3D motor menggunakan software Autodesk inventor 2020.



(a)



(b)

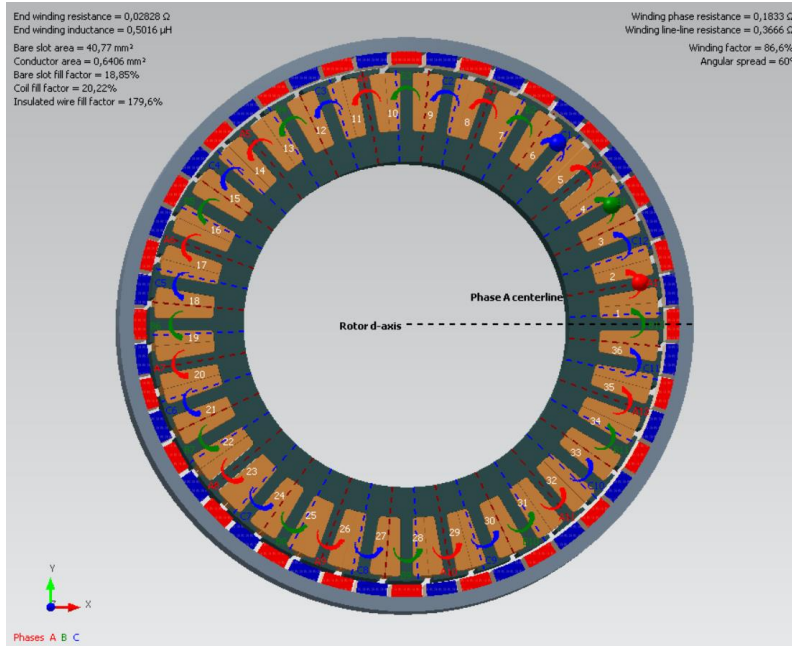
Gambar 3. 3 (a). desain 3D tampak depan, (b). desain 3D tampak belakang

3.2.1.1 Kawat tembaga

Kawat tembaga email yang dipakai pada penelitian ini berdiameter 0,20 milimeter, dengan kapasitas arus sebesar 0,25A. Jenis tembaga yang dipakai adalah polyamide imide atau dipasaran sering disebut tembaga AIW atau AI-EIW yang memiliki ketahanan suhu hingga 220 derajat Celsius. Jenis tembaga ini di klaim sebagai kualitas tebaik di kelasnya karena pad umumnya kawat tembaga yang ada dipasaran tahan hanya sampai 180 derajat Celsius.

3.2.1.2 Penentuan belitan stator

Konfigurasi belitan pada stator memiliki peranan penting dalam menerima suplai arus tiga fasa dari kontroler. Konfigurasi yang tersedia adalah konfigurasi delta dan star, sesuai dengan studi literatur yang dipelajari maka pada penelitian ini dipakai konfigurasi star karena memiliki karakteristik *High torque low RPM*. Selain itu konfigurasi star lebih efisien dalam konsumsi arus. Berikut ilustrasi belitan stator pada gigi gerigi stator slots :



Gambar 3. 4 Ilustrasi belitan stator

Tabel 3. 3 Parameter belitan stator

No	Parameter	Value
1	Connection type	Wye (Star)
2	Number of parallel paths	1
3	Wire size method	Awg wire
4	Awg number	32
5	Number of strands in hand	20
6	Enameled wire thickness	0,20
7	Winding type	Lap
8	Number of coil per set	1
9	Coil span	1
10	Number of layers	2
11	Phase offsets	2
12	Number of turns	6
13	Number of phasa A coils	12
14	Number of phasa B coils	12
15	Number of phasa C coils	12

Tabel 3. 4 layout belitan stator

Fasa belitan	Belitan	Go	Return	Of turns
Layout fasa A	1	1	2	6
	2	4	5	6
	3	7	8	6
	4	10	11	6
	5	13	14	6
	6	16	17	6
	7	19	20	6
	8	22	23	6
	9	25	26	6
	10	28	29	6
	11	31	32	6
	12	34	35	6
Layout fasa B	1	3	4	6
	2	6	7	6
	3	9	10	6
	4	12	13	6
	5	15	16	6
	6	18	19	6
	7	21	22	6
	8	24	25	6
	9	27	28	6
	10	30	31	6
	11	33	34	6
	12	36	1	6
Layout fasa C	1	5	6	6
	2	8	9	6
	Belitan	Go	Return	Of turns
	3	11	12	6
	4	14	15	6
	5	17	18	6
	6	20	21	6
	7	23	24	6
	8	26	27	6
	9	29	30	6
	10	32	33	6
	11	35	36	6
12	2	3	6	

Setelah penyajian data pada table diatas pembuktian perhitungan konsep dilakukan untuk mendapatkan komposisi banyaknya belitan stator dan pengaruhnya terhadap torsi dari motor, dapat dilihat pada persamaan torsi pada posisi tertentu yaitu :

$$T = -3NLI_m B_m r \cos(\emptyset)$$

Dimana N adalah jumlah lilitan/belitan fasa. L adalah panjang efektif konduktor. Persamaan torsi maksimum adalah

$$T_m = -\frac{3}{2}NB_mI_mA$$

Persamaan diatas merepresentasikan bahwa torsi berbanding lurus dengan banyaknya jumlah belitan fasa dan besarnya fluks yang terbangkit. Pada penelitian ini jumlah N adalah 6 lilitan tiap satu slot, dengan slot yang berjumlah 36 slot maka jumlah total N lilitan adalah 6x36 yaitu 216 N satuan lilitan.

Pada penelitian ini menggunakan kawat tembaga enamel dengan diameter 0,2 dengan kekuatan penghantaran arus sebesar 0,25A dipilih sebanyak 20 buah kawat tembaga dengan tujuan meningkatkan rating arus menjadi 0,25A x 20 yaitu 5A. Penggunaan untai tembaga yang lebih kecil dipilin untuk meningkatkan rating arus alih-alih menggunakan tembaga berdiameter besar adalah untuk menghindari rugi-rugi tembaga, karena kerugian paling signifikan berasal dari belitan karena resistansi tembaga. Motor berkecepatan tinggi pada bentuk gelombang arus sinusoidal frekuensi tinggi, yang dapat membuat resistansi belitan efektif sangat tinggi dan oleh karena itu rugi-rugi tembaga meningkat ketika frekuensi bertambah. Hambatan belitan motor kecepatan tinggi merupakan hasil dari *skin effect*. Fenomena utama yang menyebabkan kerugian ac adalah *skin effect* yang merupakan kecenderungan arus frekuensi tinggi mengalir pada permukaan konduktor. Efek kulit dapat dikurangi melalui penggunaan untai konduktor yang lebih kecil.



Gambar 3. 5 Untaian kawat tembaga

Arus bolak-balik pada frekuensi tinggi terbatas pada lapisan tipis pada permukaan konduktor karena *skin effect*. Maka dari itu menggunakan tembaga diameter kecil dapat mengurangi *skin effect* karena permukaan tembaga lebih kecil. Teori umum yang menunjukkan bahwa arus menembus kedalaman δ dapat dinyatakan:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f\mu\sigma}}$$

di mana ω adalah frekuensi medan yang diterapkan, μ adalah permeabilitas, dan σ adalah konduktivitas konduktor.

3.2.1.3 Inti stator

Spesifikasi inti stator menggunakan bahan yang tersedia di dalam negeri. Untuk pemilihan bahan adalah *stainless steel* dengan ketebalan 0,35 milimeter yang sampai saat penelitian ini dibuat adalah yang paling tipis dipasaran dengan *Physical properties* sebagai berikut :

Tabel 3. 5 *Physical properties*

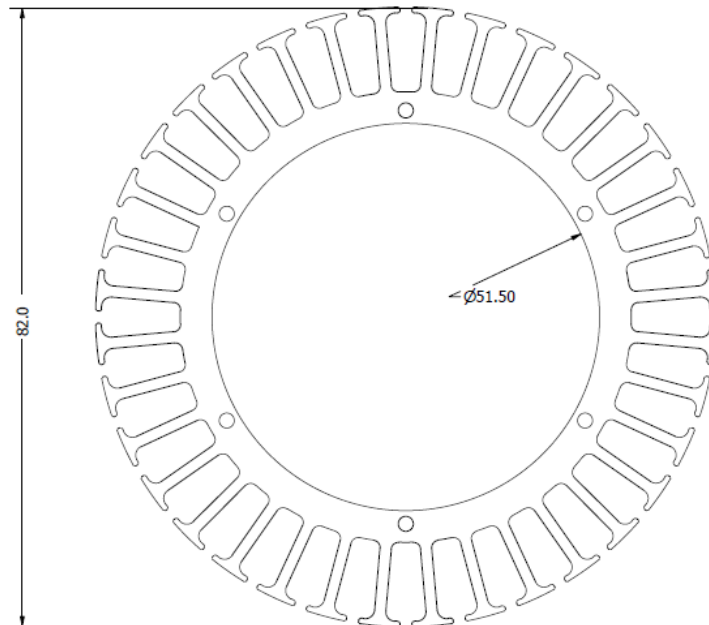
No	<i>Physical properties</i>	At 70°F
1	Type	Alloy 430 Stainless Steel
2	Density	0.28 lb./in ³ / (7.74 g/cm ³)
3	Modulus of Elasticity (E)	29 x 10 ³ ksi / (200 x 10 ³ MPa)
4	Coefficient of Expansion	5.8 x 10 ⁻⁶ microinches/in.-°F (70-600°F)
5	Electrical Resistivity	23.68 μ ohm.in / (60 μ ohm.cm)

Pemilihan *Alloy 430 Stainless Steel* sebagai inti stator karena dengan biaya yang murah memiliki ketahanan korosi yang baik, selain itu pada data terdapat *Electrical Resistivity* yang tergolong cukup baik berpengaruh pada medan elektromagnetik dimana :

$$B = \frac{\mu N I_s}{L}$$

Dimana I adalah arus stator yang berbanding lurus dengan kuat medan magnet B yang berbanding terbalik dengan *Electrical Resistivity*. Selain itu pemilihan material ini juga dipengaruhi kekuatan dan ketahanannya terhadap suhu yang cukup baik.

Selain dari material, pada penelitian ini inti stator memiliki bentuk gerigi berjenis *Square tooth* digambarkan pada desain geometri berikut :



Gambar 3. 6 Desain geometri stator

Dapat dilihat pada desain geometri dimensi detail dari stator. pada bagian dalam terdapat 6 lubang kecil yang bertujuan memudahkan proses penyusunan laminasi stator. pada

bagian gerigi *sloth depth* lebih luas untuk memudahkan proses pelilitan belitan stator. parameter lengkap tertera pada table berikut :

Tabel 3. 6 Parameter desain inti stator

No	Parameter	Value
1	Inner diameter	51,5 mm
2	Outer diameter	82,0 mm
3	Slot depth	10,2
4	Slot opening width	1,5
5	Tooth tang angle	8,66
6	Tooth tip thickness	0,609
7	Tooth width	1,9
8	Bottom fillet radius	0,5
9	Top fillet radius	0,5

3.2.1.4 Permanent magnet

Pemilihan material permanen magnet memiliki peran penting karena merupakan inti dari prinsip kerja motor brushless DC. pada penelitian ini memakai permanen magnet jenis Neodymium karena cukup bagus dan paling mudah ditemui dipasaran indonesia. Jenis Neodymium yang dipakai adalah N35 disebut juga magnet "Neo" atau NdFeB. Magnet ini memiliki kombinasi output magnetik tinggi dengan biaya yang terjangkau. Karakteristik lengkap magnet N35 dinyatakan :

Tabel 3. 7 Karakteristik magnet N35

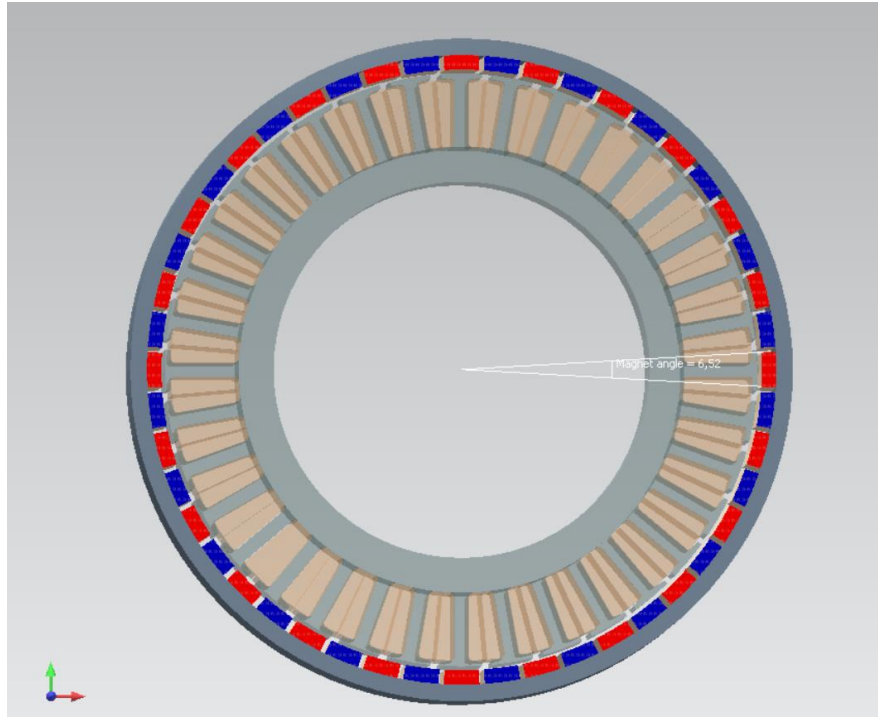
Magnetic Properties	Characteristic	Units	min.	nominal	max.
	Br , Residual Induction		Gauss	11,700	12,100
		mT	1170	1210	1250
H_{cB} , Coercivity		Oersteds	10,800	11,400	12,000
		kA/m	860	907	955
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity		Oersteds	12,000		
		kA/m	955		
BH_{max} , Maximum Energy Product		MGOe	33	36	38
		kJ/m ³	263	283	302

Dimensi magnet Neodymium yang dipakai yaitu Kotak Persegi N35 20mm x 5mm x 2mm.

