



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**IMPLEMENTASI DAN PENGUJIAN *AXIAL FLUX*  
*PERMANENT MAGNET* PADA MOTOR BLDC 5 KW  
SEBAGAI APLIKASI KENDARAAN LISTRIK**

Ghufron Fawaid  
NRP 0711144000002

Dosen Pembimbing  
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.  
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - EE 184801**

***IMPLEMENTATION AND TESTING OF AXIAL FLUX  
PERMANENT MAGNET ON 5 KW MOTOR  
BRUSHLESS DIRECT CURRENT AS APPLICATION  
FOR ELECTRIC VEHICLE***

Ghufron Fawaid  
NRP 0711144000002

Advisor  
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.  
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

DEPARTEMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019



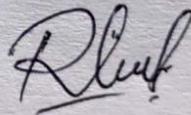
## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“IMPLEMENTASI DAN PENGUJIAN AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET PADA BLDC 5 KW SEBAGAI APLIKASI KENDARAAN LISTRIK”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2019



**Ghufron Fawaid**  
NRP 0711144000002

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**IMPLEMENTASI DAN PENGUJIAN AXIAL FLUX  
PERMANENT MAGNET PADA MOTOR BLDC 5 KW  
SEBAGAI APLIKASI KENDARAAN LISTRIK**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

**Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.**  
NIP. 19731119 200003 1 001

**Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.**  
NIP. 19810905 200501 1 002



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**IMPLEMENTASI DAN PENGUJIAN AXIAL FLUX  
PERMANENT MAGNET PADA MOTOR BLDC 5 KW  
SEBAGAI APLIKASI KENDARAAN LISTRIK**

Ghufron Fawaid  
0711144000002

Dosen Pembimbing 1: Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D  
Dosen Pembimbing 2: Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D

**ABSTRAK**

Dalam perkembangan teknologi kendaraan listrik terutama penelitian mengenai motor listrik sangat diperlukan karena kedepannya dibutuhkan desain motor yang handal dan efisien. Pada tugas akhir ini dilakukan pembuatan dari implementasi hasil desain dan simulasi menggunakan perangkat lunak pada motor *permanent magnet axial flux brushless* DC (AFPM BLDC). Adapun motor BLDC ini dikenal memiliki *power density* yang tinggi dan motor ini didesain untuk menghasilkan daya keluaran 5 kW. Selain itu pada tugas akhir ini juga melakukan pengujian performa motor dan menganalisa hasil parameter-parameter pengujian seperti daya, torsi, kecepatan dan efisiensi. Hasil pembuatan motor BLDC ini menghasilkan motor dengan ukuran diameter luar 152 mm menggunakan 12 slot stator dan 8 kutub rotor yang menghasilkan daya keluaran maksimal 3.66 kW, torsi maksimal 17.62 Nm, kecepatan motor maksimal 4778 rpm dan efisiensi maksimum 87.03 %. Sedangkan karakteristik motor BLDC ini yaitu pada nilai *ratingnya* yaitu pada torsi rating 9.55 Nm, kecepatan rating 3446 rpm, dan daya rating 3.61 kW

**Kata Kunci:** Motor *axial flux* BLDC, Pembuatan Motor, Pengujian Performa Motor

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **IMPLEMENTATION AND TESTING OF AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET ON 5 KW MOTOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT AS APPLICATION FOR ELECTRIC VEHICLE**

Ghufron Fawaid  
0711144000002

1<sup>st</sup> Advisor : Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D  
2<sup>nd</sup> Advisor : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D

## **ABSTRACT**

In the development of electric vehicle technology, especially research on electric motors is very necessary because in the future a reliable and efficient motor design is needed. In this final project, the implementation of the design and simulation results using software on motor permanent magnet axial flux brushless direct current or mostly known as BLDC motor. The BLDC motor is known to have high power density and this motor is designed to produce output power of 5 kW. In addition, this final project also tests the performance of BLDC motor and analyze the result of its parameter such as power, torque, speed and efficiency. The result of implementation is a BLDC motor with outer dimension about 152 mm with 12 slots and 8 rotor poles which produces a maximum output power of 3.66 kW, maximum torque of 17.62 Nm, maximum motor speed of 4778 rpm and maximum efficiency of 87.03%. While the characteristics of this BLDC motor are the rating value which is at 9.55 Nm rating torque, 3446 rpm rating speed and 3.61 kW rating power.

**Keywords:** BLDC Motor, Implementation, Motor Testing

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan tuntunannya penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir Penulis yang berjudul: “**Implementasi dan Pengujian Axial Flux Permanent Magnet Pada Motor BLDC 5 kW Sebagai Aplikasi Kendaraan Listrik**” ini tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dedet Candra Riawan, Ph.D. dan Bapak Dimas Anton Asfani, Ph.D. atas segala tuntunan dan waktunya dalam membimbing penulis hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Mas Uta, Mbak Santi, Mas Ujo, Mas Tegar, Mas Arief, M, Mas Guntur dan Mas Lindra serta seluruh elemen PUI SKO ITS yang membukakan jalan penulis dan membimbing untuk memahami dan mengerti secara mendalam terkait topik tugas ahir ini
4. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Departemen Teknik Elektro-FTE, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
5. Teman-teman e54 dan Laboratorium Konversi Energi (KE) serta Laboratorium Tegangan Tinggi (TT) yang mengingatkan dan mendukung penulis agar penulis

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Desember 2018

**Penulis**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL.....  | i    |
| ABSTRAK.....  | ix   |
| ABSTRACT.....   | xi   |
| KATA PENGANTAR.....   | xiii |
| DAFTAR ISI.....   | xv   |
| DAFTAR GAMBAR .....   | xvii |
| DAFTAR TABEL.....   | xix  |
| BAB 1 PENDAHULUAN .....   | 1    |
| 1.1 Latar Belakang.....   | 1    |
| 1.2 Rumusan Permasalahan.....   | 2    |
| 1.3 Batasan Masalah .....   | 2    |
| 1.4 Tujuan .....  | 2    |
| 1.5 Metodologi .....  | 3    |
| 1.6 Sistematika Penulisan.....  | 5    |
| 1.7 Relevansi .....   | 6    |
| BAB 2 MOTOR LISTRIK AXIAL FLUX PERMANENT                              |      |
| MAGNET BRUSHLESS DC.....  | 7    |
| 2.1 Motor Listrik BLDC .....  | 7    |
| 2.1.1 Jenis Motor Listrik .....                                       | 12   |
| 2.1.2 Prinsip Kerja Motor Axial Flux BLDC .....                       | 14   |
| 2.1.3 Konstruksi Motor Axial Flux BLDC.....                           | 15   |
| 2.2 Komponen Motor Listrik BLDC Axial.....                            | 17   |
| 2.2.1 Stator.....   | 18   |
| 2.2.2 Rotor .....   | 21   |
| 2.3 Desain dan implementasi motor BLDC .....                          | 24   |
| BAB 3 DESAIN DAN IMPLEMENTASI MOTOR BLDC .....                        | 27   |
| 3.1 Desain Umum Axial Flux Permanen Magnet Brushless DC<br>Motor..... | 27   |
| 3.1.1 Perhitungan Kebutuhan Arus .....                                | 27   |
| 3.1.2 Perhitungan <i>Loading Value</i> .....                          | 29   |
| 3.1.3 Perhitungan Diameter <i>Core</i> Stator .....                   | 29   |
| 3.1.4 Perhitungan Nilai Torsi.....                                    | 31   |
| 3.1.5 Pemilihan <i>Airgap</i> .....                                   | 31   |
| 3.2 Data Desain Motor <i>Axial Flux Brushless</i> DC Motor .....      | 31   |
| 3.2.1 Desain parameter mesin <i>motor axial flux</i> BLDC .....       | 32   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3.2.2 | Desain Parameter Stator .....   | 33 |
| 3.2.3 | Parameter Rotor .....   | 37 |
| 3.2.4 | Data Simulasi Karakteristik Motor.....                                | 38 |
| 3.3   | Desain Motor Axial Flux BLDC .....                                    | 39 |
| 3.3.1 | Pembuatan Desain Stator.....  | 40 |
| 3.3.2 | Pembuatan Desain Rotor .....  | 41 |
| 3.3.3 | Pembuatan Desain Shaft Rotor .....                                    | 43 |
| 3.3.4 | Pembuatan Desain <i>Case</i> Stator dan <i>Cover</i> .....            | 43 |
| 3.3.5 | Penggabungan Komponen Desain Pada Motor .....                         | 44 |
| 3.4   | Pembuatan Motor <i>Axial Flux</i> Permanen Magnet.....                | 45 |
| 3.4.1 | Pembuatan stator .....  | 46 |
| 3.4.2 | Pembuatan rotor .....   | 46 |
| 3.4.3 | Pembuatan <i>Case</i> Stator.....                                     | 47 |
| 3.4.4 | Proses <i>Winding</i> Pada Inti Stator dan Pemasangan<br>Sensor ..... | 48 |
| 3.4.5 | <i>Assembly</i> Komponen Motor Axial Flux BLDC.....                   | 49 |
| BAB 4 | HASIL PENGUJIAN MOTOR BLDC .....                                      | 51 |
| 4.1   | Pengujian Komponen Motor .....  | 51 |
| 4.1.1 | Pengujian Isolasi <i>Winding</i> .....                                | 51 |
| 4.1.2 | Pengujian Medan Elektromagnetik Magnet .....                          | 53 |
| 4.1.3 | Pengujian Urutan Fasa dan Sinyal Sensor Hall .....                    | 54 |
| 4.2   | Pengujian Performa Motor Axial Flux BLDC .....                        | 57 |
| 4.2.1 | Pengujian motor BLDC tanpa pembebanan .....                           | 59 |
| 4.2.2 | Pengujian motor BLDC dengan pembebanan.....                           | 61 |
| BAB 5 | PENUTUP .....   | 67 |
| 5.1   | Kesimpulan.....   | 67 |
| 5.2   | Saran.....  | 67 |
|       | DAFTAR PUSTAKA.....   | 69 |
|       | LAMPIRAN.....   | 71 |
|       | RIWAYAT PENULIS .....   | 83 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 1.1 Flowchart <i>implementasi dan pengujian Motor BLDC</i> .....                                 | 3  |
| Gambar 2.1 Rangkaian ekuivalen motor BLDC [3].....  | 9  |
| Gambar 2.2 Desain parameter pada motor BLDC [1] .....   | 12 |
| Gambar 2.3 Pembagian jenis-jenis motor listrik [3].....   | 13 |
| Gambar 2.4 a) Eksitasi pada fasa A b) Eksitasi pada fasa B [1] .....                                    | 14 |
| Gambar 2.5 Kurva karakteristik kecepatan torsi motor BLDC [3] .   | 15 |
| Gambar 2.6 Tipe konstruksi motor [3] [6] [7].....   | 16 |
| Gambar 2.7 Jenis konstruksi motor topologi <i>single rotor</i> [1] .....                                | 17 |
| Gambar 2.8 Konfigurasi motor <i>axial flux</i> BLDC [3].....  | 18 |
| Gambar 2.9 Pembagian kurva histerisis material ferromagnetic [8]  | 21 |
| Gambar 2.10 Rotor motor axial flux BLDC [9] .....   | 21 |
| Gambar 2.11 Sensor hall efek [4] .....  | 23 |
| Gambar 2.12 Sistem komutasi BLDC bersensor [11] .....   | 24 |
| Gambar 3.1 Perbandingan diameter luar dan dalam <i>core</i> stator.....                                 | 30 |
| Gambar 3.2 Desain konstruksi motor .....  | 32 |
| Gambar 3.3 Tipe rangkaian pada motor <i>axial flux</i> BLDC .....                                       | 33 |
| Gambar 3.4 Tipe slot pada motor <i>axial flux</i> BLDC.....   | 34 |
| Gambar 3.5 Konfigurasi <i>winding</i> pada inti stator.....   | 36 |
| Gambar 3.6 Desain <i>assembly</i> motor <i>axial flux</i> BLDC menggunakan bantuan perangkat lunak..... | 38 |
| Gambar 3.7 Kurva karakteristik daya, kecepatan, efisiensi dan arus .....                                | 39 |
| Gambar 3.8 Sistematika pemodelan mekanik motor <i>axial flux</i> BLDC .....                             | 40 |
| Gambar 3.9 Sketsa layer dasar desain stator .....   | 40 |
| Gambar 3.10 Desain 3D inti stator ( <i>core</i> ) .....   | 41 |
| Gambar 3.11 Desain rotor pada motor BLDC.....   | 42 |
| Gambar 3.12 Desain 3 dimensi pada magnet permanen .....   | 42 |
| Gambar 3.13 Desain pada shaft rotor .....   | 43 |
| Gambar 3.14 Desain 3 dimensi pada <i>case</i> Motor .....   | 44 |
| Gambar 3.15 Desain penutup <i>case</i> stator.....  | 44 |
| Gambar 3.16 Hasil <i>Assembly</i> semua komponen motor .....  | 45 |
| Gambar 3.17 Hasil pencetakan stator .....   | 46 |
| Gambar 3.18 Hasil pencetakan rotor .....  | 47 |
| Gambar 3.19 Hasil pencetakan <i>case</i> stator.....  | 47 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 3.20 Hasil belitan pada stator dan pemasangan sensor .....                         | 48 |
| Gambar 3.21 Hasil <i>assembly</i> komponen motor .....                                    | 49 |
| Gambar 4.1 Pengujian isolasi menggunakan <i>megger</i> .....                              | 52 |
| Gambar 4.2 Pengujian medan elektromagnetik magnet<br>menggunakan gauss meter.....         | 53 |
| Gambar 4.3 Pengujian sinyal hall sensor menggunakan <i>picoscope</i> ..                   | 54 |
| Gambar 4.4 Hasil pengujian urutan fasa U .....  | 55 |
| Gambar 4.5 Hasil pengujian urutan fasa V .....  | 56 |
| Gambar 4.6 Hasil pengujian urutan fasa W .....  | 56 |
| Gambar 4.7 a) Skema pengujian motor b) Monitoring pengujian<br>motor menggunakan PC ..... | 58 |
| Gambar 4.8 Skema pengujian motor BLDC tanpa pembebanan.....                               | 59 |
| Gambar 4.9 Grafik <i>duty cycle</i> terhadap kecepatan tanpa pembebanan<br>.....          | 60 |
| Gambar 4.10 Grafik kecepatan terhadap daya tanpa pembebanan<br>.....                      | 60 |
| Gambar 4.11 Skema pengujian motor BLDC dengan pembebanan ..                               | 61 |
| Gambar 4.12 Grafik torsi terhadap kecepatan dan daya .....                                | 62 |
| Gambar 4.13 Grafik torsi terhadap efisiensi dan faktor daya.....                          | 63 |
| Gambar 4.14 Grafik torsi terhadap arus dan tegangan.....                                  | 64 |
| Gambar 4.15 Grafik karakteristik pada motor BLDC .....                                    | 64 |