3.2.1.5 Penentuan jumlah pole medan magnet

Konfigurasi jumlah magnet pole pada rotor berpengaruh pada torsi motor. Semakin banyak jumlah magnet pole akan semakin menjaga kerapatan daya tetap tinggi namun berbanding terbalik dengan kecepatan pengenal, maka motor dapat dikategorikan sebagai motor *high torque low RPM*. Magnet pole motor brushless DC dioptimalkan berdasarkan memaksimalkan efisiensi, memberikan torsi tinggi pada kecepatan rendah, meminimalkan torsi cogging dan kerapatan arus.

Pada penelitian ini jumlah permanen magnet adalah 48 buah dengan rincian 1 buah magnet dengan tebal 2 milimeter per-pole dan *magnet angle* 6,52 derajat terhadap poros motor.



Gambar 3. 7 Desain magnet pole

3.2.1.6 Perhitungan torsi maksimum

Pengaplikasian motor brushless DC pada drone agrikultura memerlukan perbandingan torsi terhadap beban drone yang harus diangkat, karena drone bergerak secara vertikal saat lepas landas dan mendarat dibutuhkan torsi yang mumpuni. Pada subbab ini akan dijelaskan perhitungan torsi maksimal desain motor sesuai dari target desain yang disebutkan pada awal bab ini. Perhitungan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\tau_{max} = 2x2pBI_c n_s LR_{si}$$

Dimana :

τ_{max} adalah torsi maksimal

p adalah jumlah pole

B adalah densitas fluks (Wb/m^2)

I_c adalah arus yang melewati tembaga konduktor (A)

n_s adalah jumlah turn belitan

L adalah panjang aktif motor (Panjang magnet yang berhadapan dengan gigi stator) (mm)

R_{si} adalah jari-jari dalam stator (mm)

Dari persamaan diatas (Carunaiselvane & Jeevananthan, 2012), diketahui jumlah pole motor desain adalah 24 pole, densitas nominal fluks magnet N35 yaitu 1,21 tesla (Wb/m^2), kemudian arus pada konduktor sebesar 5 A, turn lilitan sebanyak 5 kali, Panjang aktif motor adala 20 mm, dan jari-jari dalam stator sebesar 41 mm. maka dapat dihitung torsi maksimum desain :

$$\tau_{max} = 2,381 Nm$$

Dari perhitungan yang didapat sudah sesuai dengan konsep torsi maksimal yang akan dipasang pada drone seperti perancangan pada subbab 3.2.1.

3.2.1.7 Perhitungan *rated speed*

Perhitungan *rated speed* dilakukan untuk memperoleh perhitungan daya output maksimum dari motor desain, perhitungan *rated speed* dengan menggunakan parameter jumlah kutub 48 dan frekuensi maksimal pengatur kecepatan 432 Hz didapatkan:

$$S = \frac{120xf}{p}$$

Dimana :

S adalah *rated speed*

F adalah frekuensi

P adalah jumlah pole

Maka didapatkan perhitungan sebagai berikut :

$$S = \frac{120 \times 432}{24}$$

$$S = 2160 \text{ rpm}$$

3.2.1.8 Perhitungan daya maksimum

Perhitungan daya output atau daya mekanik maksimum pada motor desain menggunakan rumus :

$$P_{mec} = \tau \times \omega$$

Dan pada perhitungan sebelumnya didapatkan torsi sebesar $4,762 \text{ Nm}$, untuk ω adalah konversi dari rpm yang pada perhitungan sebelumnya didapatkan nilai sebesar 1080 rpm, dapat dihitung ω yaitu :

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 1080 \text{ rpm}}{60}$$

$$\omega = 113,04 \text{ rad/s}$$

Didapatkan ω atau kecepatan sudut $113,04 \text{ rad/s}$, sehingga daya output maksimal didapatkan:

$$P_{mec} = 4,762 \times 113,04$$

$$P_{mec} = 538,296 \text{ watt}$$

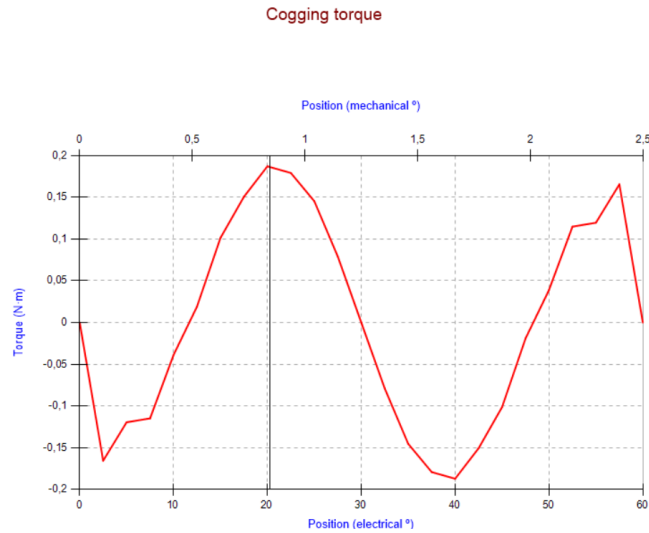
Dari perhitungan diatas didapatkan daya output maksimal desain sebesar $538,296 \text{ watt}$ atau $0,53 \text{ KW}$.

3.2.2 Simulasi sistem

Tahap simulasi berfungsi untuk mendapatkan respon sistem secara menyeluruh sehingga dapat dijadikan gambaran hasil untuk tahap prototipe motor brushless DC. simulasi menggunakan software simcenter Motorsolve Finite Elemen Analysis (FEA).

3.2.1.1 Simulasi cogging torque

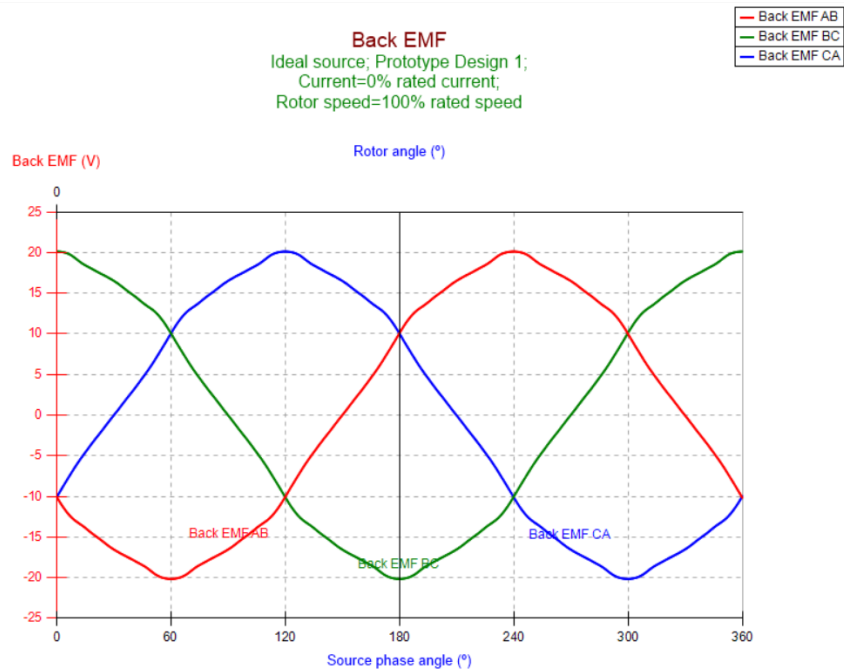
Berikut hasil simulasi cogging torque pada software simcenter motorsolve FEA. Didapatkan nilai cogging torque sebesar 0,18 Nm, nilai ini tidak lebih dari 20% dari torsi motor yaitu 0,94 Nm.



Gambar 3. 8 Hasil simulasi cogging Torque

3.2.1.2 Simulasi back EMF

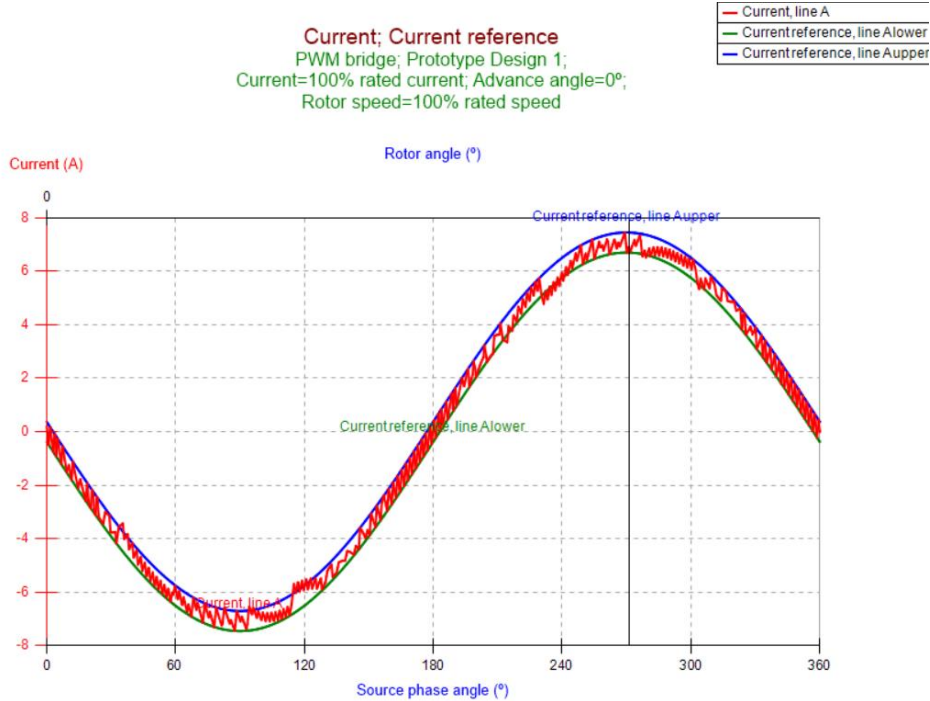
Dari hasil simulasi back EMF diketahui nilai rms per fasanya adalah 10,4V



Gambar 3. 9 Hasil simulasi back EMF

3.2.1.3 Simulasi arus

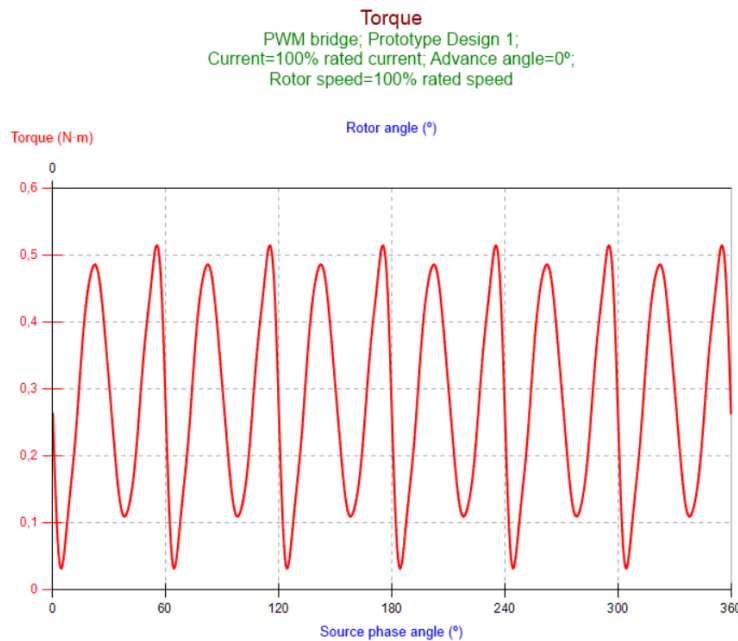
Berikut adalah hasil simulasi arus, dimana nilai arus dan arus referensi cenderung sama dan memiliki kurva yang mirip, walaupun pada kurva arus memiliki banyak distorsi.



Gambar 3. 10 Hasil simulasi arus

3.2.1.4 Simulasi torsi

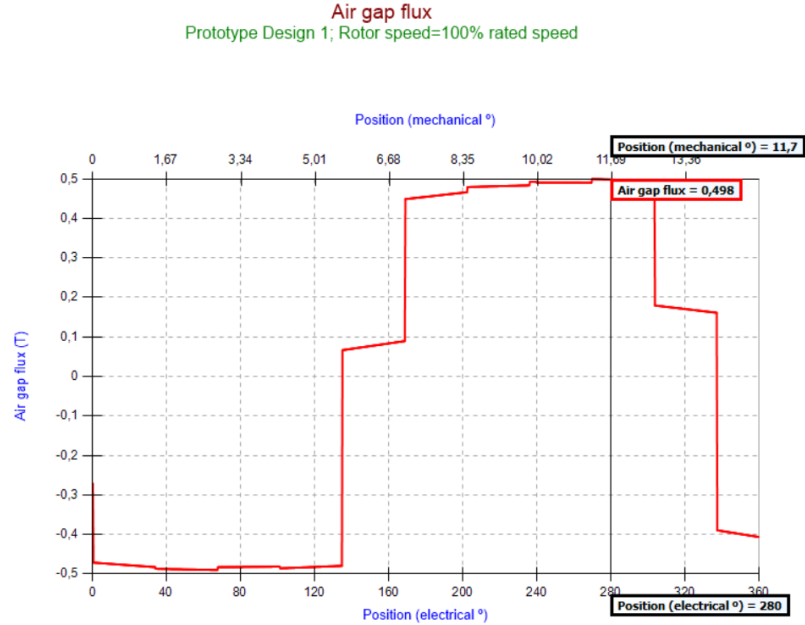
Berikut adalah hasil simulasi torsi dimana pada simulasi torsi terukur mencapai nilai 0,52 Nm.



Gambar 3. 11 Hasil simulasi torsi

3.2.1.5 Simulasi air gap flux

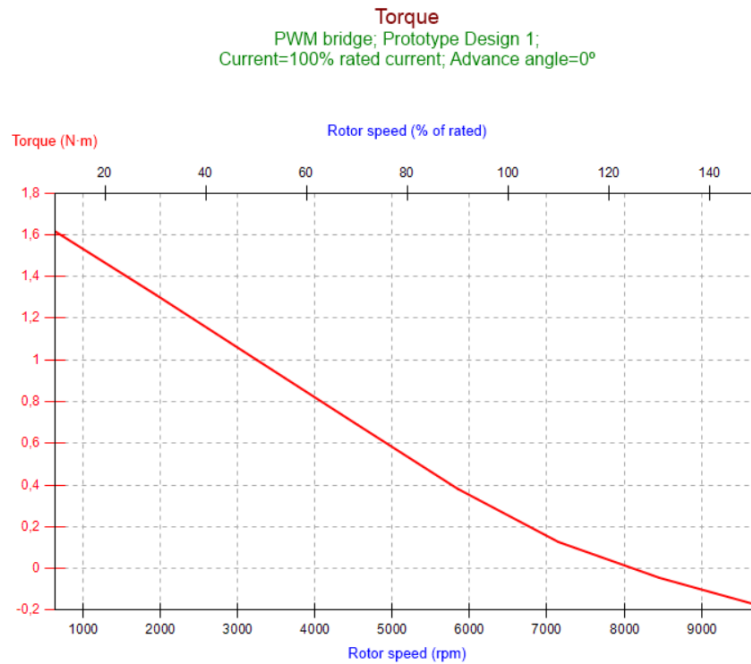
Berikut merupakan simulasi airgap flux yang memproyeksikan adanya besaran fluks medan magnet yang dipengaruhi celah udara antara stator dan rotor. Airgap flux dari hasil simulasi mencapai 0,498 T.



Gambar 3. 12 Hasil simulasi airgap flux

3.2.1.6 Simulasi torsi kecepatan

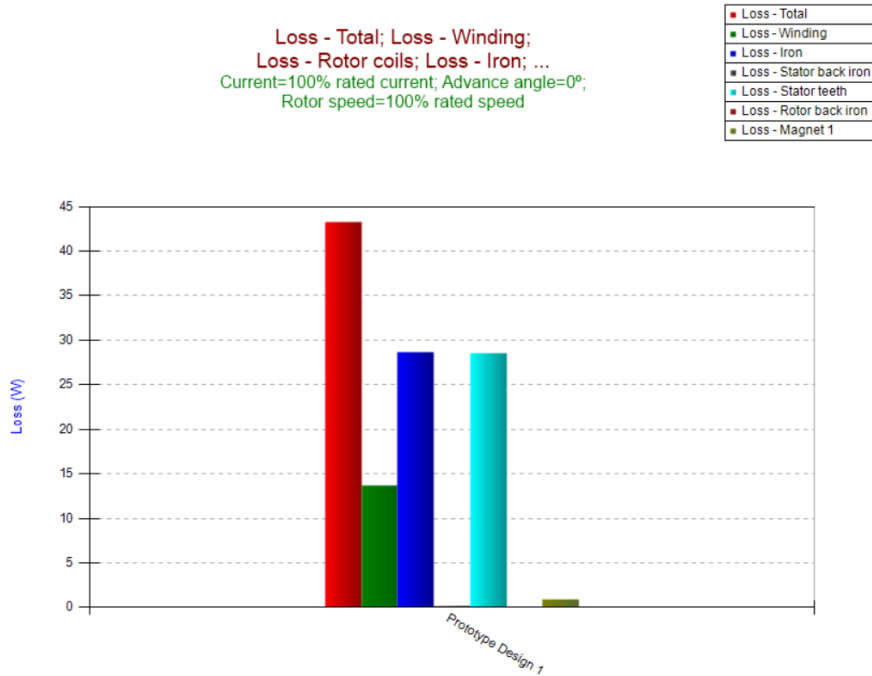
Berikut hasil simulasi torsi-kecepatan motor brushless DC, dari hasil disimpulkan bahwa torsi berbanding terbalik dengan kecepatan.



Gambar 3. 13 Hasil simulasi kecepatan

3.2.1.7 Simulasi rugi-rugi

Berikut hasil simulasi rugi-rugi termal yaitu rugi tembaga, rugi inti rugi magnet dan lainnya.



Gambar 3. 14 Hasil simulasi losses

Hasil dari simulasi rugi-rugi dijelaskan ulang pada tabel :

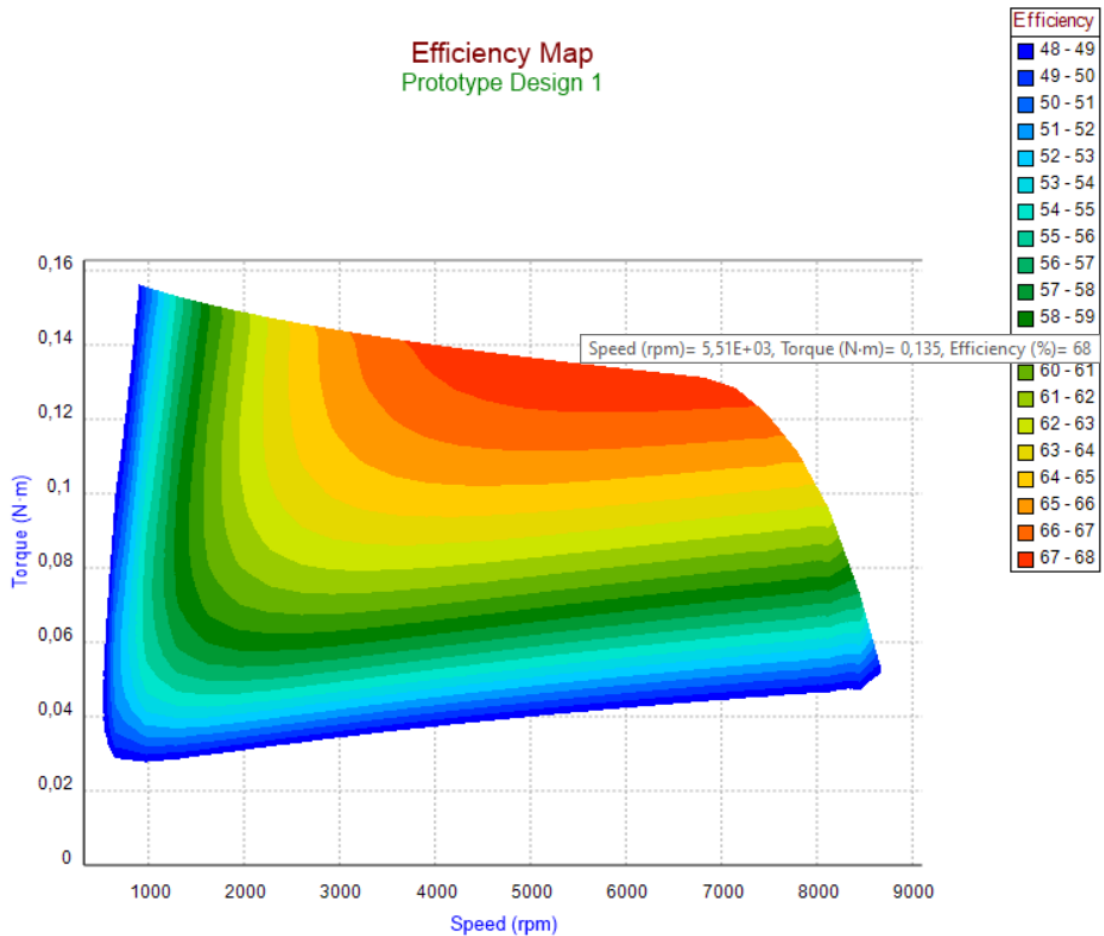
Tabel hasil simulasi rugi-rugi

Tabel 3. 8 Hasil simulasi rugi-rugi

Losses	Value (watt)
Loss – total	43,3
Loss – winding	13,5
Loss – iron	28,7
Loss – stator back iron	0,14
Loss – stator teeth	28,5
Loss – rotor back iron	0,0042
Loss – magnet 1	0,878

3.2.1.8 Simulasi Efisiensi

Berikut merupakan hasil simulasi efisiensi dari motor brushless DC desain pada motorsolve FEA. Pada hasil simulasi efisiensi ditunjukkan mulai dari rentang 48% hingga 68% dan berbanding lurus dengan daya output motor, semakin tinggi torsi-kecepatan motor semakin besar pula efisiensi motor.



Gambar 3. 15 Hasil simulasi efisiensi motor

Pada simulasi efisiensi ini juga dipengaruhi oleh suhu dari motor, tipe suhu yang berkontribusi pada simulasi efisiensi ini adalah “*Ambient Temperature*” yang merupakan parameter suhu setiap komponen seluruh motor dan bukan parameter spesifik dari termal material.

3.2.2 Bahan dan peralatan yang digunakan

Membuat sebuah prototipe diperlukan sebuah bill of material yaitu daftar raw material dan tools yang akan dipakai untuk proses manufaktur sebuah alat. Perancangan bill of material juga menunjukkan rancangan anggaran belanja sebagai parameter pembelian raw material.