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| Tabel 2.1 Material Ferromagnet [8].....  | 20 |
| Tabel 2.2 Perbandingan bahan material magnet [10] .....                                  | 22 |
| Tabel 2.3 Spesifikasi motor BLDC 25 kW metode FEM .....                                  | 25 |
| Tabel 2.4 Spesifikasi motor BLDC 25 kW .....   | 26 |
| Tabel 3.1 Kombinasi Slot dan Pole [2] .....  | 28 |
| Tabel 3.2 Perbandingan Luas Penampang dengan Jumlah Lilitan ...                          | 28 |
| Tabel 3.3 Karakteristik Axial Flux Permanent Magnet Berdasarkan Jumlah <i>Pole</i> ..... | 30 |
| Tabel 3.4 Parameter mesin BLDC .....   | 32 |
| Tabel 3.5 Parameter stator motor BLDC .....  | 33 |
| Tabel 3.6 Dimensi slot pada stator.....  | 34 |
| Tabel 3.7 Dimensi inti stator .....  | 35 |
| Tabel 3.8 Konfigurasi lilitan pada stator.....   | 35 |
| Tabel 3.9 Rangkaian pada stator.....   | 36 |
| Tabel 3.10 Spesifikasi rotor.....  | 37 |
| Tabel 3.11 Spesifikasi magnet permanen.....  | 37 |
| Tabel 3.12 Spesifikasi magnet permanen.....  | 38 |
| Tabel 3.13 Hasil simulasi motor pada saat beban penuh.....                               | 38 |
| Tabel 4.1 Pengujian Isolasi Pada Kumparan Stator.....                                    | 52 |
| Tabel 4.2 Pengujian Medan Elektromagnetik Pada Magnet Permanen .....                     | 53 |
| Tabel 4.3 Konfigurasi urutan fasa.....   | 54 |
| Tabel 7.1 Pengujian sinyal pada hall sensor.....   | 71 |
| Tabel 7.2 Pengujian Motor Sistem Keseluruhan .....                                       | 75 |
| Tabel 7.3 Ukuran Kawat Tembaga berdasarkan American Wire Gauge (AWG).....                | 81 |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Transportasi merupakan salah satu kebutuhan masyarakat yang dituntut untuk terus berkesinambungan dalam ketersediaan pelayanannya, termasuk ketersediaan bahan bakarnya. Data dari Badan Pusat Statistik (BPS) Tahun 2016 menunjukkan pertumbuhan jumlah kendaraan motor di Indonesia mencapai 9 juta unit per tahun. Hal ini tentunya akan berpengaruh pada kebutuhan bahan bakar fosil yang akan meningkat dalam jumlah yang besar dan secara tidak langsung akan berdampak pada isu pemanasan global karena kendaraan saat ini masih menggunakan jenis mesin motor bakar. Disisi lain untuk menekan jumlah kendaraan konvensional dan dalam rangka memperkenalkan kendaraan ramah lingkungan, maka muncul kendaraan listrik seperti mobil listrik dan motor listrik yang lebih dikenal sebagai skuter listrik. Adapun kebutuhan kendaraan listrik di Indonesia mengalami kenaikan dan para insinyur saat ini sedang melakukan inovasi kendaraan yang ramah lingkungan yang memiliki performa dan efisiensi tinggi. Teknologi kendaraan listrik sendiri terdiri dari komponen baterai, kontroler, *inverter*, motor listrik, dan sistem transmisi mekanik yang terangkai pada satu sistem sehingga menghasilkan kendaraan listrik yang efisien. Salah satu teknologi motor listrik yang sering digunakan saat ini yaitu motor listrik *brushless direct current* (BLDC), dimana motor ini memiliki banyak aplikasi penggunaannya seperti kendaraan listrik, pompa, kipas, control katub, robotik, pengukuran dan peralatan industri. [1]

Sebelum teknologi motor *brushless direct current* (BLDC) digunakan untuk aplikasi kendaraan listrik, sudah ada teknologi kendaraan listrik dengan transmisi mekanik berupa sikat (*brush*). Namun teknologi ini membutuhkan perawatan secara berkala dan memiliki efisiensi yang rendah. Munculnya teknologi motor *brushless direct current* (BLDC) ini tentunya membuat perkembangan kendaraan listrik semakin berkembang. Adapun motor *brushless direct current* (BLDC) memiliki 2 jenis motor yaitu *axial flux* dan *radial flux*. Dalam pengaplikasiannya pada kendaraan listrik, *axial flux* memiliki beberapa kelebihan yang menjadi pertimbangan mengapa dijadikan sebagai motor listrik yaitu karena segi kekuatan

pernarikan torsi-beban (torque per weight), kepadatan daya (power density) yang tinggi, pembuangan panas (heat removal), dan kemudian dalam mengubah *adjustable air gap* sesuai kebutuhan [2].

Dalam tugas tugas akhir ini akan dilakukan pembuatan motor BLDC kapasitas 5 kW mulai dari pembuatan stator, *winding* stator, rotor, shaft rotor dan mencetak *case* stator hingga pemasangan sensor *hall effect sensor*. Setelah itu dilakukan pengujian performa motor BLDC baik tanpa pembebanan maupun dengan pembebanan untuk melihat parameter uji seperti daya keluaran, torsi, kecepatan, dan efisiensinya. Sehingga pada akhirnya didapatkan berbagai parameter pengujian dan dapat digunakan sebagai dasar dalam pengembangan kendaraan listrik selanjutnya.

## 1.2 Rumusan Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah:

1. Bagaimana cara merealisasikan desain motor BLDC dengan daya keluaran 5 kW yang sesuai dengan hasil simulasi dan parameter.
2. Bagaimana hasil pengujian performansi motor BLDC dengan daya keluaran 5 kW.

## 1.3 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, permasalahan di atas dibatasi sebagai berikut:

1. Desain dan simulasi ini menggunakan perangkat lunak *Ansys Maxwell* dan *Solid Work*.
2. Tugas akhir ini membahas proses implementasi dan menganalisa hasil pengujian motor BLDC, namun tidak membahas implementasi kontroler dan baterai pada motor.
3. Ada beberapa parameter konstrain yang mengacu pada fasilitas riset kendaraan listrik di PUI SKO ITS.

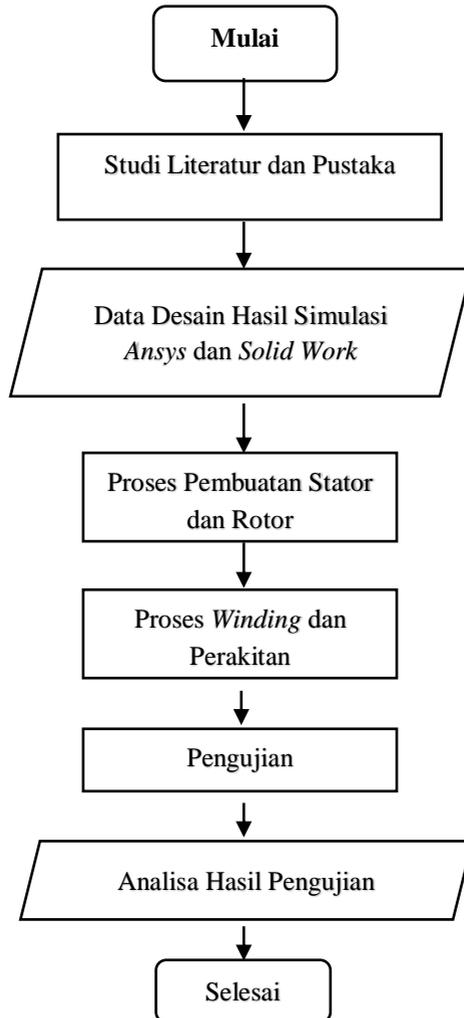
## 1.4 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat motor *axial flux permanent magnet* (AFPM) *Brushless Direct Current* (BLDC) dengan daya keluaran 5 kW.
2. Menguji motor *axial flux permanent magnet* (AFPM) *Brushless Direct Current* (BLDC) dengan keluaran 5 kW.

## 1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:



**Gambar 1.1** Diagram alir implementasi dan pengujian Motor BLDC

## 1. Studi Literatur dan Pustaka

Mempelajari beberapa literatur dan pustaka berupa jurnal ilmiah, tugas akhir sebelumnya, dan teori motor listrik. Dalam studi literatur ini mempelajari dasar-dasar tentang motor *axial flux permanent magnet* (AFPM) *Brushless Direct Current* (BLDC) yang terdiri atas prinsip kerja, jenis-jenis motor, metode kontrol dan parameter-parameter yang terkait dengan motor *axial flux permanent magnet* (AFPM) *Brushless Direct Current* (BLDC) seperti torsi, kerapatan fluks, kuat medan, dan rugi-rugi motor. Adapun literatur yang akan digunakan dalam studi ini berasal dari buku, jurnal ilmiah, artikel ilmiah, *website* dan lainnya yang dapat membantu dalam tugas akhir ini.

## 2. Data Desain Hasil Simulasi *Ansys Maxwell*

Dalam simulasi dan desain motor BLDC ini bertujuan untuk menentukan parameter mekanik seperti jumlah kutub, slot, diameter luar stator, diameter dalam stator, dan jenis permanen magnet. Adapun parameter elektrik yaitu seperti jenis dan ukuran kawat untuk *winding*, nilai tegangan motor, arus motor, torsi dan kecepatan motor.

## 3. Fabrikasi Motor

Dalam pembuatan motor ini terdiri dari komponen stator, *case* stator, rotor, *shaft* rotor, *bearing* dan sensor *hall effect*. Adapun komponen stator terdiri dari inti (*core*), belitan (*winding*), dan *case* stator. Sedangkan komponen rotor terdiri dari magnet permanen, *case* rotor dan *shaft* rotor. Terakhir yaitu pemasangan sensor *hall effect* dan *assembly* semua komponen-komponennya.

## 4. Pengujian Performa Motor

Dalam pengujian motor ini terdiri dari pra-pengujian, pengujian tanpa pembebanan (*no load test*) dan pengujian dengan pembebanan (*load test*). Pada pra-pengujian yaitu bertujuan untuk mengetahui medan elektromagnetik pada magnet, ketahanan isolasi kumparan stator dan pengujian sinyal sensor *hall effect*.

## 5. Analisis Data

Dari hasil pengujian motor yang dihasilkan maka akan dianalisis seperti kecepatan, daya keluaran, karakteristik arus keluaran, dan efisiensi motor. Dari data pengujian ini akan dibandingkan dengan data desain dan simulasi untuk mendapatkan evaluasi dan saran kedepannya dalam mendesain dan membuat motor BLDC yang lebih efisien.

## 6. Penulisan Laporan

Dalam pengerjaan tugas akhir ini akan dilakukan penyusunan laporan sesuai dengan aturan tata tulis yang berlaku.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab, antara lain sebagai berikut:

#### BAB 1: Pendahuluan

Pada bagian ini membahas konsep penyusunan tugas akhir ini meliputi latar belakang, rumusan permasalahan, batasan masalah, tujuan penulisan, metodologi pengerjaan, sistematika dan relevansi penyusunan laporan tugas akhir.

#### BAB 2: Tinjauan Pustaka

Pada bagian ini membahas dasar teori yang menunjang tugas akhir ini seperti konsep motor *axial flux permanent magnet* (AFPM) *Brushless Direct Current* (BLDC), dan cara desain simulasi yang digunakan sebagai data untuk merealisasikan motor BLDC.

#### BAB 3: Data Desain dan Metode Fabrikasi Motor BLDC

Pada bagian ini membahas tentang data hasil desain dan simulasi yang akan digunakan sebagai parameter untuk membuat motor *axial flux* BLDC.

#### BAB 4: Analisa Data Pengujian Motor BLDC

Pada bagian ini membahas tentang hasil pengujian performa motor berdasarkan data parameter-parameter yang telah ditentukan pada perangkat lunak

#### BAB 5: Penutup

Pada bagian ini membahas tentang hasil semua pengujian motor *axial flux* BLDC dalam bentuk kesimpulan. Selain itu

juga ada beberapa saran yang diharapkan sebagai bentuk penyempurnaan dan keberlanjutan tugas akhir ini.

### **1.7 Relevansi**

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat antara lain yaitu :

1. Menjadi referensi yang dapat menunjang industri kendaraan listrik terutama yang berhubungan dengan teknologi motor listrik
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian dengan topik pada kendaraan listrik khususnya rancang bangun motor *axial flux* BLDC

## **BAB 2**

# **MOTOR BLDC AXIAL FLUX DENGAN PERMANEN MAGNET**

Kendaraan listrik merupakan salah satu produk penelitian abad ini yang sering dikampanyekan sebagai teknologi kendaraan hijau ramah lingkungan (*green car*). Beberapa negara yang sudah mengembangkan teknologi kendaraan listrik sebagai prioritas utama dalam menangkal isu pemanasan global, yaitu china dan amerika serikat. Produk unggulan yang dikembangkan masing-masing negara tersebut adalah BYD e6 dan Tesla Model 3 ini merupakan kendaraan listrik paling mutakhir. Keunggulan dalam teknologi mereka adalah kemampuan *fast charging*, *long range per charging* dan harga yang kompetitif. Tentunya jika melihat teknologi kendaraan listrik, pasti akan ditemukan komponen utama penyusun kendaraan listrik tersebut yaitu baterai, kontroler, motor listrik dan juga komponen penunjang lainnya seperti *frame* dan peralatan mekanik lainnya. Salah satu komponen kendaraan listrik yang menjadi topik-topik utama dalam penelitian kendaraan listrik yaitu desain motor penggerak. Perkembangan penelitian motor penggerak listrik memiliki tren tantangan kedepannya, yaitu mampu mendesain motor listrik dengan dimensi kecil, namun memiliki daya, torsi dan efisiensi yang tinggi. Tentunya dalam mendesain motor listrik kita harus memperhatikan parameter mekanik dan parameter elektrik yang dibutuhkan seperti daya, torsi, kecepatan dan efisiensi. Salah satu tipe dalam desain motor yaitu menggunakan *axial flux* karena dengan teknologi ini memiliki kelebihan dan keuntungan dibanding tipe motor yang lain yaitu sistem pendinginan yang handal dan *power density* yang tinggi [2].