Tabel 3. 9 Raw materials

No	Raw materials	Type	Purpose	Quantity
1	Alluminum pejal	Alloy dural 6061	Rotor dan body motor	1pcs, 500mm
2	Plat Stainless Steel	430 Finish BA 0,35mm	Stator core	1pcs, 1x2M
3	Permanent magnet	Neodymium N35	Magnet pole	48 pcs
4	Bolt and nut	M3	Shaft and body locking	50 pcs
5	Insulation paper	Nomex 0,15mm	Insulating stator core	1 pcs, 1x1M

6	Ball bearing	Bearing 6901 12x24x6 mm	Shaft support	2 pcs
7	Enameled copper wire	AI-EIW 0,20mm	Stator winding	0,5 kg

Selanjutnya diperlukan beberapa peralatan produksi dan peralatan pengujian. Peralatan produksi menunjang proses manufaktur alat mulai dari proses produksi hingga inspeksi perpart. Selanjutnya peralatan pengujian digunakan saat proses pengujian dan pengambilan data disebutkan dalam tabel :

Tabel 3. 10 Tools

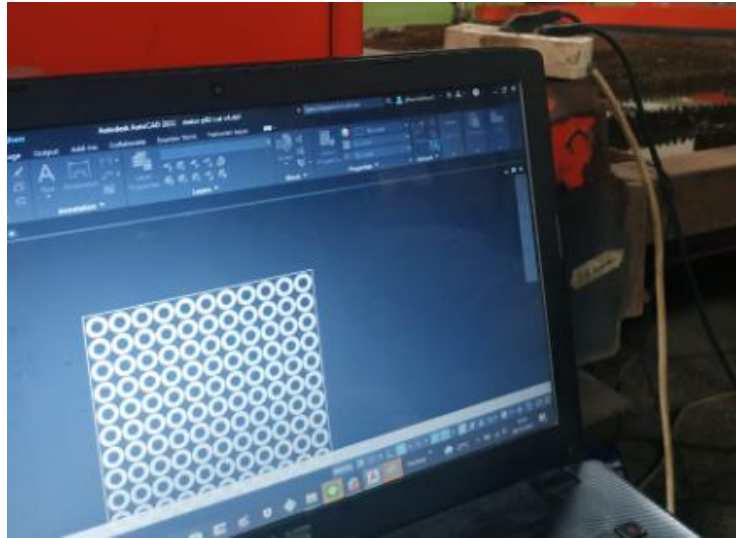
No	Tools	type	Utility	Quantity
1	Simulation and design software	Autodesk dan motorsolve FEA	Designing and simulating motor brushless DC	2
2	Bubut cnc machine	Automatic CNC	Making rotor and body motor	1
3	Laser cutting machine	Automatic cutting CNC	Making stator plat lamination	1
4	Battery	Lippo 6S 24V	Supply DC current	1
5	Electric speed controller	ESC 60A	Control bldc motor	1
6	Servo tester	Manual throttle	Throttle control	1
7	Digital watt meter	Dwm 0-60V, 0-100A	Power input measurement	1
8	Torque sensor	DYN200	Torque measurement	1
9	Tachometer	Contact and laser tachometer	Speed measurement	1
10	Bracking system	Electromagnetic bracking	Bracking torque test	1

3.2.3 Implementasi pembuatan prototipe

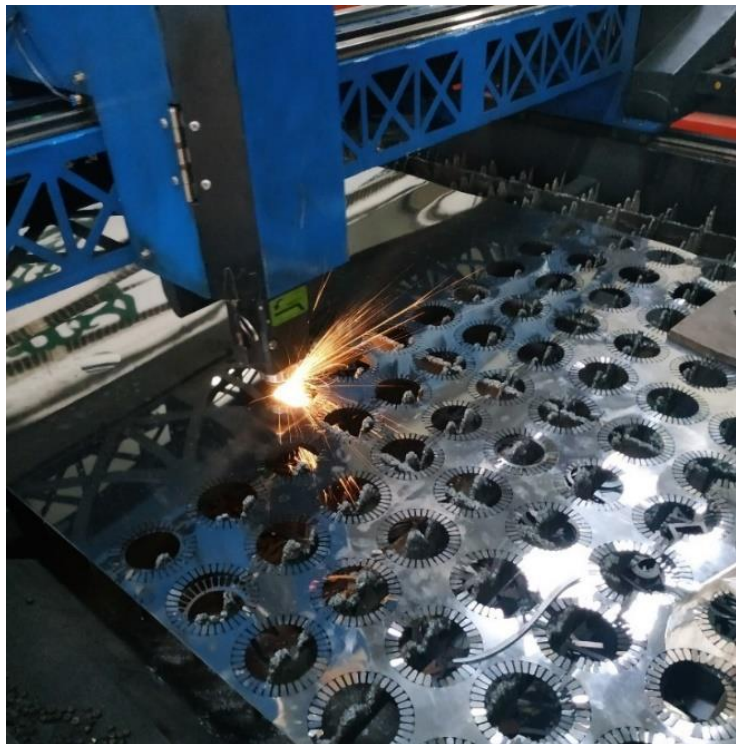
Setelah proses desain dilakukan maka didapatkan parameter yang bisa dijadikan pedoman dalam proses manufaktur.

3.2.3.1 Pembuatan inti stator

Proses manufaktur yang pertama adalah pembuatan stator, dimulai dengan desain geometri inti stator seperti yang lampirkan pada gambar 3.5 desain menggunakan software Autodesk autocad 2D, dilanjutkan proses *cutting* material *stainless steel* 0,35mm menggunakan metode *laser cutting* yaitu pemotongan bahan baku dengan ketebalan yang berbeda menggunakan sinar laser yang difokuskan pada suatu titik. Pemotongan bekerja secara otomatis sesuai desain geometri yang di inputkan sehingga hasil pemotongannya cukup presisi.



(a)



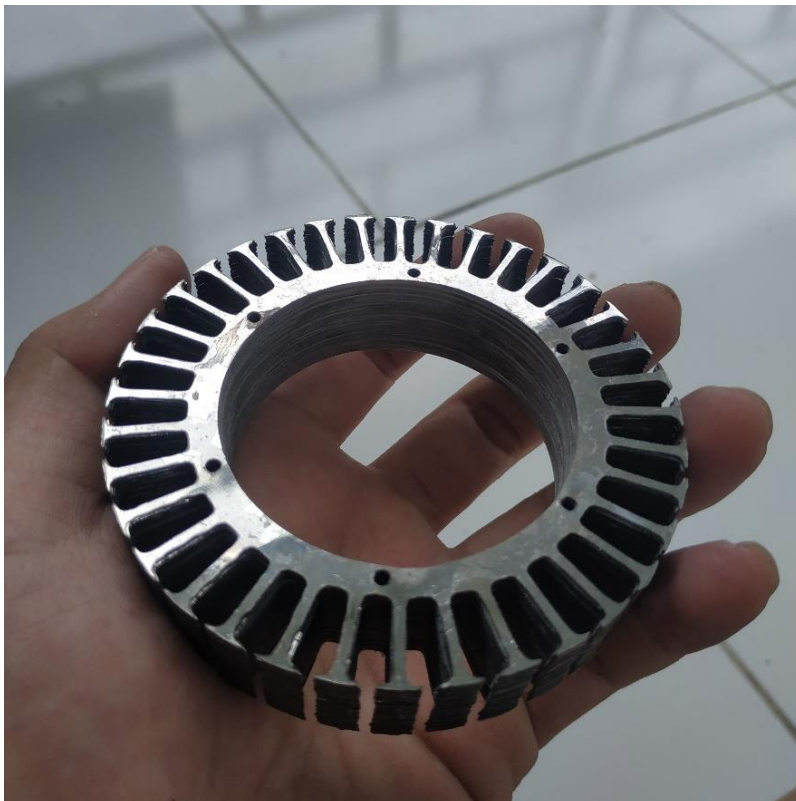
(b)

Gambar 3. 16 (a). import desain ke mesin laser cutting (b). proses cutting plat stainless steel

Setelah lempengan selesai dicetak kemudian disusun menjadi laminasi sehingga membentuk inti stator. Dalam melakukan laminasi, bahan yang digunakan adalah lem Cyanoacrylate Etil dan dilapisi dengan epoxy resin. Untuk pengeleman laminasi stator menggunakan lem Cyanoacrylate Etil tidak membutuhkan waktu lama.



(a)



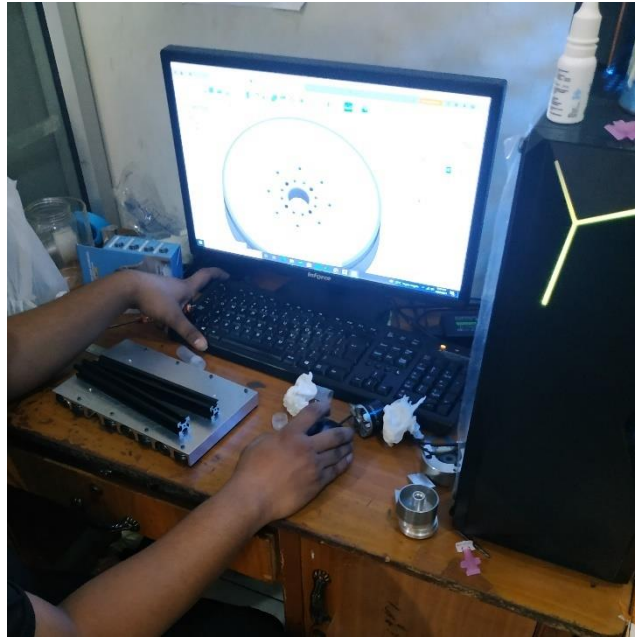
(b)

Gambar 3. 17 (a). penyusunan plat laminasi (b). bentuk stator setelah laminasi

Setelah selesai proses penyusunan laminasi maka inti stator akan terbentuk, Langkah selanjutnya adalah memastikan tidak ada permukaan dan sudut yang tajam dengan cara menghaluskan inti stator dengan amplas.

3.2.3.2 Pembuatan rotor

Proses manufaktur selanjutnya adalah pembuatan rotor, dengan mengacu desain 3D pada gambar.... Pembuatan rotor menggunakan mesin bubut CNC (Computer Numerical Control) Mesin ini merupakan mesin yang digunakan dalam proses manufaktur yang biasanya menggunakan kontrol terkomputerisasi dan pralaan mesin sehingga hasilnya cukup presisi



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 18 (a). pengecekan desain sebelum di bubut (b). proses bubut (c). proses milling

Setelah proses manufaktur rotor dilanjutkan pemasangan magnet permanen pada cangkang dan pemasangan inti stator.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 19 (a). rotor dan stator tampak atas (b). rotor dan stator tampak bawah (c). pemasangan inti stator dan magnet permanen

3.2.3.3 Pelilitan belitan stator

Setelah inti stator dibuat selanjutnya adalah proses pelilitan tembaga enamel pada inti stator. Pelilitan dilakukan secara manual dengan konfigurasi seperti pada subbab 3.3.2.2. namun sebelum di lilit tembaga enamel, inti stator terlebih dahulu dilapisi kertas isolasi khusus stator yaitu kertas *Nomex* dengan tebal 0,15mm dengan tujuan agar permukaan tajam inti stator tidak mengenai tembaga enamel yang bisa menyebabkan terjadinya *short circuit*, setelah dilapisi kertas isolasi lalu disemprot menggunakan cairan isolasi khusus yaitu *sirlak varnish insulation* agar kertas menempel sempurna dan menambah efek isolasi, menutupi permukaan tajam inti stator.



(a)



(b)

Gambar 3. 20 (a). stator dilapisi kertas isolasi (b). stator dilapisi kertas dan cairan sirlak isolasi

proses pelilitan memakan waktu kurang lebih 4 jam. Setelah proses pelilitan selesai dilanjutkan merapikan belitan menjadi 3 fasa, kemudian ujung belitan disolder sesuai konfigurasi star. Setelah belitan 3 fasa siap maka belitan pada inti stator disemprot lagi dengan cairan isolasi yang berwarna merah yaitu *sirlak varnish insulation* dengan tujuan memberikan efek isolasi pada kumparan agar lebih kuat terhadap suhu dan juga mencegah terjadinya short circuit antara kumparan dengan inti stator.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 21 (a). belitan terpasang (b). belitan dirapikan disambung kabel 3 fasa (c). belitan dilapisi cairan isolasi

setelah proses penyemprotan cairan isolasi ditunggu sampai kering sekitar 6 jam, kemudian proses perakitan seluruh komponen motor. Inti stator di rakit ke badan motor menggunakan lem *contact adhesive* dengan karakteristik perekat kuat namun cukup elastis sehingga meredam getaran pada stator. kemudian stator dan rotor dirakit menjadi satu bagian utuh motor brushles DC tiga fasa.



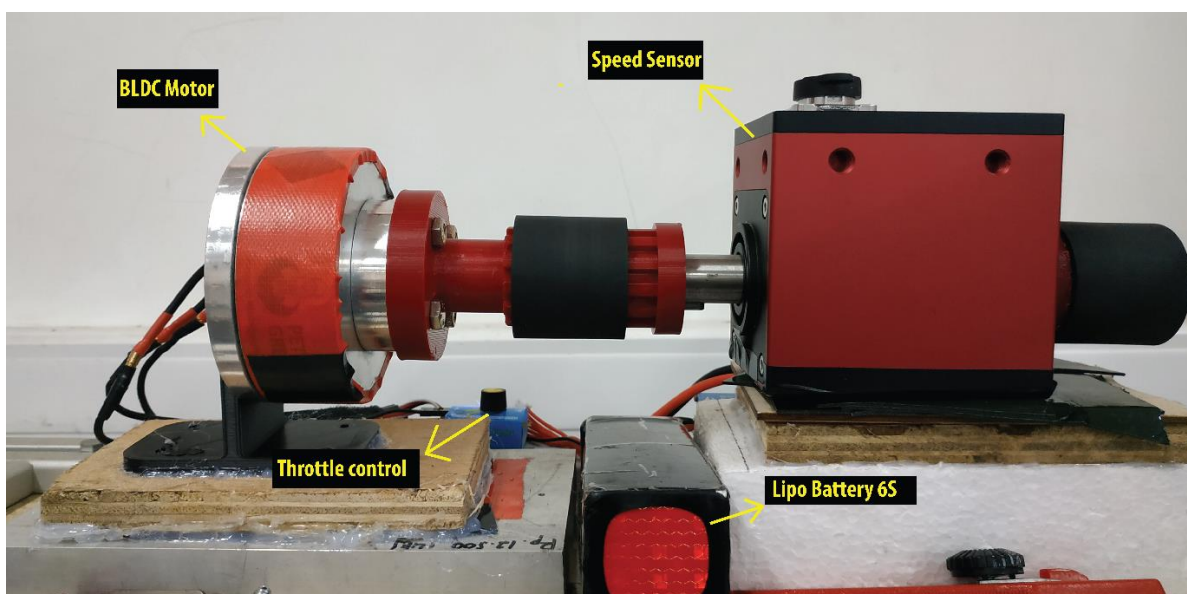
Gambar 3. 22 Motor Brushless DC 3 fasa

3.2.4 Pengujian Alat

Proses pengujian motor brushless DC bertujuan mendapatkan data dan hasil yang selanjutnya akan dikaji dan dianalisa. Pengujian meliputi pengujian tanpa beban, pengujian reaktansi kapasitansi induktansi perfasa, pengujian dimensi alat, pengujian berbeban, dan pengujian termal.

3.2.4.1 Pengujian tanpa beban

Pengujian motor brushless DC tanpa beban bertujuan untuk memperoleh data berupa *rated current*, *rated speed*, dan daya input motor. Pengujian ini dilakukan dengan melakukan *throttle* dari 0% hingga 100% sampai kecepatan maksimal motor menggunakan servo tester throttle control yang dirakit dengan ESC. Pengujian menggunakan baterai lippo 6s 22,2V. pengukuran kecepatan menggunakan tachometer dan speed sensor, dan pengukuran arus, tegangan, daya input menggunakan digital watt meter yang dipasang secara seri dengan ESC dan baterai.



Gambar 3. 23 Skema pengujian tanpa beban

3.2.4.2 Pengujian resistansi, kapasitansi, dan induktansi

Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh nilai resistansi, kapasitansi, dan induktansi tiap fasanya, agar dapat dianalisa apakah ada fasa yang bermasalah. Pengujian menggunakan LCR meter dan RMS meter.



Gambar 3. 24 Pengukuran induktansi, resistansi, dan kapasitansi fasa

3.2.4.3 Pengujian dimensi motor

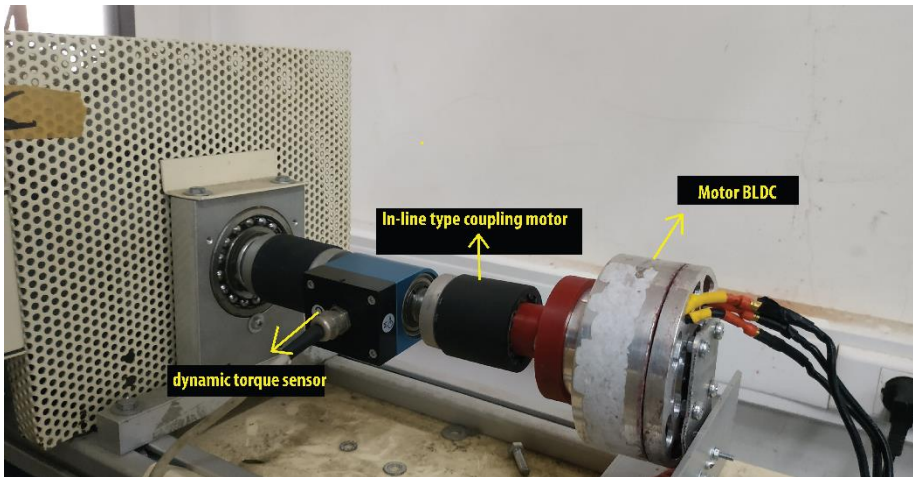
Pengujian dimensi bertujuan untuk mengukur dimensi dari prototipe yang kemudian akan dibandingkan dengan desain yang di simulasikan di software simcenter motorsolve FEA. Pengujian menggunakan alat ukur yaitu mistar dan digita kaliper. Hasilnya akan didapatkan error dimensi antara desain dan prototipe motor.

3.2.4.4 Pengujian berbeban

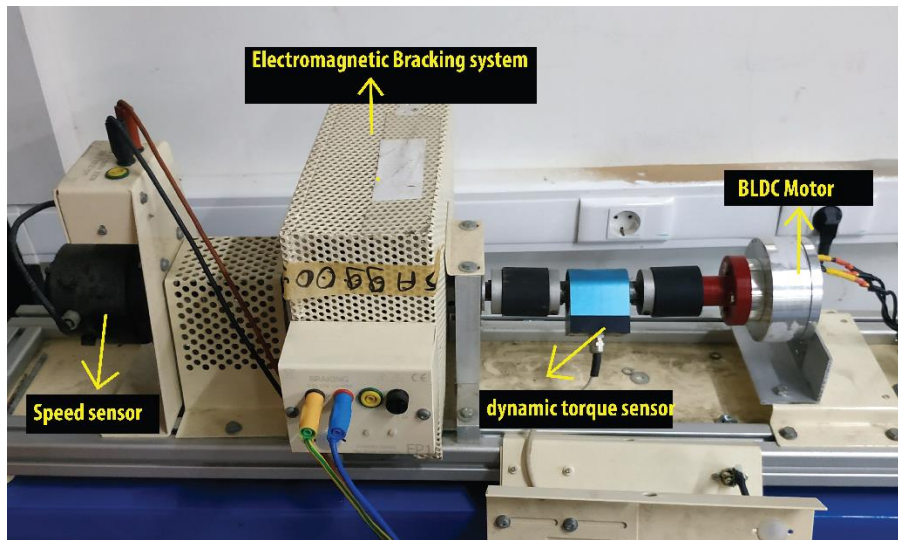
Pengujian berbeban bertujuan untuk mengetahui daya output dan efisiensi dari motor. Parameter yang diambil sebagai sample adalah arus input, tegangan input, daya input, kecepatan, torsi dan akan diketahui daya output motor brushless DC.

Pengujian berbeban menggunakan sumber baterai lippo 6s 24V, dengan ESC 60A. sama seperti percobaan tanpa beban, pengambilan data input menggunakan alat digital watt meter yang di pasang seri dengan ESC 60A, untuk mengatur throttle menggunakan servo tester controller.

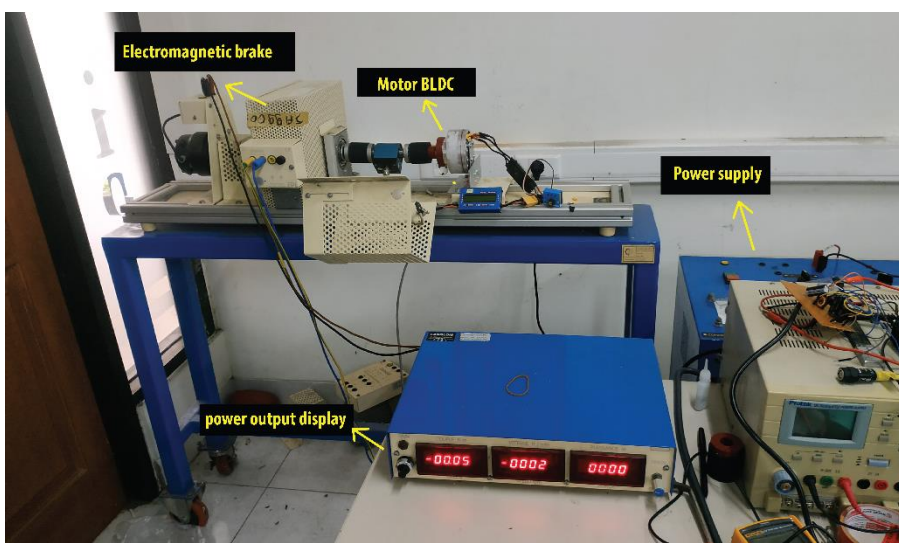
Tipe beban untuk menguji torsi motor memakai alat yang ada di laboratorium konversi energi listrik Teknik Elektro ITS yaitu “*electromagnetic bracking system*” yang merupakan alat uji torsi pengereman. *electromagnetic bracking system* memiliki range tegangan 0 -10V. untuk mengukur torsi motor menggunakan sensor torsi yang di kopel secara *in-line* dengan shaft motor brushless DC dan *electromagnetic bracking system*. Pembacaan output oleh sensor torsi yaitu torsi, kecepatan dan daya ouput dari motor.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 25 (a). (b). (c). rangkaian pengujian berbeban

3.2.4.5 Pengujian thermal

Pengujian terakhir adalah pengujian suhu motor. Pengujian suhu dilakukan bersamaan dengan pengujian berbeban. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui suhu motor saat bekerja dengan beban, pengujian ini bisa membuktikan munculnya rugi-rugi termal seperti arus eddy, inti besi dan lain sebagainya. Data hasil pengujian akan disatukan Bersama data pengujian berbeban dengan tiga kategori yaitu suhu normal, panas, dan sangat panas. Pengujian dilakukan menggunakan alat sensor suhu yaitu termo gun.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Realisasi prototipe

Pada bab 4 ini akan dibahas mengenai hasil pengujian realisasi prototipe motor brushless DC tiga fasa rpm rendah menggunakan peralatan uji mandiri. Selanjutnya pengambilan data hasil pengujian tanpa beban menggunakan tachometer DT-2234C, kemudian hasil pengukuran dimensi prototipe motor. Selanjutnya data hasil pengukuran resistansi, kapasitansi, serta induktansi untuk setiap fasa. Pada hasil pengujian selanjutnya adalah berbeban menggunakan prinsip torsi pengereman. Data yang didapatkan dari pengujian dibandingkan dengan teori dan hasil simulasi.

4.1.1 pengujian tanpa beban

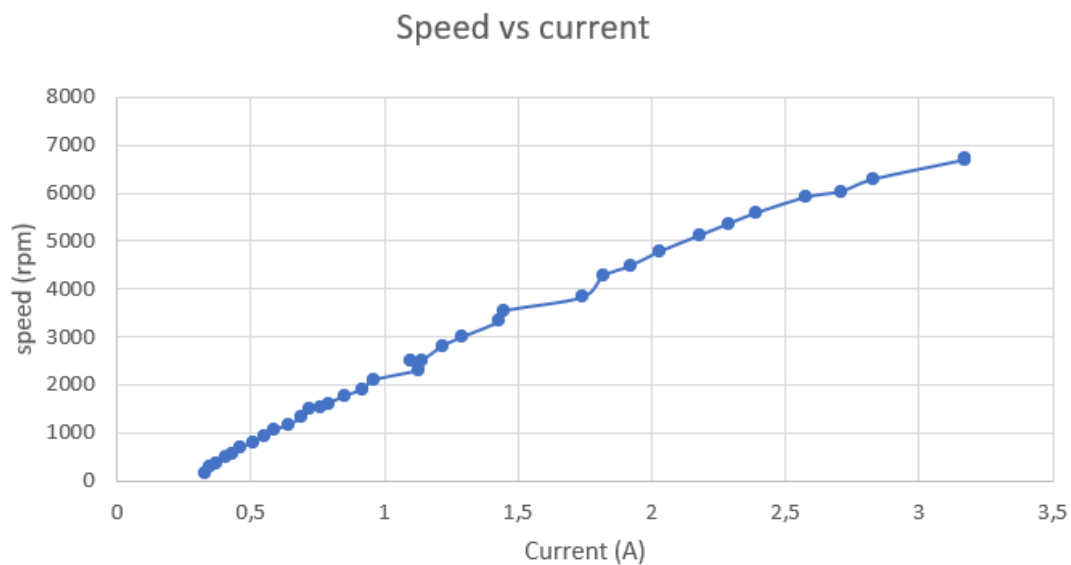
Pada pengujian tanpa beban peralatan dan prototipe dirangkai seperti pada gambar 3.. suplai daya menggunakan baterai lipo 6S dengan tegangan 24V , dengan speed controller (ESC) 60A. kecepatan motor dikontrol manual melalui throttle dari servo tester dan akan memberikan input PWM kepada speed controller.