### **2.1 Motor Listrik BLDC**

Motor listrik arus searah (Motor DC) merupakan sebuah motor listrik yang menggunakan sumber tegangan DC sebagai energi penggerakannya. Pada umumnya motor jenis ini menggunakan sikat (*brush*) dan dalam pengoperasiannya langsung dihubungkan dengan baterai tanpa menggunakan kontroler. Namun kelemahan motor DC

konvensional ini membutuhkan perawatan yang lebih karena pada sistem sikat terdapat banyak masalah terutama di rugi-rugi dayanya. Aplikasi dari menggunakan motor ini sering ditemui di kehidupan sehari-hari seperti *mixer*, *blender*, pompa air, mesin jahit dan lain sebagainya. Adapun menggunakan motor listrik memiliki kelebihan jika dibanding dengan motor bakar, antara lain:

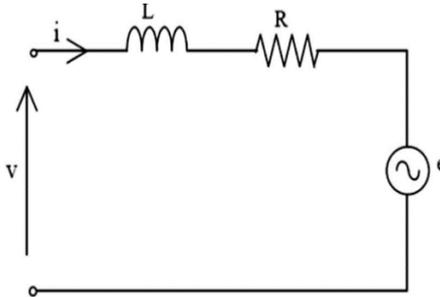
- a) Suara mesin dan getaran yang lebih rendah
- b) Memiliki biaya yang lebih rendah berdasarkan jenis konsumsi sumber energi
- c) Tidak menghasilkan gas buang apapun

Pada saat ini perkembangan motor listrik ini mulai mengalami perkembangan yaitu pada saat konsep motor listrik DC tanpa sikat mulai muncul dalam penelitian akhir-akhir ini. Motor BLDC (Brushless Direct Current Motor) menjadi pilihan dalam pengembangan kendaraan listrik karena memiliki keunggulan dalam performanya yaitu dari sisi efisiensi yang tinggi, tidak ada suara berlebihan, memiliki keandalan yang baik dan tentunya perawatan yang mudah dan murah. Disisi lain ada dua jenis motor BLDC berdasarkan arah fluksnya, yaitu *axial flux* dan *radial flux*. Adapun karakteristik utama dari motor *axial flux* BLDC dibanding *radial flux* berdasarkan Jacek F. Gieras dalam buku *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines* ini antara lain:

- a) Motor listrik *axial flux permanent magnet* (AFPM) memiliki diameter yang lebih besar dibanding rasio motor listrik *radial flux*
- b) Motor listrik AFPM memiliki bentuk planar sehingga memudahkan untuk mengatur jarak *air gap*
- c) Dengan ukuran daya motor yang sama, motor listrik tipe *axial flux* BLDC memiliki berat yang lebih ringan dibanding motor listrik tipe *radial flux* sehingga mampu meningkatkan *power density*
- d) Motor AFPM jika didesain dengan inti stator diameter yang lebih besar maka dapat mengakomodir jumlah kutub yang lebih banyak sehingga cocok untuk aplikasi motor listrik dengan frekuensi rendah ataupun tinggi

- e) Dengan ukuran daya motor yang sama pula, medan magnet yang dihasilkan motor listrik axial flux lebih besar sehingga torsi keluarannya juga lebih kuat
- f) Sistem pendinginan dalam motor *axial flux* BLDC memiliki sistem yang lebih baik sehingga mampu meningkatkan *lifetime* motor lebih lama

Secara umum motor BLDC dengan persebaran fluks secara aksial lebih memberikan keuntungan yang lebih banyak dibanding motor fluks radial. Untuk rangkain listrik pengganti motor BLDC adalah sebagai berikut:



**Gambar 2.1** Rangkaian ekivalen motor BLDC [3]

Dengan menggunakan rangkaian ekivalen motor BLDC didapatkan persamaan:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.1)$$

Keterangan:

V:Fasa Tegangan

i :Fasa Arus

e :Tegangan *Back-emf*

L :Fasa Induktasi

Motor BLDC juga terdapat tiga fasa sumber pada kumparan dengan persamaan sebagai berikut [3]

$$V_{uv} = R(i_u - i_v) + L \frac{d(i_u - i_v)}{dt} + e_u - e_v \quad (2.2)$$

$$V_{vw} = R(i_v - i_w) + L \frac{d(i_v - i_w)}{dt} + e_v - e_w \quad (2.3)$$

$$V_{wu} = R(i_w - i_u) + L \frac{d(i_w - i_u)}{dt} + e_w - e_u \quad (2.4)$$

Adapun torsi yang terbangkit pada motor berdasarkan persamaan berikut [4]

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (2.5)$$

$$T_e = K_t [f(\theta_e) i_a + f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) i_b + f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) i_c] \quad (2.6)$$

Keterangan:

$V_a V_b V_c$  : Tegangan terminal fasa a, b dan c (V)

$I_a I_b I_c$  : Arus terminal fasa a,b, dan c (A)

$e_a e_b e_c$  : back emf fasa a,b, dan c (V)

$L$  : Induktansi kumparan stator (H)

$R$  : Hambatan dalam kumparan stator (Ohm)

$T_e$  : Torsi elektromagnetik

$\omega_m$  : Kecepatan motor (rad/s)

$K_t$  : Konstanta torsi (Nm/A)

Sedangkan persamaan daya keluaran pada motor BLDC ini dijelaskan dalam persamaan berikut [5]

$$P_{out} = \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A_s \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^3 \quad (2.7)$$

$K_e$  : Faktor nilai EMF

$K_i$  : Faktor nilai arus

$K_p$  : Faktor nilai gelombang daya

$\eta$  : Efisiensi

$B_g$  : Kepadatan fluks magnet pada celah udara (air gap)

$A_s$  : Pembebanan elektrik

$f$  : Frekuensi konverter

$p$  : Jumlah pasang kutub

$\lambda$  : Rasio diameter dalam luar pada *core*

$D_o$  : Diameter luar pada *core* stator

Berdasarkan persamaan 2.7 daya yang dihasilkan dari motor BDLC ditentukan oleh banyak faktor. Daya keluaran pada motor

bergantung pada rasio diameter luar dalam *core* dan jumlah *pole* serta bergantung pada volume efektif pada motor yang terkait dengan *power density* yang sesuai pada nilai  $\lambda$  optimal. Nilai referensi puncak EMF sangat dipengaruhi oleh nilai *turn per slot* dan diameter motor yang ditentukan. [5]

$$E_{pk} = K_e N_{fasa} B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2 \quad (2.8)$$

$E_{pk}$  : Nilai EMF

$N_{fasa}$  : Jumlah *turn* setiap slot

$B_g$  : Kepadatan *flux* pada celah udara

Dalam menentukan desain suatu motor juga tidak terlepas dari kekuatan *flux* dari magnet, ketebalan magnet dan *flux leakage* pada magnet. Hal ini terlihat bahwa semakin tebal magnet permanen maka daya fluks medan magnet meningkat dan akan meningkatkan daya keluaran motor. [5]

$$D_i = \lambda D_o \quad (2.9)$$

$$D_g = \frac{D_o(1+\lambda)}{2} \quad (2.10)$$

$$L_{cu} = \frac{\pi D_o \lambda}{8p} \quad (2.11)$$

$$K_f = \frac{B_g}{B_u} \quad (2.12)$$

$$K_d = 1 - \frac{p}{30} \quad (2.13)$$

$$L_{SM} = \frac{\mu_r B_g g}{(B_r - B_g) K_d} K_f \quad (2.14)$$

$$N_{fasa} = \frac{A_s D_g}{2m I_{rms}} \quad (2.15)$$

$B_u$  : Rerata diameter celah udara

$L_{cu}$  : Tonjolan *winding* pada *core*

$B_u$  : Kepadatan fluks pada permukaan magnet

$B_r$  : Kepadatan residu fluks pada magnet

$K_f$  : Faktor fluks terfokus

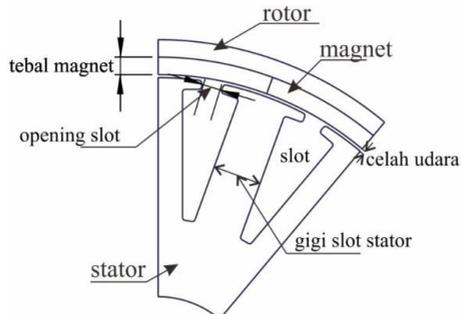
$K_d$  : Leakage fluks pada magnet permanen

$g$  : Jarak celah udara

$\mu_r$  : Permeabilitas magnet

$L_{SM}$ : Ketebalan magnet permanen  
 $m$  : Jumlah fasa

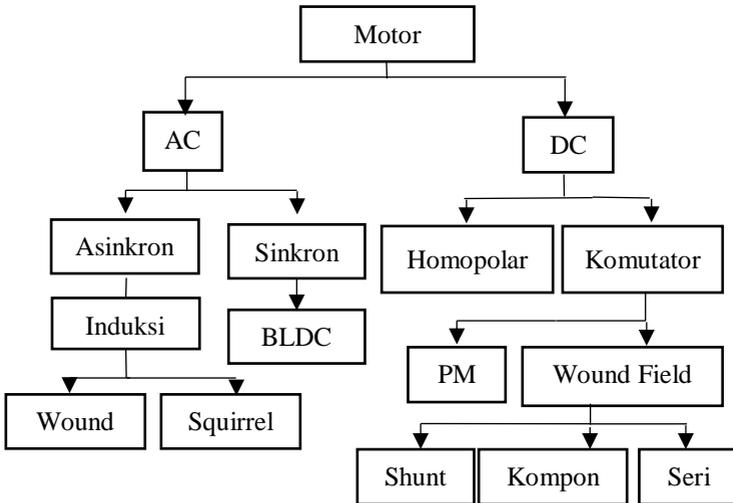
Dari semua persamaan diatas menjelaskan bagaimana semua parameter tersebut akan berpengaruh pada desain akhir motor. Adapun parameter tersebut ditunjukkan pada gambar 2.2 dibawah ini



**Gambar 2.2** Desain parameter pada motor BLDC [1]

### 2.1.1 Jenis Motor Listrik

Motor listrik terdiri dari beberapa macam jenis yang banyak digunakan sebagai motor penggerak dalam berbagai aplikasinya. Pembagian motor listrik terbagi berdasarkan sumber tegangannya, yaitu sumber tegangan bolak-bolak (Alternating Current) dan sumber tegangan searah (Direct Current). Sedangkan pada sisi penyaluran arus pada rotor atau disebut sebagai proses komutasi terbagi menjadi dua yaitu komutasi dengan menggunakan sikat (brush) atau komutasi tanpa sikat (brushless). Berikut ini merupakan beberapa jenis motor yang sering digunakan dalam dunia industri, salah satunya motor tanpa sikat (brushless motor). Cara kerja motor *brushless* motor pun menggunakan kontroler sebagai pengatur arus masukannya yang mana terdapat sinyal arus masukan berbentuk trapezoidal. Sistem sinyal ini memiliki kesamaan dengan motor listrik DC dengan sistem komutasi sikat, sehingga motor brushless DC tetap tergolong keluarga motor AC. Adapun pembagian motor listrik seperti pada gambar 2.3 berikut ini:

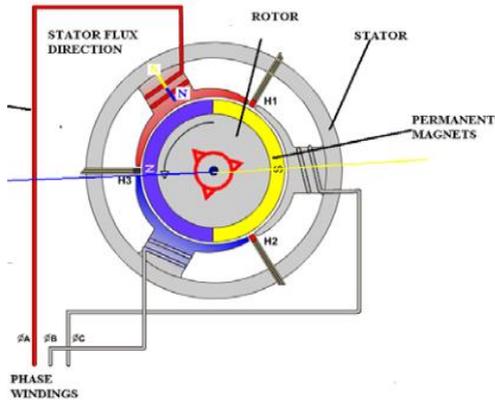


**Gambar 2.3** Pembagian jenis-jenis motor listrik [3]

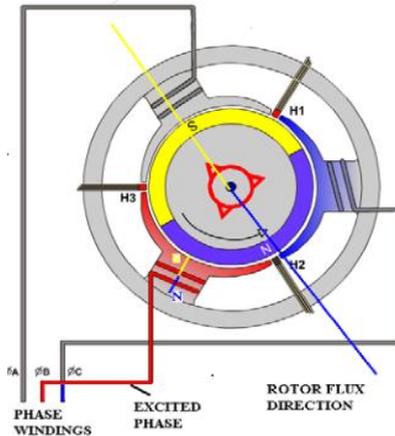
Motor Brushless DC (BLDC) merupakan salah satu jenis motor listrik DC yang menggunakan sistem komutasi tanpa sikat. Motor BLDC ini menggunakan magnet permanen sebagai sumber pembangkit medan magnetnya. Adapun medan magnet yang ditimbulkan dari jangkar yang terdapat pada stator ini disuplai dari arus baterai. Komutasi tanpa sikat ini berfungsi untuk mengalirkan arus dari sumber pada baterai, kemudian kontroler menuju motor listrik. Kelebihan dari motor BLDC ini karena tanpa menggunakan sikat sehingga mengurangi rugi-rugi gesek dan rugi-rugi arus. Motor listrik BLDC ini memiliki kelebihan dari motor induksi karena motor ini memiliki efisiensi dan faktor daya yang lebih baik dengan ukuran dimensi yang sama. Berdasarkan aliran fluksnya motor BLDC terbagi menjadi dua yaitu motor *axial flux* dan *radial flux* BLDC. Pada saat ini menggunakan motor *axial flux* lebih banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan. Salah satu kelebihannya adalah dari segi kekuatan penarikan beban, pembuangan panas, dan kemudahan pengaturan air gap menjadikan motor *axial* lebih banyak diminita dalam industri kendaraan listrik.

### 2.1.2 Prinsip Kerja Motor Axial Flux BLDC

Motor magnet permanen BLDC merupakan motor yang disuplai oleh sumber belitan tiga fasa pada slot stator. Sedangkan magnet pada rotor berfungsi sebagai bagian eksitasi motor. Belitan fasa pada motor akan mendapatkan arus sesuai dengan sinkronisasi pada pergerakan rotor yang mana hal ini berdasarkan pada pergerakan medan magnet.



a)

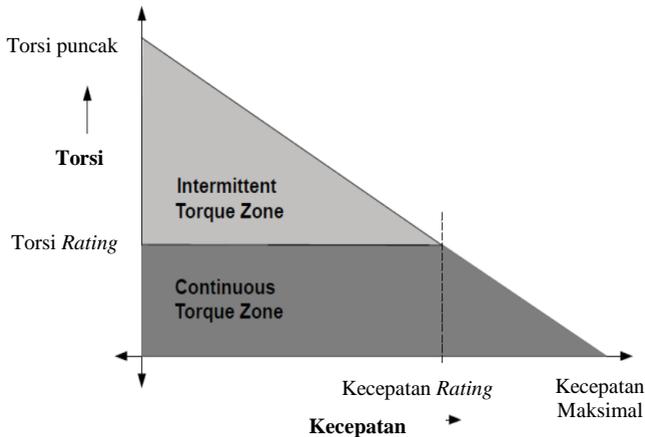


b)

**Gambar 2.4** a) Eksitasi pada fasa A b) Eksitasi pada fasa B [1]

Seperti pada gambar 2.4 a menunjukkan bahwa fasa A mengalami eksitasi dengan fluks stator ditimbulkan oleh fasa A sedangkan fluks rotor ditimbulkan dari magnet permanen. Dari dua fluks yang saling bertemu kemudian rotor berputar seperti pada gambar 2.4 b. Kemudian fasa B mengalami eksitasi dan fluks medan magnet pada fasa B akan bertemu dengan fluks pada rotor lalu seterusnya pada fasa C sesuai waktu yang telah ditentukan.

Adapun motor BLDC memiliki karakteristik parameter torsi pada saat torsi puncak dan torsi *rating*. Selama motor berputar, bisa dibebani sampai *rating* torsi bahkan sampai torsi maksimal selama mengikuti kurva kecepatan torsi. Kecepatan semakin tinggi maka torsi akan tetap sampai pada *rating* kecepatan sehingga torsi akan turun.

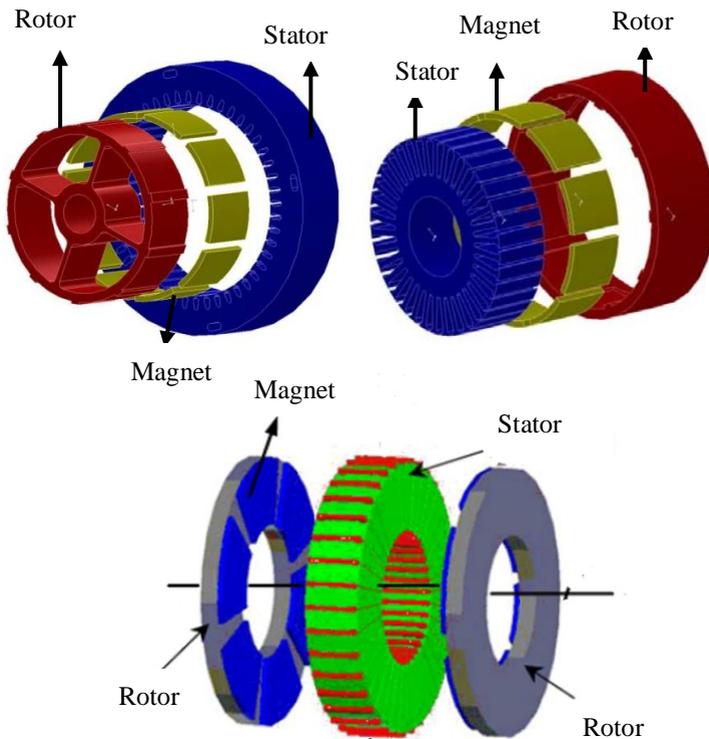


**Gambar 2.5** Kurva karakteristik kecepatan torsi motor BLDC [3]

### 2.1.3 Konstruksi Motor *Axial Flux* BLDC

Konstruksi motor listrik *brushless* DC ada dua yaitu tipe motor rotor silindris dan *pancake*. Kebanyakan konstruksi motor *brushless* DC adalah silindris, dan yang paling banyak diminati adalah tipe *inside rotor*. Adapun jenis kedua yaitu *outside rotor* diletakkan pada sisi luar sekeliling stator. Konstruksi silindris berbentuk tebal dan terlihat seperti pipa. Karena bentuknya yang seperti itu maka arah medan elektromagnetik radial terhadap sumbu putarnya. Motor jenis *pancake* ini memiliki konstruksi stator di tengah. Jika dilihat lebih

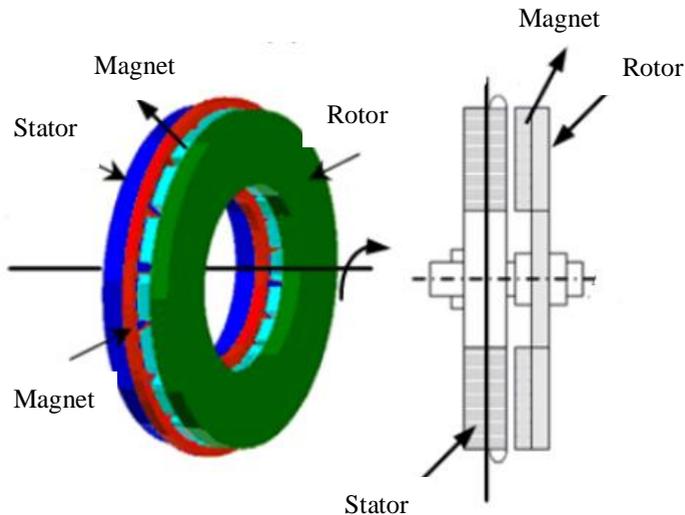
jelas terdapat motor dengan konstruksi satu stator dengan dua rotor yang mengapit, sehingga torsi yang dihasilkan lebih besar. Untuk motor dengan satu stator dan satu rotor menghasilkan torsi yang lebih kecil. Motor listrik seperti ini sering ditemukan dalam peralatan sehari-hari menunjukkan bahwa motor *axial flux* BLDC bisa dimanfaatkan sebagai pompa, kipas angin dan peralatan mesin robot. Sedangkan motor dengan rotor berdiameter besar dengan momen inersia yang tinggi dapat dimanfaatkan sebagai *flywheel*.



**Gambar 2.6** Tipe konstruksi motor [3] [6] [7]

Motor *axial flux* BLDC memiliki bentuk yang memungkinkan fluks mengalir secara *axial*. Dengan menggunakan motor *axial* BLDC ini mampu memanfaatkan ruang dalam kendaraan listrik secara

maksimal yang disesuaikan dengan kebutuhan beban. Terdapat beberapa jenis konstruksi yang biasa digunakan dalam motor *axial flux* BLDC, diantara lain seperti pada gambar berikut:

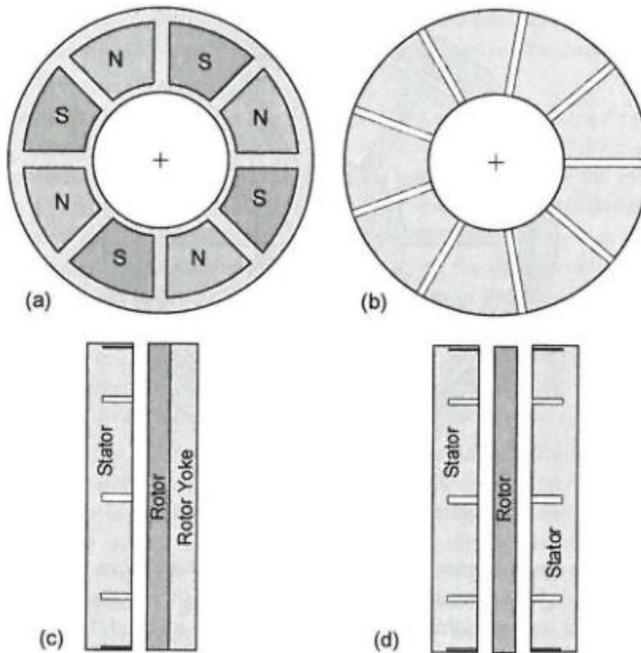


**Gambar 2.7** Jenis konstruksi motor topologi *single rotor* [1]

Dari gambar diatas dijelaskan ada beberapa tipe konstruksi motor seperti stator tunggal rotor tunggal dan stator ganda rotor tunggal, . Dalam penelitian ini digunakan tipe rotor tunggal dan stator tunggal, dimana terdapat *air gap* antara stator dan rotor untuk menghasilkan medan elektromagnetik maksimum sehingga menghasilkan performa yang terbaik.

## 2.2 Komponen Motor Listrik BLDC Axial

Pergerakan rotasi motor didapatkan dari arah lilitan dan medan magnet. Dalam *radial flux* motor, lilitan didapatkan sepanjang arah *axial* dan fluks mengalir secara radial. Sedangkan motor *axial*, fluks motor mengalir berdasarkan arah *axial* dan lilitan didapatkan dari arah radial seperti pada gambar dibawah:



**Gambar 2.8** Konfigurasi motor *axial flux* BLDC [3]

Dengan mengkonversi *rotor yoke* kedalam stator kedua dalam gambar d, rotor akan seimbang konfigurasi seperti ini memiliki rotor yang diapit oleh dua stator dan menghasilkan peningkatan performa yang lebih baik.

Adapun komponen motor *axial flux* BLDC pada umumnya memiliki bagian antara lain:

### 2.2.1 Stator

Stator merupakan bagian yang diam atau bersifat statis pada motor, yang berfungsi sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga mampu membangkitkan gaya mekanik. Secara konstruksi stator terdiri dari laminasi besi

dengan ukuran tertentu dan memiliki jumlah laminasi sesuai tebal pada desain. Adapun stator terbagi menjadi dua bagian, antara lain

### **2.2.1.1 Belitan Stator**

Pada bagian motor listrik terdapat kawat pada stator yang berfungsi untuk menghasilkan medan elektromagnetik. Kawat ini dilapisi oleh sebuah pelapis yang disebut sebagai email (enameled wire) atau secara umum dikenal sebagai koil yang dililitkan pada stator. Bahan yang digunakan pada kawat tembaga ini adalah polivinil formal (Formvar), poliuretan, poliamida, poliester, poliester-polimida, poliamida-polimida (atau amida-imida), dan polimida. Semua bahan penyusun ini memiliki tingkatan suhu yang berbeda-beda sesuai dengan kondisi motor. Dalam menentukan ukuran kawat, besar diameternya dinyatakan dalam bentuk standar *american wire gauge* (AWG). Sedangkan untuk standar tahanan isolasi menggunakan standar dari *National Electrical Manufacturer Association* (NEMA) yang semuanya kembali dari pabrikan atau produsen kawat tembaga tersebut.

### **2.2.1.2 Inti Stator**

*Core* atau inti stator tersusun dari bahan pembentuk dari besi ferrit yang disusun secara tumpuk (laminasi) hingga terbentuk inti yang kokoh dan rapi. Bahan magnetik penyusun inti stator ini memiliki sifat koersif atau mampu bertahan terhadap benturan kemagnetan dan dibentuk dengan isolasi yang lebih kuat karena susunan partikelnya. Inti stator dililit dengan ukuran besi yang tipis berlaminasi yang berfungsi untuk mengurasi arus rugi-rugi yang disebut sebagai arus rugi eddy (eddy current losses). Dalam pemilihan material *core stator* ini juga memperhatikan kurva karakteristik magnetisasi, yang digambarkan dalam hubungan kerapatan flux ( $B$ ) dan intensitas medan magnet ( $H$ ) untuk core berbahan besi. Hal ini juga menunjukkan bahwa meningkatnya kerapatan flux yang sesuai dengan medan magnet hingga mencapai nilai tertentu sehingga titik maksimalnya akan konstan sebagaimana kekuatan medan yang tetap meningkat seperti pada gambar 2.9. Bentuk kurva loop histerisis ini bergantung pada bahan material magnet.

**Tabel 2.1** Material Ferromagnet [8]

| No | Material       | Elemen     | Maximum Flux Density (B max) | Permeabilitas Relatif ( $\mu_r$ ) | Residu Fluks ( $B_r$ ) |
|----|----------------|------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| 1  | Besi Kobalt    | Fe, Co, C  | 1                            | 250                               | 0.95                   |
| 2  | Besi Cast      | Fe, C      | 2                            | 1000                              | 0.85                   |
| 3  | 78.5 Permalloy | Ni, Fe, Mn | 1.7                          | 12K-100K                          | 0.6                    |
| 4  | Silicon Steel  | Fe, Si     | 1.9                          | 8300                              | 0.5                    |

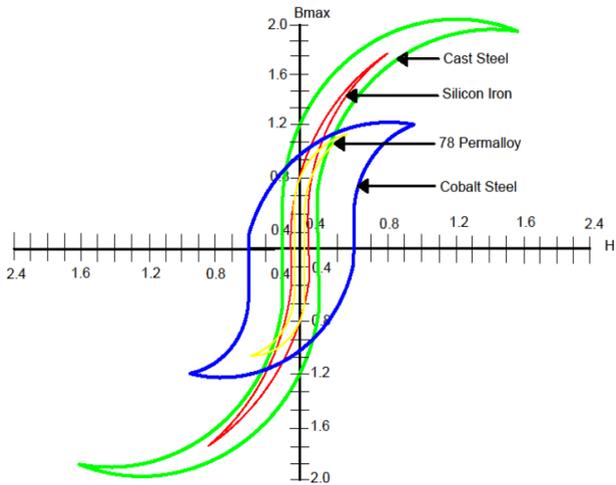
Dalam material ferromagnetik ini bertujuan untuk menghasilkan intensitas medan magnet yang timbul akibat arus listrik yang mengalir. Seperti dijelaskan pada persamaan berikut:

$$\int H \cdot dl = I \quad (2.16)$$

$$B = \mu H \quad (2.17)$$

$$\Phi = B \cdot A \quad (2.18)$$

Berdasarkan persamaan 2.7 dijelaskan pula jika fluks yang terbangkit semakin besar maka daya keluaran motor juga akan meningkat.



**Gambar 2.9** Pembagian kurva histerisis material *ferromagnetic* [8]

### 2.2.2 Rotor

Rotor merupakan bagian yang bergerak atau bersifat dinamis pada motor, berfungsi untuk menghasilkan gerakan mekanik melalui *shaft*-nya.



**Gambar 2.10** Rotor motor *axial flux* BLDC [9]

Adapun pada rotor terdapat dua komponen utama, antara lain:

### 2.2.2.1 Magnet Permanen

Rotor pada motor *axial flux* BLDC terdiri dari beberapa magnet permanen yang menempel pada sisi rotor. Jumlah dari magnet permanen ini berdasarkan jumlah kutubnya. Dimana dalam penelitian ini akan menggunakan 8 buah magnet permanen. Pada umumnya magnet permanen memiliki tipe material neodymium (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB atau magnet neo) sehingga sering disebut sebagai magnet neodymium. Adapun magnet permanen lainnya yang memiliki tingkat kekuatan gaya magnet tersusun atas komponen yang sama yaitu campuran logam neodymium, besi, AlNiCo, Samarium Kobalt dan Boron yang membentuk kristal. Setiap material permanen magnet pada dasarnya memiliki karakteristik masing-masing. Namun, dalam penelitian ini menggunakan magnet permanen dari bahan NdFeB dengan dasar pemilihan yang dilihat dari sisi performa dan harga. Adapun berikut adalah tabel perbandingan beberapa bahan magnet permanen.

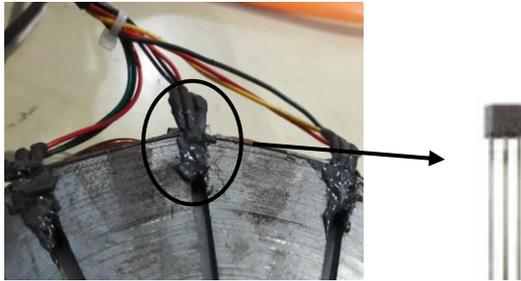
**Tabel 2.2 Perbandingan bahan material magnet [10]**

| <b>Material Magnet</b> | <b>BH maksimal</b> | <b>Br</b> | <b>Hc</b> |
|------------------------|--------------------|-----------|-----------|
| NdFeB                  | 200-500            | 0.97-1.45 | 740-1000  |
| SmCo                   | 120-400            | 0.85-1.10 | 620-840   |
| Ferrite                | 7-42               | 0.20-0.48 | 120-360   |
| AlNiCo                 | 10-35              | 0.60-1.16 | 40-120    |

### 2.2.2.2 Hall Sensor

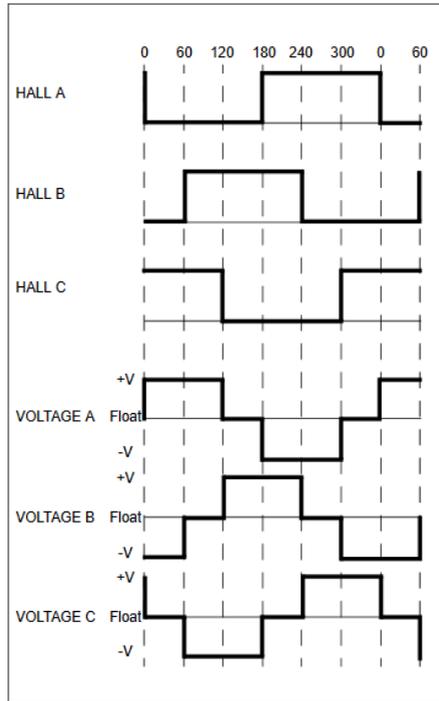
Sensor hall efek adalah transduser yang bervariasi tegangan keluarannya sebagai respon terhadap suatu medan magnet. Kegunaan dari sensor hall efek ini yaitu untuk mendeteksi kedekatan dan posisi dari suatu objek yang memiliki medan magnet. Pada motor *axial flux* BLDC ini terdapat 3 sensor hall efek yang dipasang tegak lurus dengan magnet dimana sensor ini akan memberikan informasi digital mengenai posisi magnet. Dengan konfigurasi tertentu, sensor hall efek ini akan memberikan informasi mengenai sistem komutasi pada motor *axial flux* BLDC. Sistem komutasi ini akan mempengaruhi cara kontroler memberikan suplai daya. Tentunya kontroler akan memberika suplai daya sesuai waktu, karena jika tidak sesuai maka

motor tidak akan berputar. Untuk posisi sensor ini diletakkan dengan perbedaan sudut derajat tertentu. Pada motor *axial flux* BLDC ini menggunakan tiga buah sensor yang diletakkan pada stator yang paling dekat dengan rotor, dengan tujuan supaya menghasilkan data yang akurat.