Tabel 4. 1 Data pengujian tanpa beban

Arus (A)	Daya (watt)	Speed (rpm)	Tegangan (V)	VxI (watt)
0,33	8,3	156,6	24,62	8,124
0,35	8,6	278,1	24,58	8,603
0,37	8,8	367,2	24,57	9,090
0,41	9,3	482,2	24,55	10,06
0,43	10,3	546,8	24,52	10,54
0,46	12,0	680,2	24,51	11,27
0,51	12,4	805,5	24,48	12,48
0,55	13,4	925,7	24,47	13,45
0,59	14,4	1068	24,45	14,42
0,64	15,1	1160	24,42	15,62
0,69	16,3	1323	24,38	16,82
0,72	17,2	1482	24,35	17,58
0,76	18,4	1531	24,33	18,49
0,79	18,7	1606	24,31	19,19
0,85	20,8	1770	24,27	20,62
0,92	22,3	1910	24,01	22,08
0,96	23,4	2102	23,92	22,96
1,13	24,3	2316	23,92	27,00
1,1	26,9	2486	23,87	26,25
1,14	27,0	2514	23,76	27,08
1,22	29,1	2818	23,72	28,94
1,29	30,0	2995	23,68	30,52
1,43	32,7	3325	23,62	33,76
1,45	35,1	3543	23,63	34,22
1,74	40,5	3826	23,56	40,94

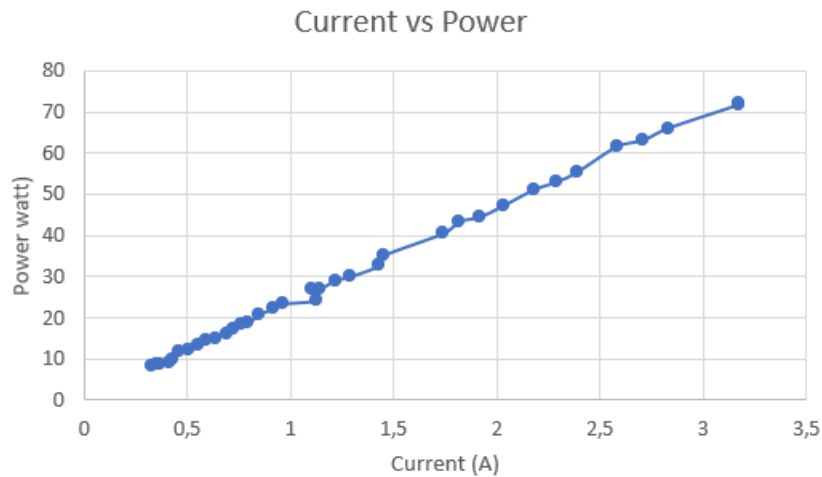
1,82	43,4	4271	23,48	42,76
1,92	44,5	4481	23,45	45,04
2,03	47,2	4780	23,41	47,53
2,18	51,1	5120	23,37	50,96
2,29	53,0	5366	23,35	53,15
2,39	55,4	5585	23,32	55,48
2,58	61,5	5920	23,28	60,24
2,71	63,1	6037	23,21	62,91
2,83	66,0	6291	23,17	65,11
3,17	71,7	6695	23,13	73,31
3,17	72,3	6725	23,11	73,27

Dari tabel didapatkan bahwa nilai arus sebanding dengan besaram kecepatan, semakin tinggi kecepatan maka nilai arus juga semakin besar. Namun pada data penambahan kecepatan masih ada sedikit distorsi karena semakin tinggi kecepatan maka frekuensi pengatur kecepatan juga semakin tinggi, hal ini linear dengan rugi-rugi arus eddy sehingga ditemukan distorsi pada kecepatan motor.



Gambar 4. 1 Grafik Arus-Kecepatan

Selain itu tegangan konstan pada range 23V-24V. hal ini dipengaruhi oleh keakuratan alat ukur. Saat tegangan konstan maka arus akan berbanding lurus dengan daya. Didapatkan daya input tanpa beban setelah dilakukan pembuktian besaran daya input yang terukur pada digital watt meter sama dengan hasil perkalian tegangan dan arus yang terukur.



Gambar 4. 2 Grafik arus-daya input

Pada grafik diatas dapat dilihat karakteristik arus sebanding dengan daya input, namun pada grafik masih terdapat distorsi sehingga kurang landau, hal ini dipengaruhi oleh reaksi jangkar pada kumparan jangkar dengan tipikal semakin besar arus yang masuk maka kemungkinan terjadi reaksi jangkar juga akan semakin besar.



Gambar 4. 3 Grafik daya input-kecepatan

Dapat dilihat pada grafik diatas karena arus sebanding dengan kecepatan putar motor maka daya input juga sebanding dengan kecepatan motor. Sesuai dengan konsep daya input besarnya sebanding pula dengan daya output jika rugi-rugi diabaikan dan dinyatakan dalam persamaan :

$$P_{in}=P_{out}$$

$$V.I = T. \omega$$

Saat tegangan konstan arus naik maka kecepatan sudut yang sebanding dengan kecepatan putar juga akan naik karena saat kondisi tanpa beban torsi ada namun tidak berkonstanta.

4.1.2 pengukuran dimensi

pada proses manufaktur stator dan rotor menggunakan mesin otomatis yang memiliki tingkat presisi yang berbeda, pengujian ini bertujuan mengetahui gap dimensi antara desain dan prototipe. Pengukuran menggunakan mistar dan digital kaliper dengan ketelitian 0,01 mm.

Tabel 4. 2 Pengukuran dimensi stator

	STATOR		
	Desain	Prototipe	Error (%)
Inner diameter	52	51,8	0,141
Outer diameter	82	82,6	0,424
Slot depth	10,2	10,75	0,389
Slot opening	1,5	1,82	0,226
Tooth tip thickness	0,6	0,59	0,007
Tooth width	1,9	1,95	0,035
Rata-rata error			0,204

Rata-rata error sangat kecil yaitu 0,20%, menandakan mesin laser cutting memiliki tingkat kepresisian yang cukup tinggi.

Tabel 4. 3 Pengukuran dimensi rotor

	ROTOR		
	Desain	Prototipe	Error
Inner diameter	83,1	83,36	0,184
Outer diameter	91,6	91,7	0,071
Magnet angle	6,52	7,1	0,410
Magnet Thickness	2	2	0,000
Rata-rata error			0,166

Pada prototipe rotor, rata-rata error juga sangat kecil yaitu 0,16%, menandakan mesin bubut CNC memiliki tingkat kepresisian yang tinggi

4.1.3 pengukuran resistansi, kapasitansi, dan induktansi belitan fasa

Pengukuran selanjutnya adalah resistansi, kapasitansi, dan induktansi pada tiap fasa. Dibutuhkan untuk mengetahui pengaruh kepada belitan stator terutama pada rugi tembaga dan *skin effect*. Pengukuran menggunakan RMS meter dan LCR meter tipe sanwa LCR700. Hasil pengukuran disajikan pada tabel :

Tabel 4. 4 Pengukuran LCR belitan fasa

	Resistansi	kapasitansi	induktansi
Fasa A	0,9 ohm	1,16 μ F	18,1 μ H
Fasa B	0,4 ohm	1,85 μ F	19,4 μ H
Fasa C	0,7 ohm	1,21 μ F	20,9 μ H

Hasilnya didapatkan nilai standar dan seimbang pada setiap fasa nya. Jika hasil pengukuran nilai antar fasa tidak seimbang dapat menyebabkan putaran motor tidak normal sehingga perlu dilakukan pelilitan ulang.

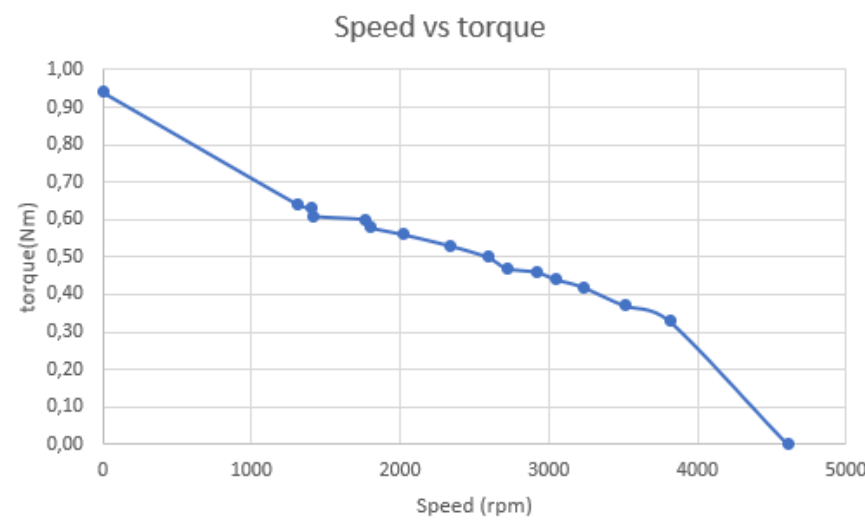
4.1.4 pengujian berbeban dan termal

Pengujian selanjutnya adalah berbeban dan suhu motor. Pengujian dimulai dengan merangkai semua alat uji dan prototipe motor seperti pada gambar 3..... motor brushless DC dikopel dengan torsi sensor dan *electromagnetic bracking system* dengan cara kopel satu poros atau *In-line*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui daya output dari motor yaitu torsi dan kecepatan. Pada pengujian ini digunakan metode torsi pengereman. Motor brushless DC di throttle hingga 100% kemudian dicatat dan diamati parameter daya input, kecepatan, dan torsi. Setelah itu sedikit demi sedikit dilakukan torsi pengereman, maka nilai terbaca torsi akan semakin bertambah seiring bertambahnya pengereman. Data dianalisa hingga motor diberi pengereman hingga berhenti.

Tabel 4. 5 Hasil pengujian berbeban dan efisiensi motor

arus	tegangan	daya in	rpm	torsi	rad/s	daya output	Thermal
7,24	24,36	160	4610	0,00	482,76	0,00	Normal 34°C
10,26	24,36	250,54	3812	0,33	399,19	131,73	
12,38	24,36	280,43	3513	0,37	367,88	136,12	
14,54	24,36	318,98	3230	0,42	338,25	142,06	
15,13	24,36	341,6	3052	0,44	319,61	140,63	
15,72	24,36	358,2	2919	0,46	305,68	140,61	
16,42	24,36	376,4	2721	0,47	284,94	133,92	Hot 46°C
17,24	24,36	400,2	2590	0,50	271,22	135,61	
19,67	24,36	445,67	2339	0,53	244,94	129,82	
22,32	24,36	498,2	2027	0,56	212,27	118,87	
27,44	24,36	577,8	1796	0,58	188,08	109,08	Very Hot 60°C
27,86	24,36	592,5	1766	0,60	184,94	110,96	
29,65	24,36	615,4	1419	0,61	148,60	90,64	
35,57	24,36	805,7	1408	0,63	147,45	92,89	
38,76	24,36	874,2	1315	0,64	137,71	88,13	
42,45	24,36	1008	0	0,94	0	0,00	

Bisa diamati bahwa sesuai konsep bahwa torsi berbanding terbalik dengan kecepatan



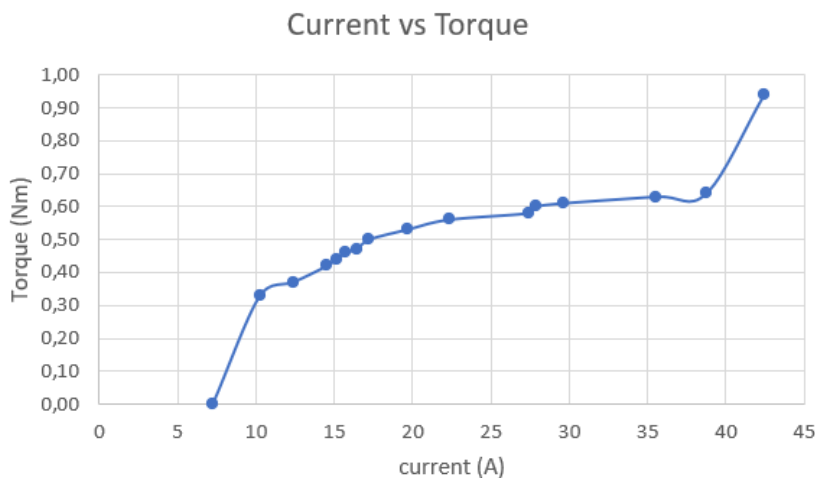
Gambar 4. 4 Grafik torsi-kecepatan

Grafik diatas jika diamati memang kurang mulus dan masih banyak distorsi, hal ini juga dipengaruhi reaksi jangkar, namun konsep kecepatan berbanding terbalik dengan torsi dibuktikan dengan persamaan :

$$P_{mec} = \frac{T \cdot 2\pi \cdot N}{60}$$

$$N = \frac{P_{mec}}{T \cdot 2\pi}$$

Dimana N adalah kecepatan putar motor dan T adalah torsi, Ketika kecepatan naik maka secara konsep torsi motor akan turun.