**Gambar 2.11** Sensor hall efek [4]

Dari informasi sensor hall sensor dengan melakukan *switching* sinyal 0 dan 1 maka akan memberikan data yang akan dibaca kontroler untuk memberikan arus pada kumparan motor. Hal ini terlihat pada gambar 2.12



**Gambar 2.12** Sistem komutasi BLDC bersensor [11]

### 2.3 Desain dan implementasi motor BLDC

Penelitian mengenai motor *axial flux* BLDC ini sudah dilakukan penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini tentunya tidak dimulai dari awal karena dalam penelitian ini penulis menggunakan beberapa referensi yang dijadikan acuan, antara lain pada penelitian perancangan dan uji performa motor *axial flux coreless* BLDC (Hudha, 2014) menjelaskan tentang rancang bangun motor *axial flux* BLDC tanpa inti stator (*core*) dengan tujuan untuk mengurangi *cogging torque* dan memiliki kelebihan dalam kebutuhan biaya yang tentunya lebih murah. Disisi lain desain ini menghasilkan torsi yang kecil karena medan magnet yang dihasilkan tidak sebesar motor yang memiliki inti stator (*core*). Dalam penelitian ini dihasilkan motor listrik dengan daya 345Watt dengan desain simulasi yang ditentukan

sebesar 500 Watt. Selain itu motor ini menghasilkan efisiensi maksimum sebesar 84.31 % dan torsi maksimum pada 15.85 Nm.

Penelitian lain yaitu mengenai desain dan analisis motor *axial flux* BLDC berbasis 3D FEM (Gede, 2014) membahas tentang simulasi dan pembuatan motor *axial flux* BLDC 25 kW dengan metode *Finite Element Methode* (FEM). Dalam penelitian ini menggunakan bantuan perangkat lunak dimana didalamnya dilakukan simulasi untuk mendapatkan konsep motor *axial flux* BLDC yang memiliki efisiensi tinggi. Adapun parameter awal motor yaitu desain motor 25 kW, tegangan sumber 400 V, dengan torsi maksimal yang dihasilkan yaitu 109 Nm. Setelah dilakukan simulasi dan desain, dibuatlah motor dengan spesifikasi sebagai motor:

**Tabel 2.3** Spesifikasi motor BLDC 25 kW metode FEM

|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Tipe Motor                      | <i>Single Sided</i>  |
| Jenis Stator                    | <i>Sloted Stator</i> |
| Diameter Luar (mm)              | 220                  |
| Diameter Dalam (mm)             | 104.5                |
| Jumlah Slot Stator              | 12                   |
| Panjang <i>Core</i> Stator (mm) | 30                   |
| Tebal Inti Stator (mm)          | 19                   |
| Jumlah Kutub                    | 10                   |
| Panjang Inti Rotor (mm)         | 10                   |
| Panjang Magnet                  | 57.75                |
| Ketebalan Magnet                | 8                    |
| Jenis Material Inti             | D23_50               |
| Jumlah Lilitan                  | 34                   |
| Lebar Kawat (mm)                | 4.36                 |
| Ketebalan Kawat (mm)            | 1.02                 |
| Jenis Material Belitan          | Tembaga              |

Adapun juga penelitian rancang bangun dan pengujian performa motor *axial flux* BLDC dual stator dengan daya 25 kW. Dalam analisa penelitian ini motor listrik menghasilkan daya *output* 24.99 kW dengan torsi maksimum 61.67 Nm. Adapun spesifikasi dari desain dan implementasi motor ini adalah sebagai berikut:

**Tabel 2.4** Spesifikasi motor BLDC 25 kW

| Spesifikasi Stator                |                      |
|-----------------------------------|----------------------|
| Tipe Motor                        | <i>Double Side</i>   |
| Jenis Stator                      | <i>Sloted Stator</i> |
| Posisi Stator                     | Tengah               |
| Jumlah Slot Stator                | 23                   |
| Diameter Luar (mm)                | 315                  |
| Diameter Dalam (mm)               | 225                  |
| Panjang <i>Core</i>               | 40                   |
| Jenis Material                    | Steel_1010           |
| Tipe Rotor                        | <i>Axial_PM</i>      |
| Posisi Rotor                      | Mengapit             |
| Jumlah Kutub                      | 20                   |
| Diameter Luar (mm)                | 315                  |
| Diameter Dalam (mm)               | 225                  |
| Panjang Inti Rotor (mm)           | 8                    |
| <i>Stacking Factor</i> Inti rotor | 0.95                 |
| Tipe Logam Rotor                  | Steel_1010           |
| Tipe Magnet                       | NdFe35               |
| Panjang Magnet (mm)               | 54.75                |
| Ketebalan Magnet (mm)             | 4                    |

## **BAB 3**

### **DESAIN DAN IMPLEMENTASI MOTOR BLDC**

#### **3.1 Desain Umum Motor *Axial Flux* BLDC dengan Magnet Permanen**

Pada tugas akhir ini akan dilakukan pembuatan *prototype* motor *axial flux* BLDC 5 kW. Proses pembuatan *prototype* ini dimulai dengan menentukan data desain elektrik dan desain mekanik yang dibutuhkan. Adapun dalam desain elektriknya antara lain penentuan kebutuhan arus, tegangan terminal motor, besar diameter kawat tembaga dan daya keluaran motor listrik. Sedangkan desain mekaniknya antara lain menentukan ukuran inti stator (*core*), ukuran rotor, ukuran *shaft*, dan ukuran *case* stator motor yang akan diaplikasikan sesuai kebutuhan desain elektrik dalam pengimplementasian motor *axial flux* BLDC ini.

Berdasarkan desain dan simulasi yang sudah ditentukan sebelumnya, maka secara umum spesifikasi *prototype* motor *axial flux* BLDC ini adalah sebagai berikut:

- Daya : 5000 Watt
- Kecepatan : 5000 Rpm
- Tegangan : 96 Volt
- Jumlah fasa : 3
- Faktor Daya : 0.866
- Efisiensi (Estimasi) : 90 %

##### **3.1.1 Perhitungan Kebutuhan Arus**

Kenaikan daya keluaran suatu motor tentu diikuti oleh kenaikan kebutuhan arus dengan asumsi tegangan tetap konstan. Berdasarkan tabel 3.1 kombinasi slot dan pole [1] dapat ditentukan estimasi nilai faktor daya ( $\cos\theta$ ) dengan 12 slot dan 8 *pole* yaitu sebesar 0.866

**Tabel 3.1** Kombinasi Slot dan Pole [2]

| Slot<br> Pole | 2     | 4     | 6     | 8            | 10    | 12    | 14    |
|---------------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|-------|
| 3             | 0.866 | 0.866 |       | 0.866        | 0.866 |       | 0.866 |
| 6             |       | 0.866 |       | 0.866        | 0.866 |       | 0.866 |
| 9             |       |       | 0.866 | 0.945        | 0.945 | 0.866 | 0.945 |
| 12            |       |       |       | <b>0.866</b> | 0.966 |       | 0.966 |
| 15            |       |       |       |              | 0.866 |       | 0.866 |
| 18            |       |       |       |              |       | 0.866 | 0.945 |

Berdasarkan tabel 3.1 didapat nilai faktor daya sebesar 0.866 dengan estimasi efisiensi sebesar 0.9 maka didapatkan perhitungan kebutuhan arus, yaitu sebagai berikut

$$I = \frac{P}{V_{x\text{ eff}} \times PF} \quad (3.1)$$

$$I = \frac{5000}{100 \times 0,90 \times 0,866} = 64.15 \text{ A}$$

Dengan menggunakan belitan stator 4 kutub maka dengan kebutuhan arus sebesar 64.15 A dapat diperkirakan besar ukuran kawat tembaga yang dibutuhkan. Berdasarkan tabel ukuran kawat tembaga *American Gauge Wire* (AWG) maka didapatkan ukuran kawat tembaga dengan diameter 3.26 mm atau setara AWG 8 yang nilainya sudah dilebihkan dari perhitungan yaitu penambahan faktor keselamatan sebesar 15 %.

Setelah menentukan ukuran kawat tembaga, maka selanjutnya bisa ditentukan jumlah lilitan dalam slot sesuai dengan perbandingan luas slot *core* yang tersedia pada tabel 3.2

**Tabel 3.2** Perbandingan Luas Penampang dengan Jumlah Lilitan

| Jumlah<br><i>Strands</i> | Luas<br>Penampang mm <sup>2</sup> | Maksimal<br>lilitan per slot | AWG<br><i>Gauge</i> |
|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---------------------|
| 1                        | 8,36                              | 48                           | 8                   |
| 4                        | 2,09                              | 48                           | 14                  |
| 8                        | 1,045                             | 48                           | 17                  |
| 16                       | 0,5225                            | 48                           | 20                  |

Berdasarkan Tabel 3.2, apabila ukuran *slot type* yang berukuran 30 mm x 14 mm maka luas maksimal *slot type* sebesar 410 mm<sup>2</sup>. Selain itu, dengan faktor *constraint* pada *slot type* maka dipilih jumlah *strands* bernilai 16 untuk AWG 20 dengan maksimal lilitan perslot yaitu 48 lilitan.

### 3.1.2 Perhitungan *Loading Value*

Perhitungan *loading value* pada motor *axial flux* BLDC dapat dicari dengan persamaan berikut:

$$q_i = \frac{3 N_{ph} I_{rms}}{\pi D_i} \quad (3.2)$$

$$q_i = \frac{3 (48)(60,8)}{(3,14) (1,15 \times 10^{-3})}$$

$$q_i = \frac{2188,8}{3,61 \times 10^{-3}}$$

$$q_i = 2425,26 \text{ KA turn/m}$$

$q_i$  : *loading value*

$N_{ph}$  : jumlah lilitan di tiap fasa

$I_{rms}$  : arus yang mengalir pada setiap belitan

$D_i$  : adalah diameter kawat konduktor

### 3.1.3 Perhitungan Diameter *Core Stator*

Untuk memperoleh desain motor yang efektif berdasarkan nilai *pole* yang telah ditentukan. Sehingga dapat ditentukan perbandingan antara diameter dalam ( $D_s$ ) dengan diameter luar ( $D_{se}$ ) dari *core* yaitu dengan nilai  $K_d$  optimum sebesar 0,48 [5]. Disamping itu untuk menentukan  $D_{se}$  maupun  $D_s$ , salah satunya harus dibuat *constraint*. Untuk hal ini dipilih diameter dalam yang dibuat *constraint* dengan ukuran diameter 80 mm. Nilai  $K_d$  optimum dapat dilihat pada Tabel 3.3

**Tabel 3.3** Karakteristik *Axial Flux* Magnet Permanen Berdasarkan Jumlah *Pole*

| Jumlah <i>Pole</i> | Kerapatan Daya (kW/m <sup>3</sup> ) | Kerapatan Torsi (Nm/Kg) | Berat (Kg) | Kd Optimum (D <sub>s</sub> /D <sub>se</sub> ) |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------|---|
| 2                  | 72.3                                | 0.383                   | 3.14       | 0.3   |
| 4                  | 111.3                               | 0.577                   | 2.1        | 0.4   |
| 6                  | 134.2                               | 0.705                   | 1.7        | 0.46  |
| 8                  | 148.7                               | 0.776                   | 1.55       | 0.48  |
| 10                 | 158.5                               | 0.832                   | 1.44       | 0.5   |
| 12                 | 165.2                               | 0.867                   | 1.38       | 0.51  |

Dari persamaan Kd dari diperoleh nilai parameter:

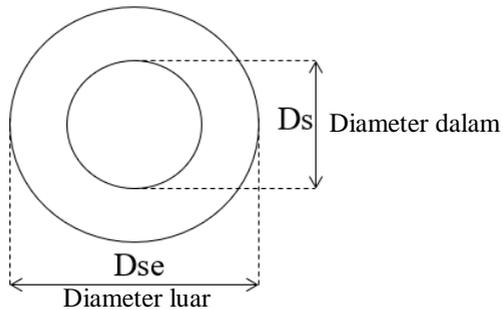
$$K_d = \frac{D_s}{D_{se}} \quad (3.3)$$

$$K_d = 0,48$$

$$D_{se} = 80 : 0,48 = 152 \text{ mm}$$

Maka didapat parameter berikut

- $R_{in}$  (jari-jari dalam) =  $0,5 \times 80 = 40 \text{ mm}$
- $R_{out}$  (jari-jari luar) =  $0,5 \times 152 = 76 \text{ mm}$
- Lebar *core* =  $76 - 40 = 36 \text{ mm}$



**Gambar 3.1** Perbandingan diameter luar dan dalam *core* stator

### 3.1.4 Perhitungan Nilai Torsi

Penentuan nilai torsi dapat dihitung dengan mengestimasi kecepatan berkisar 5000 rpm. Sehingga pada motor 5 kW akan mengalir torsi dengan perhitungan berikut.

$$f = \frac{5000 \text{ rpm}}{60 \text{ detik}}$$

$$f = 83,33 \text{ Hz}$$

Frekuensi sudut yang dihasilkan pada kecepatan 5000 rpm yaitu berkisar 83.33 Hz. Sehingga dapat diketahui kecepatan sudut sebesar pada perhitungan sebesar:

$$w = 2 (3,14)(83,33)$$

$$w = 523,33 \text{ rad/s}$$

Kecepatan sudut didapatkan sebesar 523,33 rad/s sehingga dapat dihitung nilai torsi sebesar

$$T = \frac{P}{w} \quad (3.4)$$

$$T = \frac{5000 \text{ watt}}{523,33 \text{ rad/s}}$$

$$T = 9,55 \text{ Nm}$$

Torsi yang didapatkan dari hasil perhitungan dengan daya motor 5 kW dan kecepatan 5000 rpm ialah sebesar 9,55 Nm.

### 3.1.5 Pemilihan *Airgap*

Dalam penentuan *airgap* atau celah udara perlu memperhatikan besarnya rumah lilitan. Sehingga didapatkan hasil *airgap* yang optimal. Berdasarkan penelitian [12] dan [13] bahwa *airgap* 1 mm merupakan nilai kerapatan medan yang lebih tinggi dibandingkan dengan *airgap* yang lebih lebar dalam kondisi desain yang sama.

## 3.2 Data Desain Motor *Axial Flux Brushless DC Motor*

Dalam pembuatan motor *axial flux* BLDC ini diperlukan beberapa data desain yang digunakan sebagai parameter untuk mencetak beberapa komponen dan bahan-bahan yang diperlukan.

Adapun desain parameter meliputi parameter stator, rotor dan shaft. Berikut adalah beberapa data parameter yang diperlukan antara lain:

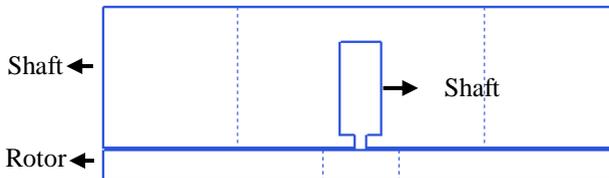
### 3.2.1 Desain parameter mesin motor axial flux BLDC

Adapun pemodelan ini berdasarkan data hasil permodelan pada perangkat lunak Ansys Maxwell sebagai berikut:

**Tabel 3.4** Parameter mesin BLDC

| Nama                | Nilai                      | Satuan | Keterangan |
|---------------------|----------------------------|--------|------------|
| Jenis Sumber        | DC                         |        |            |
| Struktur            | <i>Axial-Flux</i><br>Rotor |        |            |
| Tipe Stator         | <i>Axial</i> AC            |        |            |
| Tipe Rotor          | <i>Axial</i> PM            |        |            |
| <i>Double-Sided</i> | Tidak                      |        |            |
| Panjang Air-gap     | 1                          | mm     | 1 mm       |

Dari tabel 3.4 diatas menunjukkan spesifikasi motor *axial flux* BLDC berupa masukan daya tegangan DC, bentuk stator rotor dan jarak *air gap* 1 mm antara stator dan rotor dengan desain penampang motor seperti pada gambar 3.2 dibawah



**Gambar 3.2** Desain konstruksi motor

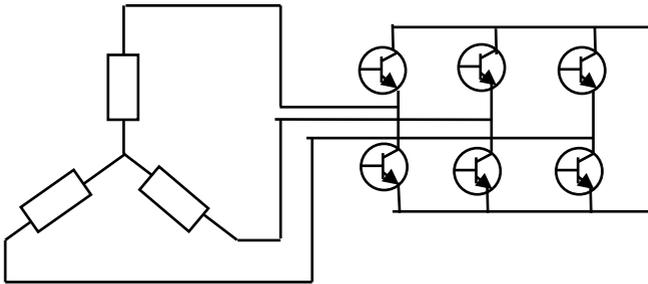
### 3.2.2 Desain Parameter Stator

Perancangan motor *axial flux* BLDC ini dimulai dari parameter pada bagian stator motor. Adapun berikut adalah parameternya:

**Tabel 3.5** Parameter stator motor BLDC

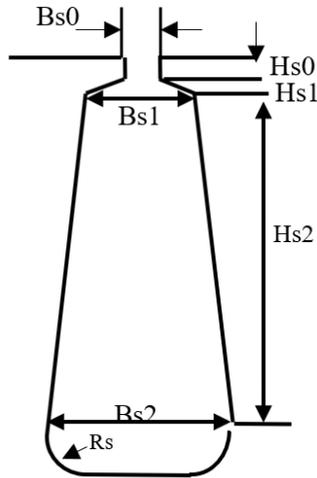
| Nama           | Nilai |
|----------------|-------|
| Jumlah Kutub   | 8     |
| Jumlah Slot    | 12    |
| Tipe Rangkaian | Y3    |
| Tipe Slot      | 3     |

Dari tabel diatas menunjukkan bahwa motor *axial flux* BLDC ini menggunakan 12 slot dan 8 kutub. Adapun bentuk tipe rangkaian ditunjukkan pada gambar 3.3 dibawah ini:



**Gambar 3.3** Tipe rangkaian pada motor *axial flux* BLDC

Pada gambar rangkaian tersebut menggunakan rangkain *we* dan dihubungkan dengan kontroler yang diilustrasikan pada sistem kontrol 6 *switch* (six step commutation). Sedangkan untuk desain slot stator dapat dilihat pada gambar 3.4



**Gambar 3.4** Tipe slot pada motor *axial flux* BLDC

Pada gambar slot tersebut teradapat ukuran mekanik yang dijabarkan sesuai tabel 3.6 dibawah:

**Tabel 3.6** Dimensi slot pada stator

| Nama | Nilai | Unit |
|------|-------|------|
| Hs0  | 4     | mm   |
| Hs1  | 0     | mm   |
| Hs2  | 30    | mm   |
| Bs0  | 4     | mm   |
| Bs1  | 14    | mm   |
| Bs2  | 14    | mm   |
| Rs   | 0     | mm   |

Berdasarkan parameter konstrain yang telah ditentukan seperti daya, torsi dan kecepatan serta sudah menentukan jumlah slot dan kutub maka langkah selanjutnya adalah menentukan parameter mekanik pada stator seperti pada dimensi *core*, ukuran kabel dan kosntruksi *winding*.

### 3.2.2.1 Parameter Inti (Core) Pada Stator

Dalam parameter inti stator ini, bertujuan untuk menentukan dimensi stator seperti dijabarkan pada tabel 3.7. Berikut adalah parameter mekanik mengenai dimensi motor *axial flux* BLDC:

**Tabel 3.7** Dimensi inti stator

| <b>Nama</b>     | <b>Nilai</b> | <b>Unit</b> |
|-----------------|--------------|-------------|
| Diameter Luar   | 152          | Mm          |
| Diameter Dalam  | 80           | Mm          |
| Panjang         | 45           | Mm          |
| Faktor Stacking | 0.95         |             |
| Tipe Logam      | Steel_1010   |             |

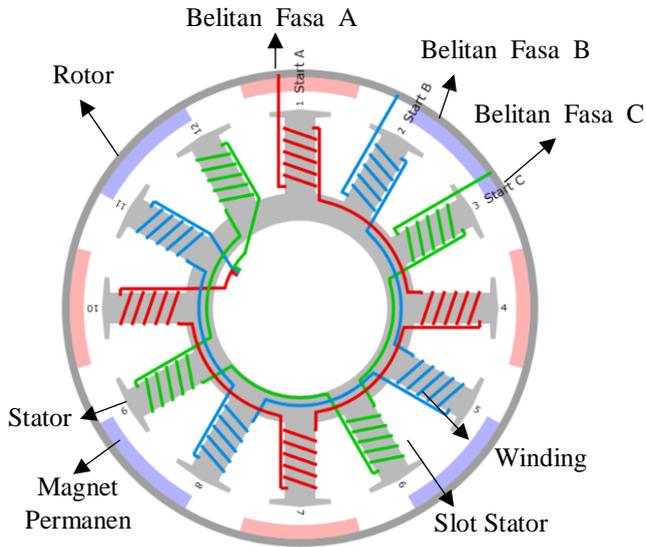
### 3.2.2.2 Parameter Lilitan Pada Stator

Lilitan inti stator menjadi peranan penting karena terkait jumlah arus yang masuk dan medan elektromagnetik yang dibangkitkan. Oleh karena itu diperlukan konfigurasi yang tepat seperti pada tabel 3.8 berikut:

**Tabel 3.8** Konfigurasi lilitan pada stator

| <b>Nama</b>        | <b>Nilai</b>    | <b>Unit</b> |
|--------------------|-----------------|-------------|
| Lapisan Lilitan    | 2               |             |
| Tipe Lilitan       | Terlilit Semua  |             |
| Cabang Pararel     | 4               |             |
| Konduktor Per Slot | 48              |             |
| Lilitan Pitch      | 2               |             |
| Jumlah Strand      | 4               | Mm          |
| Bungkus Kawat      | 0.2             |             |
| Ukuran Kawat       | Diameter: 0.813 | Mm          |
| Tipe Konduktor     | Tembaga         |             |

Dari tabel diatas menunjukkan bahwa *core* motor menggunakan kabel diameter 0.813 mm dengan lilitan *double layer* dan cabang pararel 4 dengan 48 lilitan masing-masing fasa.



**Gambar 3.5** Konfigurasi *winding* pada inti stator

Dalam pembuatan belitan (*winding*) diperlukan tiga kawat tembaga yang dililitkan pada setiap slot pada stator. Adapun urutan belitan seperti ditunjukkan gambar 3.5 diatas.

### 3.2.2.3 Parameter Rangkaian Pada Stator

Stator merupakan bagian dimana medan elektromagnetik dibangkitkan melalui setiap fasanya yang terhubung langsung dengan kontroler. Oleh karena itu diperlukan pengaturan masukan pada motor seperti pada tabel 3.9 dibawah:

**Tabel 3.9** Rangkaian pada stator

| Nama                  | Nilai | Satuan |
|-----------------------|-------|--------|
| Tipe control          | DC    |        |
| Lead Angle of Trigger | 0     | deg    |
| Lebar pulsa trigger   | 120   | deg    |
| Drop transistor       | 0.7   | V      |
| Drop diode            | 0.7   | V      |

### 3.2.3 Parameter Rotor

Komponen penting lainnya dalam desain motor *axial flux* BLDC ini yaitu parameter rotor. Dimana spesifikasi rotor menggunakan besi (steel) seperti pada tabel 3.10

**Tabel 3.10** Spesifikasi rotor

| <b>Nama</b>            | <b>Nilai</b> | <b>Unit</b> |
|------------------------|--------------|-------------|
| Diamater Luar          | 152          | Mm          |
| Diameter Dalam         | 25           | Mm          |
| Panjang                | 10           | Mm          |
| Faktor <i>Stacking</i> | 0.95         |             |
| Tipe Logam             | Steel_1010   |             |
| Lebar <i>Skew</i>      | 0.2          | Deg         |

Setelah mengetahui dimensi motor maka selanjutnya menentukan spesifikasi magnet permanen dimana magnet ini memiliki grafik B-H yang telah ditentukan. Magnet permanen yang digunakan merupakan grade N52 dan berbahan Neodymium Ferrit. Spesifikasi lebih detail dijelaskan pada tabel 3.11

**Tabel 3.11** Spesifikasi magnet permanen

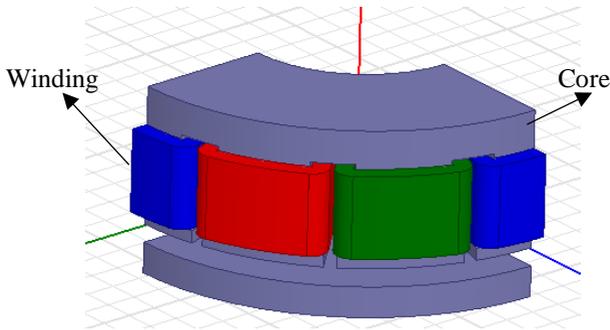
| <b>Nama</b>    | <b>Nilai</b> | <b>Unit</b> |
|----------------|--------------|-------------|
| Embrace        | 0.7          |             |
| Tipe Magnet    | NdFe35       |             |
| Panjang Magnet | 28           | Mm          |
| Tebal Magnet   | 5            | Mm          |

Dalam pememilihan spesifikasi magnet permanen ini menggunakan produk yang sudah beredar di pasaran sehingga mempermudah pada saat proses pembuatan. Setelah menentukan parameter diatas, selanjutnya menentukan spesifikasi *shaft* motor axial flux BLDC seperti pada tabel 3.12

**Tabel 3.12** Spesifikasi magnet permanen

| Nama                | Nilai | Unit |
|---------------------|-------|------|
| Rugi-Rugi Gesek     | 10    | W    |
| Rugi-Rugi Angin     | 10    | W    |
| Referensi Kecepatan | 5000  | rpm  |

Setelah semua parameter di masukkan maka didapatkan hasil analisa mengenai arus, daya, torsi dan efisiensi motor. Dalam analisa tiga dimensi akan menghasilkan pengambungan dari semua komponen-komponen parameter diatas yaitu seperti pada gambar 3.6



**Gambar 3.6** Desain *assembly* motor *axial flux* BLDC menggunakan bantuan perangkat lunak

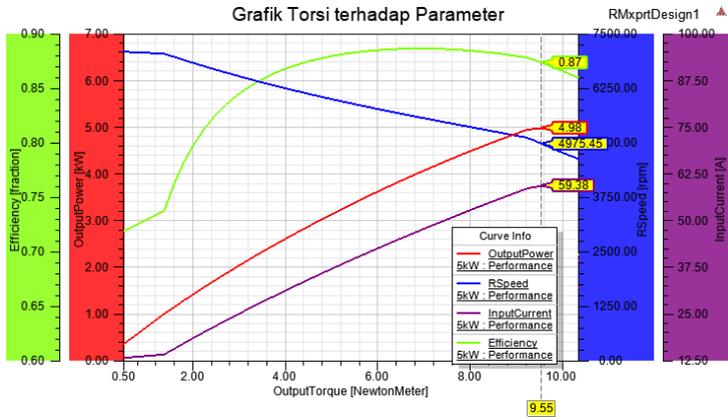
### 3.2.4 Data Simulasi Karakteristik Motor

Karakteristik motor pada saat motor dibebani beban penuh (full load) menghasilkan data seperti dibawah ini

**Tabel 3.13** Hasil simulsi motor pada saat beban penuh

| Nama                 | Nilai    | Unit |
|----------------------|----------|------|
| Arus Input Rata-Rata | 56.960   | A    |
| Total Rugi-Rugi      | 696.441  | W    |
| Daya Output          | 4999.980 | W    |
| Daya Input           | 5696.010 | W    |
| Efisiensi            | 87.64    | %    |
| Kecepatan Rating     | 4795     | rpm  |
| Torsi Rating         | 9.55     | Nm   |

Dari data hasil simulasi tersebut akan menghasilkan beberapa grafik data seperti karakteristik kecepatan dan karakteristik torsi seperti pada gambar 3.7. Dimana dalam simulasi menggunakan perangkat lunak *Ansys Maxwell* didapatkan daya keluaran dan daya masukan serta rugi-rugi pada motor. Motor ini memiliki rating daya 4.98 kW. Rating kecepatan 4795 rpm dan rating torsi 9.55 Nm.