Gambar 4. 5 grafik arus-torsi

Pada grafik dan data tabel didapatkan hasil bahwa torsi berbanding lurus dengan arus sesuai dengan persamaan :

$$T = K \cdot \Phi \cdot I_a$$

Dimana T adalah torsi motor dan I_a adalah arus yang mengalir pada stator. selanjutnya didapatkan hasil uji termal saat uji pembebanan yaitu pada range torsi 0 Nm – 0,46 Nm suhu motor masih normal yaitu 34°C, lalu pada range torsi 0,47 Nm – 0,56 Nm suhu motor panas yaitu 46°C, lalu suhu motor mencapai paling panas yaitu 60°C pada range torsi 0,58 Nm – 0,94 Nm.

4.1.5 Analisis rugi-rugi

Pengaruh rugi-rugi yang paling signifikan diberikan oleh rugi-rugi elektrik yaitu rugi tembaga dan inti besi. Rugi tembaga disebabkan oleh hambatan pada konduktor atau kawat tembaga email yang merupakan nilai rugi paling dominan. Analisa rugi tembaga didapatkan melalui persamaan :

$$P_{cu} = 2R_{ph}I_a^2$$

Dimana R_{ph} adalah hasil resistansi perfasa pada tabel 4.4 maka :

$$P_{cu} = (((R_{\theta_A} + R_{\theta_B}) // R_{\theta_C}) + (R_{\theta_A} // (R_{\theta_B} + R_{\theta_C}))) I_{rms}^2$$

Dengan I adalah rated current yaitu 5A maka :

$$P_{cu} = (((0,9 + 0,4)//0,7) + (0,9//(0,4 + 0,7)). 5^2$$

$$P_{cu} = (0,45 + 0,49). 25$$

$$P_{cu} = 23,5 \text{ watt}$$

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai rugi-rugi tembaga yaitu 23,5 watt. Angka ini lebih besar dari hasil simulasi seperti pada subbab 3.3.3.7 yaitu sebesar 13,5 watt hal ini dipengaruhi oleh material yang dipakai pada prototipe dan efek dari reaksi jangkar saat motor dijalankan. Sedangkan untuk rugi inti dinyatakan dalam persamaan :

$$P_{fe} = k_h f \hat{B}^a + \frac{k_e}{2\pi^2} \left\{ \frac{dB}{dt} \right\}_{rms}^2$$

Dimana persamaan sebelah kiri merupakan proyeksi dari rugi hysteresis sedangkan persamaan sebelah kanan adalah rugi arus eddy. B merupakan nilai kerapatan fluks permanen magnet yaitu tipe neodmium N35. Dari analisis rugi-rugi ini, permanen magnet berpengaruh pada rugi-rugi, namun rugi-rugi paling besar dipengaruhi oleh rugi tembaga, karena memiliki resistansi yang cukup tinggi setelah dilakukan pengukuran.

4.1.6 Analisis efisiensi

Setiap motor memiliki efisiensi yang berbeda-beda, angka tersebut dipengaruhi oleh kualitas material, tingkat presisi desain, hingga rugi-rugi yang ada. Pada penelitian ini dilakukan beberapa pengujian untuk bisa mendapatkan parameter hasil yang dijadikan perhitungan efisiensi dari motor prototipe. Alat setup pengujian dirancang secara mandiri oleh penulis, oleh karena itu efisiensi yang digunakan pada analisis merupakan efisiensi relatif.

Efisiensi merupakan persentase perbandingan daya mekanik yang dihasilkan motor dengan daya elektrik masukan motor. Efisiensi motor brushless DC secara umum nilainya cukup tinggi, namun pada prototipe menggunakan material yang ada di dalam negeri maka efisiensinya bisa berbeda, rumus mencari efisiensi didapatkan dengan persamaan :

$$\eta = \frac{P_{In}}{P_{Out}} \times 100\%$$

Dimana P_{In} adalah daya inputan motor dan P_{Out} adalah daya mekanis keluaran motor, dari hasil pengujian didapatkan data daya input dan daya output sehingga didapatkan pula nilai efisiensi pada motor, data tersebut ditampilkan pada tabel :

Tabel 4. 6 Data efisiensi motor

Input power (watt)	Speed (rpm)	Torsi (Nm)	rad/s	Output power	eff motor + esc	eff esc	eff motor	Thermal
160,3	4610	0,00	482,8	0,0	0%	85%	0%	Normal 34°C
236,6	4089	0,27	428,2	115,6	49%	85%	57%	
250,5	3812	0,33	399,2	131,7	53%	85%	62%	
280,4	3513	0,37	367,9	136,1	49%	85%	57%	
319,0	3230	0,42	338,2	142,1	45%	85%	52%	
341,6	3052	0,44	319,6	140,6	41%	85%	48%	
358,3	2919	0,46	305,7	140,6	39%	85%	46%	
376,4	2721	0,47	284,9	133,9	36%	85%	42%	Hot 46°C
400,2	2590	0,50	271,2	135,6	34%	85%	40%	

Input power (watt)	Speed (rpm)	Torsi (Nm)	rad/s	Output power	eff motor + esc	eff esc	eff motor	
445,7	2339	0,53	244,9	129,8	29%	85%	34%	
498,2	2027	0,56	212,3	118,9	24%	85%	28%	
577,8	1796	0,58	188,1	109,1	19%	85%	22%	Very Hot 60°C
592,5	1766	0,60	184,9	111,0	19%	85%	22%	
615,4	1419	0,61	148,6	90,6	15%	85%	17%	
805,7	1408	0,63	147,4	92,9	12%	85%	14%	
874,2	1315	0,64	137,7	88,1	10%	85%	12%	
1008,0	0	0,94	0	0,0	0%	85%	0%	

Dari data diatas dapat dilihat rating daya input dari motor brushless DC prototipe adalah sebesar 1008 watt atau sekitar 1KW. Selanjutnya dapat dianalisa pada tabel hasil pengujian bahwa kecepatan motor saat throttle 100% menurun dari 6725 rpm menjadi 4610 rpm hal ini dipengaruhi losses mekanik kopel motor antara shaft motor brushless DC dengan torsi sensor dan elektromagnetik bracking system. Kemudian didapatkan efisiensi relative terbesar dari motor brushless DC yaitu 62%, angka ini mendekati angka efisiensi terbesar hasil simulasi yaitu sebesar 68% hal ini menunjukkan kecocokan hasil pengujian protitipe dan simulasi sebesar 91%.

Selanjutnya pada tabel hasil efisiensi dapat dilihat pada awalnya semakin besar torsi maka efisiensi juga semakin besar, namun setelah itu efisiensi motor terus menurun hingga menyentuh angka 12%. Hal ini dipengaruhi oleh rugi-rugi mekanis alat pengujian yaitu shaft coupling, motor mounting dan motor bracket, rugi-rugi mekanis meliputi tingkat ketidak presisian alat pengujian, getaran pada bracket, dan kekuatan mounting. Pengaruh kedua dipicu oleh rugi-rugi panas yang muncul dan menyebabkan suhu motor meningkat tajam, pada suhu normal 34°C efisiensi motor sangat baik yaitu dari 46% hingga 62%, kemudian suhu naik hingga 46°C efisiensi motor menurun hingga 28%, lalu saat motor mencapai torsi pengereman tinggi suhu motor sangat panas hingga 60°C dan efisiensi terendah mencapai 12%.

4.1.7 Sintesis

Sintesis merupakan proses integrasi hasil pengujian dan analisis terhadap artikel-artikel berdasarkan kesamaan dan perbedaan masing-masing artikel dan membuat kesimpulan berdasarkan kesamaan dan perbedaan setiap artikel tersebut dalam bentuk simpulan kolektif dari beberapa artikel yang dianalisis.

Integrasi antara hasil pengujian dan jurnal terbukti pada hubungan antara kecepatan dan torsi sebagaimana disebutkan pada konsep dasar bab 2 bahwa pada motor brushless DC Ketika besaran torsi ditingkatkan maka kecepatan akan menurun hal ini berarti nilai torsi berbanding terbalik dengan kecepatan (Nizam, 2014), teori ini dikuatkan oleh hasil pengujian pada penelitian ini subbab 4.1.4 pengujian berbeban menunjukkan saat torsi mulai meningkat maka kecepatan yang awalnya tinggi menjadi menurun secara signifikan atau berbanding terbalik dengan torsi.

Sintesis lain yaitu konsep penggunaan tipe rotor luar yang memiliki konsep dasar unggul pada torsi namun kurang baik dalam mereduksi rugi-rugi panas karena kumparan stator berada didalam (Garip & Yasa, 2020). Pada pengujian prototipe yang juga menggunakan tipe rotor luar menghasilkan nilai torsi terukur hampir mencapai 1 Nm yang cukup baik untuk kelas motor manufaktur mandiri walaupun belum mencapai target desain, namun konsep rugi-rugi panas

berlebih terbukti saat pengujian, peningkatan rugi panas pada motor prototipe meningkat tajam hingga mencapai 60°C hal ini mengakibatkan efisiensi motor mengalami penurunan yang signifikan.

4.1.8 Evaluasi

Secara keseluruhan penelitian dapat disimpulkan bahwa penelitian dapat berjalan dengan cukup baik sehingga bisa menghasilkan produk prototipe motor brushless DC sebagai motor yang memiliki karakteristik cocok untuk diaplikasikan pada drone agrikultura. Walaupun secara target belum terpenuhi yaitu target 538,2 watt untuk daya output hanya mampu terpenuhi 142,1 watt, dan untuk torsi menghasilkan 0,94 Nm dari target sebesar 4,7 Nm. Hal ini dipengaruhi oleh rugi-rugi inti, densitas magnet yang masih tergolong lemah, rugi panas yang tinggi, dan pengaruh lainnya sehingga ada beberapa hal yang perlu di evaluasi sebagai bahan perbaikan untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya. Evaluasi yang perlu dilakukan pada penelitian ini dimulai pada proses manufaktur inti stator harus dipastikan tidak ada permukaan yang tajam sebelum dilakukan pelilitan belitan stator untuk mencegah terjadinya *Short* pada belitan stator.

Selanjutnya pemakaian kawat tembaga email seharusnya menggunakan kualitas yang lebih baik sehingga resistansi belitan lebih kecil dan mengurangi rugi-rugi tembaga, dianjurkan untuk memakai magnet neodmium kualitas terbaik karena sangat berpengaruh pada daya motor. Evaluasi terakhir adalah terkait pengujian motor, sebisa mungkin peralatan pengujian yang dipakai harus memiliki kualitas yang baik agar eror pengukuran tidak terlalu signifikan, selain itu yang juga penting adalah peralatan untuk setup pengujian seperti kopel shaft motor, *mounting* dan *bracket* motor harus lebih kuat dan presisi agar tidak menimbulkan rugi-rugi mekanis seperti getaran, gesekan, dan kerusakan mekanik lainnya.

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BAB 5

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi, pembuatan prototipe, dan pengujian dari motor brushless DC RPM rendah untuk aplikasi drone agrikultura dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode *Finite elemen* dapat digunakan sebagai metode perancangan sebuah motor untuk propulsi kendaraan atau wahana udara tanpa awak karena secara detail merencanakan karakteristik sesuai pengaplikasian hingga simulasi dan manufaktur prototipe.
2. Pada proses perancangan dapat digunakan software desain 3D untuk proyeksi motor dan software desain motor yaitu simcenter motorsolve sebagai pedoman dan acuan pada saat pembuatan prototipe.
3. Metode *laser cutting* yang digunakan untuk mencetak inti stator memiliki tingkat kepresisian yang cukup tinggi, dan menghasilkan plat laminasi dengan perbandingan error rata-rata hanya sebesar 0,2 % dari desain pada software simcenter motorsolve.
4. Metode bubut CNC yang digunakan untuk manufaktur rotor memiliki tingkat kepresisian yang tinggi dan menghasilkan rotor dan *body* rotor dengan perbandingan error rata-rata sebesar 0,16% dari desain 3D prototipe.
5. Tembaga enamel atau kawat konduktor yang dipakai dan merupakan bahan yang terdapat di dalam negeri memiliki resistansi terukur sebesar 0,66 Ω /m, nilai ini lebih besar 122% dibanding standar AWG 32 dengan diameter 0,2 mm yang memiliki resistansi 0,54 Ω /m.
6. Kecepatan motor prototipe maksimal yang terukur pada pengujian tanpa beban adalah sebesar 6725 rpm dengan arus 3,17 A. dari hasil pengujian tersebut didapatkan karakteristik arus berbanding lurus dengan naiknya kecepatan.
7. Prototipe motor memiliki rugi tembaga sebesar 23,5 watt, nilai ini lebih besar 174% dari desain yaitu sebesar 13,5 watt, hal ini disebabkan oleh kualitas tembaga konduktor dan adanya reaksi jangkar, rugi-rugi tembaga yang lebih besar mempengaruhi daya output dan efisiensi dari motor prototipe.
8. Pada pengujian berbeban diperoleh data karakteristik torsi berbanding terbalik dengan kecepatan, dengan torsi maksimal sebesar 0,94 Nm saat kecepatan mendekati 0 rpm dan kecepatan 4610 rpm saat torsi terukur 0 Nm.
9. Setelah dilakukan pengujian berbeban diketahui daya output maksimal terukur motor saat memakai baterai 6S atau 24V adalah sebesar 0,142 KW atau sekitar 20% dari desain asli yaitu 0,47 KW, Hal ini dipengaruhi oleh rugi-rugi inti, densitas magnet yang masih tergolong lemah, rugi panas yang tinggi.
10. Motor prototipe brushless DC memiliki efisiensi relatif yang cukup tinggi mencapai angka 62% angka ini mendekati angka efisiensi terbesar hasil simulasi yaitu sebesar 68% hal ini menunjukkan kecocokan hasil pengujian protitipe dan simulasi sebesar 91%.