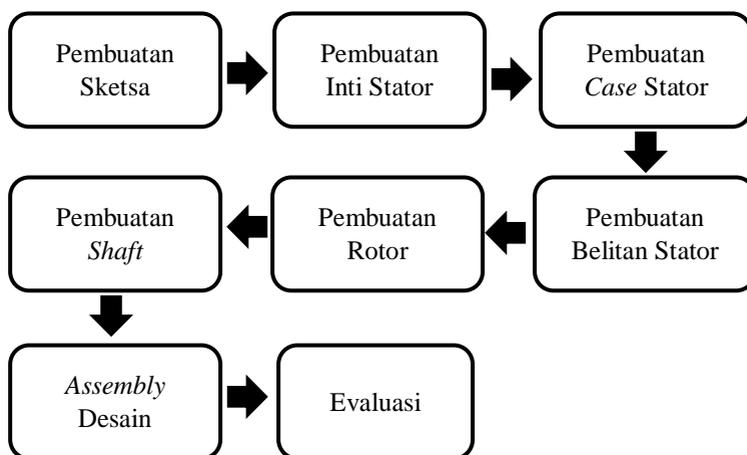


**Gambar 3.7** Kurva karakteristik daya, kecepatan, efisiensi dan arus terhadap pembebanan

Pada grafik diatas terlihat bahwa seiring dengan naiknya pembebanan maka daya keluaran, arus input dan efisiensi mengalami kenaikan. Sedangkan untuk kecepatan motor mengalami penurunan seiring naiknya pembebanan pada motor. Pada nilai efisiensi ini dipengaruhi oleh rugi-rugi daya pada motor seperti *frictional windage loss*, *iron core loss*, *armature copper loss* dan lain sebagainya.

### 3.3 Desain Motor Axial Flux BLDC

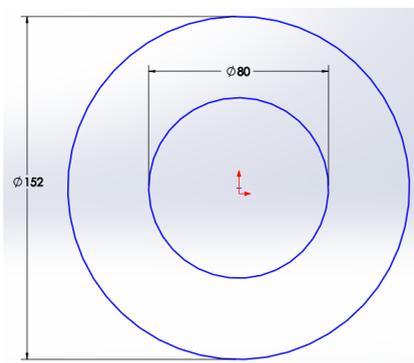
Dalam pemodelan mekanik motor *axial flux* BLDC ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *solidwork*. *Solidwork* sendiri merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk desain 3D CAD (computer aided design) serta mampu menjalankan simulasi mekanik secara *real time*. Pada pembuatan desain model ini dilakukan dalam beberapa tahap model yang harus dikerjakan yaitu seperti pada gambar 3.8



**Gambar 3.8** Sistematika pemodelan mekanik motor *axial flux* BLDC

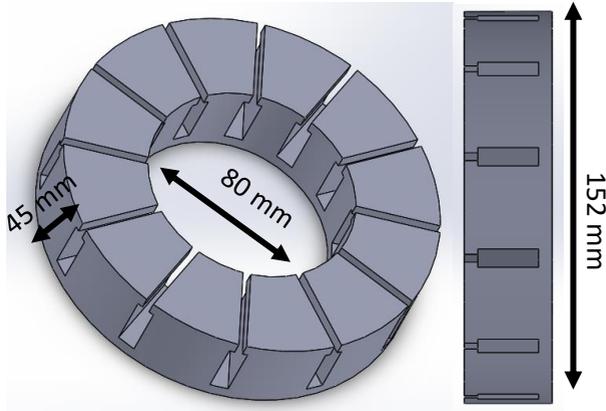
### 3.3.1 Pembuatan Desain Stator

Pada pembuatan desain inti stator (core) ini dimulai dengan *new assembly*. Lalu dalam desain ini dimulai dari *layer* pertama. Pada *layer* pertama dibuat lingkaran dalam dan lingkaran luar lalu dibagi menjadi 12 slot. Setelah itu maka akan terbentuk dasar desain seperti pada gambar 3.9 dibawah



**Gambar 3.9** Sketsa layer dasar desain stator

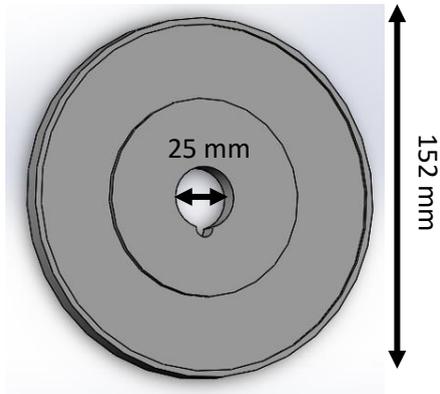
Setelah desain dasar dibuat lalu dilakukan *extrude* untuk menghasilkan tebal tertentu. Pada *layer* pertama sudah selesai lalu dilanjutkan pada *layer* kedua untuk membuat slot tempat dimana belitan kawat akan dililitkan. Terakhir pada *layer* ketiga yaitu penutup belitan sehingga belitan tidak keluar dan terpasang dengan kuat. Hasil ketiga *layer* tersebut terlihat pada gambar 3.10 dibawah



**Gambar 3.10** Desain 3D inti stator (core)

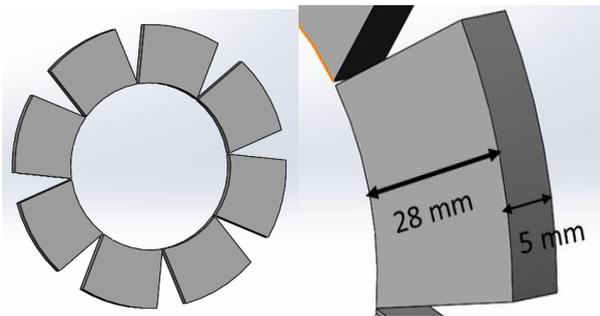
### 3.3.2 Pembuatan Desain Rotor

Dalam mendesain rotor ini yaitu harus menentukan diameter luar dan diameter dalam rotor terlebih dahulu. Namun pada awal desain ini harus membuat *plate* dasar lalu di *extrude* sesuai ketebalan yang ditentukan pada *layer* pertama. Pada *layer* kedua yaitu mendesain bantalan batas antar permanen magnet sesuai jumlah magnet permanen yang dipakai. Adapun desain dari rotor ini sesuai gambar 3.11



**Gambar 3.11** Desain rotor pada motor BLDC

Untuk desain tempat peletakan permanen magnet ini juga disesuaikan dengan ukuran dan tebal setiap magnet permanen. Ukuran magnet permanen ini memiliki ketebalan 5 mm, panjang 28 mm dan memiliki sudut putar 30 derajat. Untuk desain magnet permanen sendiri dapat dilihat pada gambar gambar 3.12

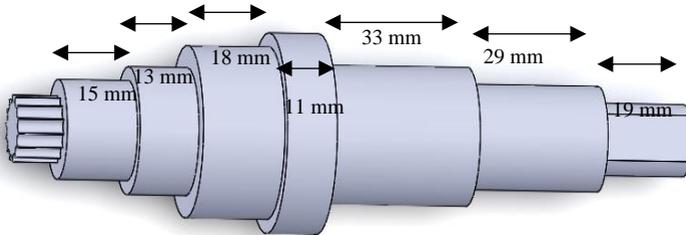


**Gambar 3.12** Desain 3 dimensi pada magnet permanen

Pada desain magnet permanen ini menunjukkan ada 8 buah magnet yang akan dipasang pada sisi dalam rotor.

### 3.3.3 Pembuatan Desain *Shaft* Rotor

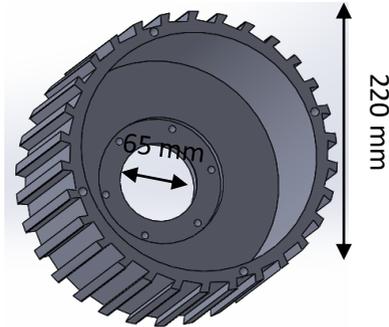
Setelah proses pembuatan dan desain rotor serta desain pemasangan magnet permanen, maka diperlukan *shaft* yang berfungsi untuk menyambung putaran mekanik pada rotor dengan *shaft* diluar motor. Dalam mendesain *shaft rotor* ini harus memperhatikan sekali mengenai komponen-komponen pendukung seperti *bearing* dan pengunci *shaft*. Dalam mendesain *shaft* juga harus mengetahui konstruksi sisi dalam rotor dan sisi luar rotor. Karena pada sisi dalam rotor hanya digunakan sebagai penyangga sedangkan sisi luar *shaft* rotor akan berhubungan secara langsung peralatan mekanik seperti *gear box* transmisi mekaik.



**Gambar 3.13** Desain pada shaft rotor

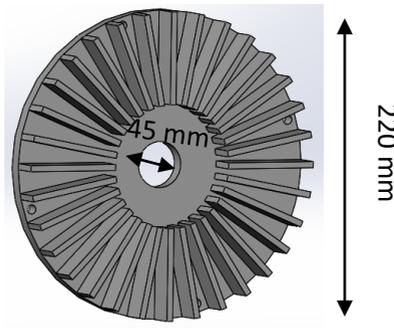
### 3.3.4 Pembuatan Desain *Case Stator* dan *Cover*

Pada saat komponen utama pada motor *axial flux* BLDC ini sudah didesain maka selanjutnya adalah mendesain tempat rumah bagi motor yaitu desain *case stator*.



**Gambar 3.14** Desain 3 dimensi pada *case* Motor

Dalam desain *case* motor ini menggunakan sirip pada sisi luar dengan tujuan untuk mengurangi panas pada motor. Sirip ini didesain dengan arah yang sama dengan *shaft* motor. Setelah mendesain *case* motor lalu dibuatlah penutup (cover) pada *case* stator. Dimana selain menggunakan desain sirip pada *case* nya untuk sistem pendingin, pada penutup motor ini juga dipasang kipas sebagai pendingin utamanya .

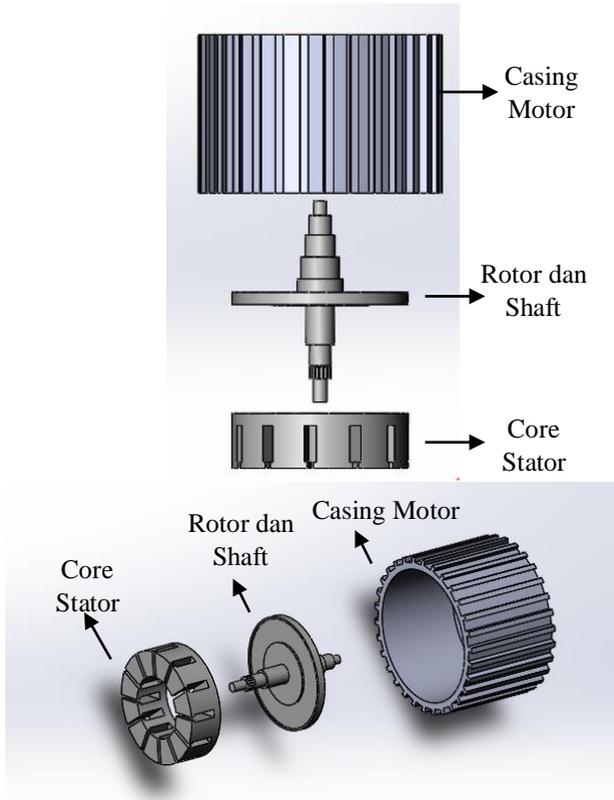


**Gambar 3.15** Desain penutup *case* stator

### 3.3.5 Penggabungan Komponen Desain Pada Motor

Setelah semua desain dibuat maka langkah terakhir yaitu menggabungkan (assembly) semua bagian desain menjadi satu. Dalam pembuatan desain ini juga harus memperhatikan sisi *core*

stator yaitu jarak aman antara *cover* dengan *core* setelah dililit kawat tembaga. Hal ini tampak pada gambar 3.16 dibawah



**Gambar 3.16** Hasil *Assembly* semua komponen motor

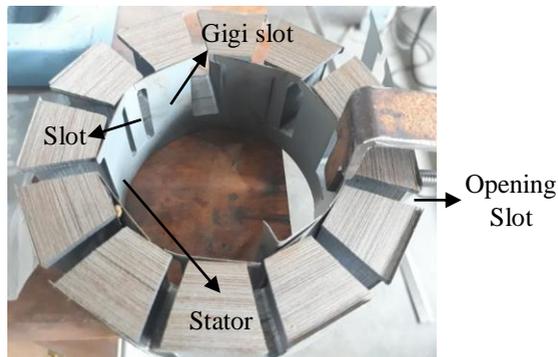
### **3.4 Pembuatan Motor *Axial Flux* Permanen Magnet**

Proses pembuatan motor *axial flux* BLDC ini dimulai dengan mencetak inti stator, lilitan tembaga pada stator, pemasangan *hall sensor effect* pada stator, pembuatan rotor, pemasangan magnet permanen NdFe35, pembuatan *case* stator dan proses penggabungan

masing-masing komponen (assembling). Adapun pembuatan motor *axial flux* BLDC ini secara spesifik dijelaskan seperti berikut:

### 3.4.1 Pembuatan stator

Pada pembuatan stator ini menggunakan bahan besi lembar panjang dengan bahan *Silicon Steel 35W350* yang digulung pada *rolling* dengan ukuran ketebalan 0.22 mm dan lebar 45 mm. Diameter dalam stator yaitu 80 mm dan diameter luar stator 152 mm, sehingga terdapat 328 laminasi pada inti statornya. Pada inti stator ini menggunakan alat *winding and stamping machine with no index* dengan tipe slot tertentu. Hal-hal penting yang harus diperhatikan saat mencetak *core* yaitu memastikan bahwa setiap kali menggulung, hasil cetakan harus menempel pada posisi yang benar dengan cara menggeser posisinya dengan palu. Karena jika hal ini tidak dilakukan maka *core* tersebut akan cacat dan tidak bisa digunakan selanjutnya. Berikut ini adalah hasil pencetakan yang berhasil seperti ditunjukkan pada gambar 3.17

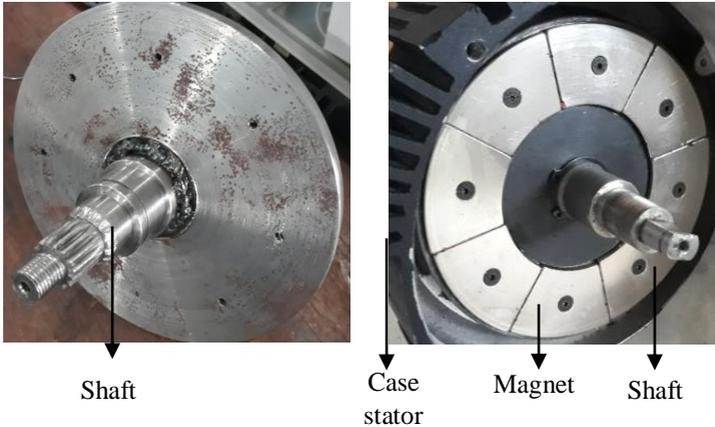


**Gambar 3.17** Hasil pencetakan stator

### 3.4.2 Pembuatan rotor

Dalam pembuatan rotor ini terdiri dari 2 langkah, yaitu pembuatan piringan rotor tempat magnet permanen dan *shaft* rotor. Bahan material rotor ini memakai besi lunak dan untuk *shaft* rotor berbahan baku *stainless steel*. Ukuran diameter dalam rotor yaitu 25 mm dan diameter luarnya 152 mm. Pada jarak 2 mm dari diameter luar

dibuat cekungan untuk memasang magnet permanen pada bagian piringannya. Untuk menggabungkan dua bagian antara piringan permanen magnet dengan shaft diperlukan teknik pengelesan yang presisi dan akurat, dengan tujuan supaya nantinya motor akan berputar sesuai porosnya dan membuat motor aman untuk dioperasikan.