5.2 Saran

Saran yang diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah :

1. Dalam pembuatan prototipe motor brushless DC diperlukan pemilihan kawat tembaga email yang memiliki resistansi yang rendah, yang berhubungan dengan rugi-rugi tembaga dan berpengaruh pada daya keluaran motor.

2. Pada proses setup dan perancangan alat pengujian diperlukan kepresisian dan kekompakan agar rugi-rugi mekanik seperti kopling motor dan mounting motor dapat diminalkan.
3. Pada proses pelilitan kumparan stator perlu diperhatikan apakah terjadi *short* antara belitan stator dan inti stator yang akan mengakibatkan arus bocor.
4. Saat pengujian perlu diperhatikan tingkat suhu dari motor karena ketika suhu motor tinggi banyak rugi-rugi yang muncul maka akan menurunkan efisiensi dari motor.

DAFTAR PUSTAKA

- Afif, M. T., Ayu, I., & Pratiwi, P. (2015). *ANALISIS PERBANDINGAN BATERAI LITHIUM-ION , LITHIUM-POLYMER , LEAD ACID DAN NICKEL-METAL HYDRIDE PADA PENGGUNAAN MOBIL LISTRIK - REVIEW*. 6(2), 95–99.
- Andrada, P., Torrent, M., Perat, J. I., & Blanqué, B. (n.d.). *Power Losses in Outside-Spin Brushless D . C . Motors Key words*.
- Aspalli, M. S., Munshi, F. M., Medegar, S. L., & Zakeer, S. S. (2015). The Four Switch Three Phase Inverter Method used for Speed Control of Brushless DC Motor. *2019 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Systems (ICACCS)*, 371–376.
- Carev, V., Roh, J., & Šipoš, M. (2021). *A Multilayer Brushless DC Motor for Heavy Lift Drones*.
- Carunaiselvane, C., & Jeevananthan, S. (2012). Generalized procedure for BLDC motor design and substantiation in MagNet 7.1.1 software. *2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies, ICCEET 2012, December*, 18–25. <https://doi.org/10.1109/ICCEET.2012.6203783>
- Chang, L., Member, S., & Arbor, A. (2003). *Design of a 5-Phase Permanent Magnet Brushless DC Motor for Automobiles*. 3197–3201.
- Decker, A., Decker, A., Decker, A., & Decker, A. (n.d.). *11 . Modeling Power Losses in Electric Vehicle BLDC Motor*.
- Garip, S., & Yasa, Y. (2020). *Design of Outer Runner-Type Brushless Permanent Magnet DC Motor for Lightweight*. 151–156.
- Klauser, F., & Pauschinger, D. (2021). Entrepreneurs of the air: Sprayer drones as mediators of volumetric agriculture. *Journal of Rural Studies*, 84, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.02.016>
- Nizam, M. (2014). *Brushless DC Motor Torque Improvement with Mgnetic Material Stator Core*. November, 158–162.
- Prakosa, J. A., Samokhvalov, D. V, Ponce, G. R. V, & Al-mahturi, F. S. (n.d.). *Speed Control of Brushless DC Motor for Quad Copter Drone Ground Test*. 1, 1–5.
- Reindyto, I. (2021). *Desain dan prototipe motor brushless dc sensorless tiga fasa untuk aplikasi unmanned aerial vehicle*.
- Shastri, S. (2020). *Design and Analysis of Brushless DC Motors for Ceiling Fan Application*. 1–6.
- Y.B. Adyapaka Apatya, A. S. and F. Y. (2017). *2017 15th International Conference on QiR (Quality in Research) International Symposium on Electrical and Computer Engineering : The Westin Resort, Nusa Dua, Bali, 24-27 July 2017*. 209–214.
- Y.B. Adyapaka Apatya, A. S. and F. Y., Chang, L., Member, S., Arbor, A., Elkerdany, M. S., Safwat, I. M., Power, E., Medhat, A., Yossef, M., Elkhatib, M. M., Rahideh, A., Korakianitis, T., Ruiz, P., Keeble, T., Rothman, M. T., Nizam, M., Barragan, L. N., Rodriguez, C. C., A, J. M., ... Method, A. (2020). A Comparative Study on Using

Brushless DC Motor Six- Switch and Four-Switch Inverter for UAV Propulsion System.
Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2(1), 209–214.
<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.07.025>

Yedamale, P. (2003). *PRINCIPLE*. 1–20.

LAMPIRAN

1. Tabel konduktor Tembaga email

Diameter (mm)	Luas Penampang mm^2	Arus (A)
0,1	0,007	0,05
0,2	0,03	0,25
0,3	0,07	0,45
0,4	0,125	0,8
0,45	0,159	1
0,5	0,196	1,25
0,6	0,282	1,8
0,65	0,33	2,1
0,7	0,384	2,45
0,75	0,444	2,8
0,8	0,5	3,2
0,85	0,56	3,6
0,9	0,635	4
1	0,785	5
1,1	0,95	6
1,2	1,13	7,2
1,3	1,32	8,45
1,4	1,53	9,8
1,5	1,76	11
1,6	2	12,8
1,7	2,26	14,45
1,8	2,54	16
1,9	2,83	18
2	3,14	20

2. Datasheet material stainless steel Rotor dan Body motor



**Combined Metals of Chicago
Bellwood Service Center**

Alloy 430 Stainless Steel							UNS: S43000 EN-DIN: 1.4016				
430 stainless is a ferritic straight chrome grade. 430 presents a good corrosion resistance and formability. Typical applications for 430 include: Appliance (components and surface), and automotive trim.											
Nominal Composition											
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N	Fe		
min	-	-	-	-	-	16.0	-	-	-		
max	0.12	1.0	0.040	0.030	1.00	18.0	0.75	-	BAL		
Physical Properties											
	At 70°F					At 20°C					
Density	0.28 lb./in ³					7.74 g/cm ³					
Modulus of Elasticity (E)	29 x 10 ³ ksi					200 x 10 ³ MPa					
Coefficient of Expansion	5.8 x 10 ⁻⁶ microinches/in.-°F (70-600°F)					10.4 μm/m-°C (20-300°C)					
Electrical Resistivity	23.68 μ ohm.in					60 μ ohm.cm					
Thermal Conductivity	15.1 Btu-in./ft. ² hr.-°F					26.1 W/m-K					
Applicable Specifications											
AMS 5503, ASTM A240											
Typical Mechanical Properties – Typical Room Temperature Mechanical Properties											
Condition	Tensile Strength Min (UTS)			0.2% YS Min		Elongation% in 2" Min (50.8 mm)			Hardness Rockwell		
Annealed (Min)	65 ksi (450 MPa)			30 ksi (205 MPa)		22%			89 HRBW (Max)		
Typical mechanical properties are based on ASTM A240											
For further information email: cmcinfo@combmet.com or call: (800) 323-0758				Combined Metals of Chicago Bellwood Service Center 2401 W. Grant Avenue Bellwood, IL 60104 USA				WWW.COMBMET.COM			

REV 2017 03 14

3. Karakteristik magnet neodmium N35



N35

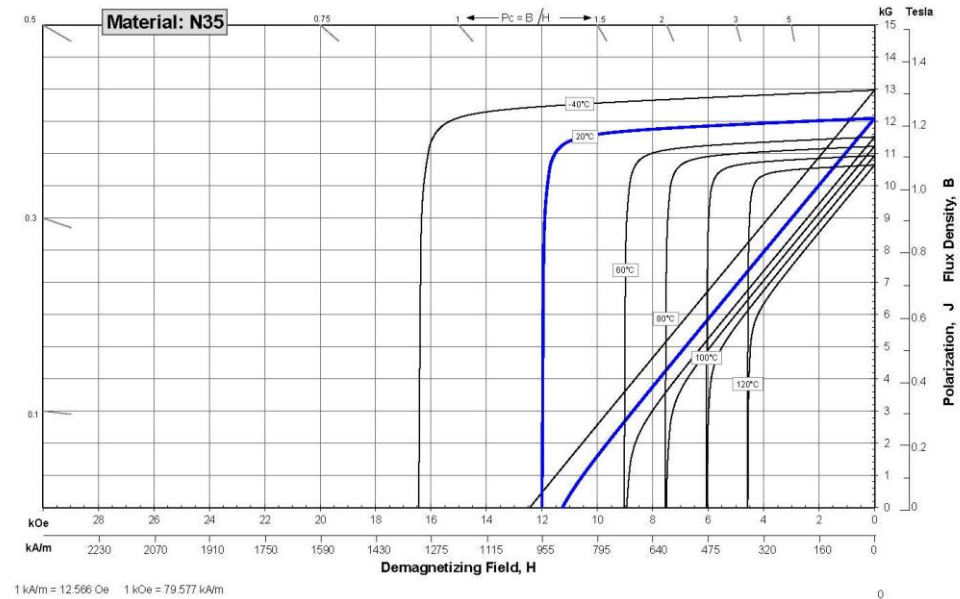
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

Characteristic	Units	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
B_r , Residual Induction	Gauss	11,700	12,100	12,500
	mT	1170	1210	1250
H_{cB} , Coercivity	Oersteds	10,800	11,400	12,000
	kA/m	860	907	955
H_{cJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	12,000		
	kA/m	955		
BH_{max} , Maximum Energy Product	MGOe	33	36	38
	kJm ³	263	283	302

Characteristic	Units	Thermal Properties		
		C //	C ⊥	
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾				
of Induction, α(B _r)	%/°C		-0.12	
of Coercivity, α(H _{cJ})	%/°C		-0.62	
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾	ΔL/L per °C × 10 ⁻⁶	7	-1	
Thermal Conductivity	kcal/mh°C	5.3	5.8	
Specific Heat ⁽³⁾	cal/g°C		0.11	
Cure Temperature, T _c	°C		310	
Other Properties	Flexural Strength	psi	41,300	
		MPa	285	
	Density	g/cm ³		7.6
	Hardness, Vickers	Hv		620
	Electrical Resistivity, ρ	μΩ • cm		150 // 130 ⊥

Notes:
 (1) Coefficients measured between 20 and 80 °C
 (2) Between 20 and 200 °C. Values are typical and can vary.
 (3) Between 20 and 140 °C



Notes The material data and demagnetization curves shown above represent typical properties that may vary due to product shape and size. Demagnetization curves show nominal Br and minimum Hci. Magnets can be supplied thermally stabilized or magnetically calibrated to customer specifications. Additional grades are available. Please contact the factory for information.

Rev. 210607

© Arnold Magnetic Technologies Corp.
 770 Linden Avenue, Rochester, NY 14625
 Ph: (+1) 585-385-9010

E-mail: info@arnoldmagnetics.com
 www.arnoldmagnetics.com

--Halaman ini sengaja dikosongkan--

BIODATA PENULIS



Penulis buku penelitian dengan judul “ **Desain dan Prototipe Motor Brushless DC RPM Rendah untuk Aplikasi Drone Agrikultura**” ini memiliki nama lengkap M Nailil In’am Hilmi dan biasa dipanggil Nailil atau In’am, penulis lahir di Malang, 02 februari 2000. Penulis merupakan anak pertama dari Gatot winarko dan Nikmatuz Zuhro. Penulis Hidup dan besar di Malang kecamatan Pakis. Riwayat Pendidikan penulis ialah MI Mambaul Ulum Pakis, MTsN 3 Malang, SMAN 1 Lawang, dan saat ini penulis sedang menempuh Pendidikan S-1 Teknik Elektro di Institut Teknologi sepuluh Nopember Surabaya. Penulis memiliki pengalaman organisasi diantaranya ketua divisi seni UKM ITS, Ketua Tim Seromiber Bayucaraka ITS, dan Asisten Laboratorium Konversi Energi listrik, Teknik Elektro ITS.