**Gambar 3.18** Hasil pencetakan rotor

### 3.4.3 Pembuatan *Case Stator*

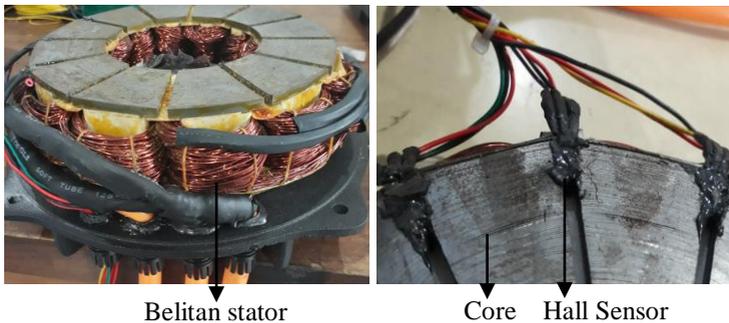
Pada pembuatan *case stator* ini menggunakan bahan aluminium seri 7 untuk menghasilkan material yang ringan namun tetap kokoh. Pada pencetakannya dibuat sirip pada sisi luarnya dengan tujuan untuk mengurangi panas pada motor (*heat removal system*).



**Gambar 3.19** Hasil pencetakan *case stator*

### 3.4.4 Proses *Winding* Pada Inti Stator dan Pemasangan Sensor

Aturan dalam melukan belitan inti stator ini mengikut aturan konfigurasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.5. *Winding* pada *core* ini menggunakan sistem *double layer* sehingga menghasilkan belitan stator yang cukup rapat. Sebelum digulung, inti stator dibungkus dengan kertas nomek dengan tujuan untuk melindungi kawat tembaga terluka dari goresan tajam pada sisi inti stator. *Winding core* ini menggunakan kabel berstandar AWG 8 (American Wire Gauge) yaitu dengan diameter 0.8 atau luas 0.5 mm<sup>2</sup> dengan jumlah paralel 16 kawat tembaga dan putaran tiap slot nya yaitu 8 *turn*. Adapun bahan belitan ini berstandar EIC Insulation Class F (180 C). Sedangkan untuk kabel *power* memakai kabel 25 mm<sup>2</sup>. Pada *winding* ini sisi input motor disambung dengan kabel *power* ekstensi dengan tujuan untuk memudahkan instalasi nantinya. Sedangkan pada sisi *output winding* motor di *short* kan sehingga menjadi motor konfigurasi *wye*. Adapun hasil dari belitan pada inti stator ini ditunjukkan pada gambar 3.20 dibawah ini



**Gambar 3.20** Hasil belitan pada stator dan pemasangan sensor

Setelah inti stator dibelit, langkah selanjutnya yaitu memasang sensor hall yang sebelumnya sudah di *wiring* pada celah slot stator yang dilem agar kuat menempel.

### 3.4.5 Penggabungan Komponen Motor *Axial Flux* BLDC

Langkah terakhir setelah semua komponen telah dicetak adalah melakukan penggabungan komponen stator yang telah di *winding*, rotor yang telah terpasang magnet permanen dan *shaft* serta diakhiri dengan ditutup menggunakan *case* motor. Adapun hasil *assembling* ditunjukkan seperti pada gambar 3.21



**Gambar 3.21** Hasil *assembly* komponen motor

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 4**

### **HASIL DAN ANALISA DATA PENGUJIAN MOTOR BLDC**

Dalam pengujian motor listrik ini dilakukan dalam dua tahap pengujian. Pengujian pertama yaitu pengujian komponen motor untuk memastikan bahwa setiap bagian motor mampu bekerja sesuai fungsinya dan sesuai harapan. Sedangkan pada pengujian kedua yaitu pengujian performa motor saat *on-line* yang terdiri pengujian tanpa pembebanan (no load test) dan pengujian dengan pembebanan (load test).

#### **4.1 Pengujian Komponen Motor**

Pada pengujian komponen motor ini terdiri dari pengujian isolasi *winding*, dengan tujuan untuk memastikan bahwa arus yang mengalir pada kumparan tidak bocor. Kemudian pengujian medan elektromagnetik pada magnet permanen yaitu untuk menentukan urutan atau kutub magnet. Sedangkan pengujian terakhir pada sensor hall efek dengan tujuan untuk menentukan posisi urutan fasa melalui tegangan yang dibangkitkan magnet permanen sehingga dalam *wiring* dari kontroler ini sudah sesuai dengan urutan fasanya.

##### **4.1.1 Pengujian Isolasi *Winding***

Pengujian ketahanan isolasi pada kumparan stator menggunakan alat megger yang berfungsi untuk mengetahui besaran tahanan antara kumparan dengan inti (core) dan antara kumparan satu dengan lainnya. Adapun pengujian megger ini dilakukan dengan cara menginjeksi arus kedalam kumparan lalu arus akan menuju sisi negatif probe megger dengan tegangan 500 V, sehingga dari arus ini akan terukur besar tahanannya dengan durasi pengujian selama 30 detik.



**Gambar 4.1** Pengujian isolasi menggunakan *megger*

Adapun hasil pengukuran megger ini bisa dilihat dari tabel 4.1 yang menunjukkan pengukuran megger antara fasa dan *ground* serta antara fasa itu sendiri.

**Tabel 4.1** Pengujian Isolasi Pada Kumpanan Stator

| No | Fasa              | Nilai Resistansi |
|----|-------------------|------------------|
| 1  | Fasa A – Ground   | 1.04 GΩ          |
| 2  | Fasa B – Ground   | 1.42 GΩ          |
| 3  | Fasa C – Ground   | 3.53 GΩ          |
| 4  | Fasa A- Fasa B    | 4.1 GΩ           |
| 5  | Fasa B - Fasa C   | 5.4 GΩ           |
| 6  | Fasa A - Fasa C   | 5.6 GΩ           |
| 7  | Fasa ABC – Ground | 1.14Ω            |

Dari tabel pengujian tersebut menunjukkan bahwa berdasarkan standar IEEE 43-2000 bahwa motor dengan tegangan terminal dibawah 1 kV nilai minimum isolasi resistansi yaitu sebesar 100 MΩ, sehingga dari pengujian isolasi tersebut menunjukkan bahwa isolasi *winding* sudah memenuhi standar pengujian.

#### 4.1.2 Pengujian Medan Elektromagnetik Magnet Permanen

Pengujian medan elektromagnetik ini dilakukan dengan menggunakan alat gauss meter, dimana alat ini mampu memungkur besar medan dari permanen magnet yang akan digunakan sebagai motor listrik. Pada pengukuran yang terlihat pada gambar 4.2, pengukuran dilakukan pada titik yang memiliki medan elektromagnetik pada magnet permanen yang bervariasi di setiap sisinya. Hasil pengukuran ini dapat dilihat pada tabel 4.2



**Gambar 4.2** Pengujian medan elektromagnetik magnet menggunakan gauss meter

**Tabel 4.2** Pengujian Medan Elektromagnetik Pada Magnet Permanen

| Magnet ke | Kutub | Besar Medan (Gauss) |
|-----------|-------|---------------------|
| 1         | U     | 3968                |
| 2         | S     | -3964               |
| 3         | U     | 3604                |
| 4         | S     | -3772               |
| 5         | U     | 3544                |
| 6         | S     | -4247               |
| 7         | U     | 3209                |
| 8         | S     | -4258               |

Dari tabel pengukuran magnet terlihat bahwa terdapat nilai positif dan nilai negatif dengan tujuan untuk mengetahui arah kutub magnet tersebut baik itu utara atau selatan.

#### 4.1.3 Pengujian Urutan Fasa dan Sinyal Sensor Hall

Pengujian *hall sensor* dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui apakah sensor hall SS360 ini berfungsi dengan baik. Adapun pengujian sinyal *hall sensor* juga untuk menentukan posisi fasa U, fasa V dan fasa W karena untuk memastikan urutan fasa tidak terbalik dan motor bisa berputar. Dalam pengujian ini menggunakan alat picoscope dimana alat ini dihubungkan dengan tiga kabel *power* secara acak dengan diinjeksi tegangan tertentu. Adapun hasil pengujian *hall sensor* ini yaitu sebagai berikut:

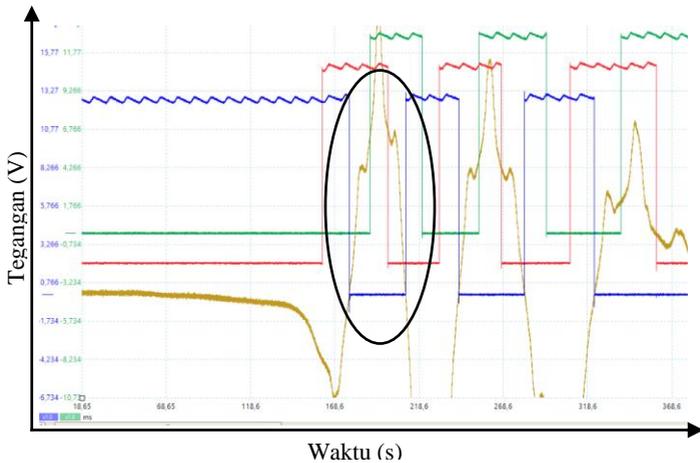


**Gambar 4.3** Pengujian sinyal hall sensor menggunakan *picoscope*

Dalam pengujian urutan fasa ini menganut pada apa yang telah didefinisikan pada kontroler. Adapun definisi urutan fasa tersebut adalah sebagai berikut:

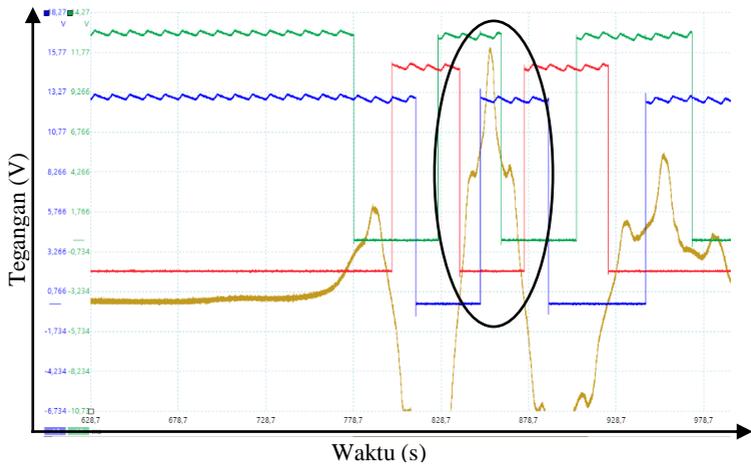
**Tabel 4.3** Konfigurasi urutan fasa

| Warna | Positif (+) | Negatif (-) |
|-------|-------------|-------------|
| Biru  | Fasa U      | Fasa W      |
| Merah | Fasa V      | Fasa U      |
| Hijau | Fasa W      | Fasa V      |



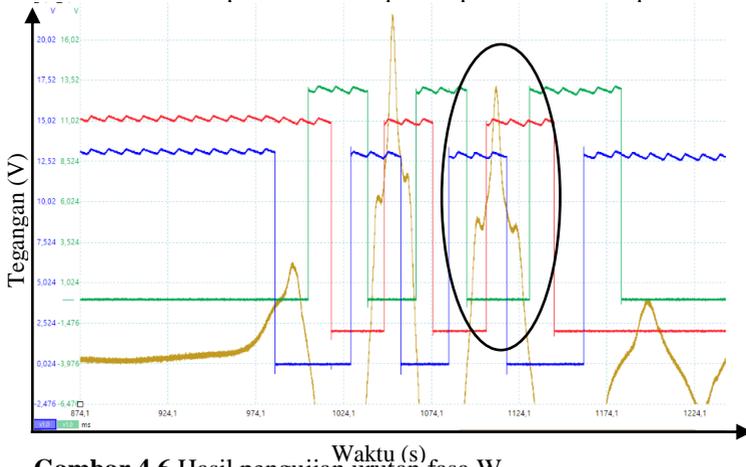
**Gambar 4.4** Hasil pengujian urutan fasa U

Dari gambar diketahui bahwa terdapat tiga gambar sinyal yang mewakili fasa U, fasa V dan fasa W dengan hasil data *logger* dari pengujian ini. Dari sinyal referensi berupa tegangan back EMF yang ditunjukkan oleh sinyal referensi (warna coklat) terlihat sinyal warna biru yang muncul secara berlawanan sehingga dari tabel 4.3 dapat disimpulkan bahwa probe positif pada picoscope merupakan fasa U



**Gambar 4.5** Hasil pengujian urutan fasa V

Serupa dengan urutan fasa U, pada gambar 4.3 terlihat bawah sinyal referensi muncul secara berlawanan dengan sinyal merah sehingga dari tabel 4.3 dapat diketahui probe positif terletak pada fasa V



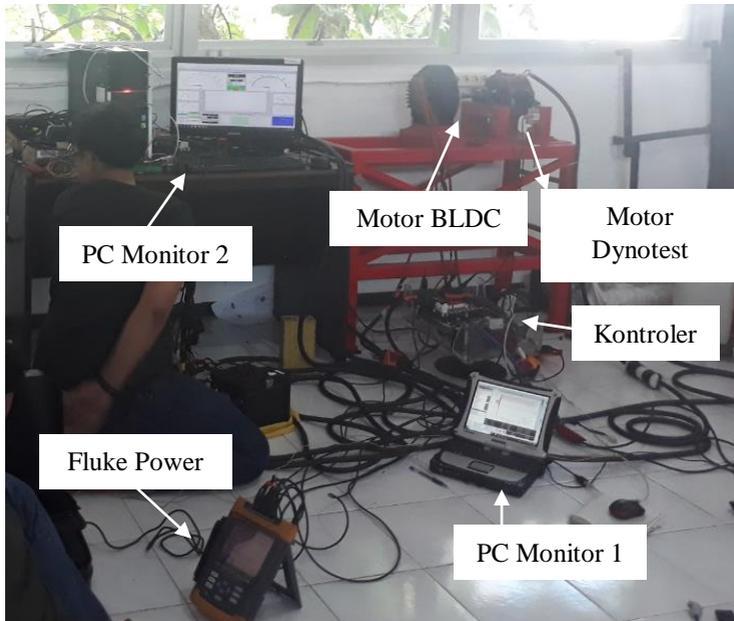
**Gambar 4.6** Hasil pengujian urutan fasa W

Dari sinyal referensi muncul sinyal secara berlawanan dengan sinyal warna hijau yang berarti bisa dipastikan urutan fasa pada ujung probe positif picoscope tersebut merupakan urutan fasa W.

## 4.2 Pengujian Performa Motor *Axial Flux* BLDC

Dalam pengujian motor axial flux BLDC ini yaitu dengan menggunakan dua buah alat uji dan satu alat ukur. Alat uji yang pertama adalah BLDC tool yang digunakan untuk mengetahui arus dan tegangan secara *real time* pada sisi *input controller*. Sedangkan alat uji kedua adalah *dynotest pack* dimana alat ini digunakan untuk mengetahui kecepatan, daya dan torsi keluaran dari shaft motor yang dipararel dengan motor dynotes. Adapun dalam pengujian motor BLDC ini menggunakan dua kondisi, yaitu pada saat tanpa diberi pembebanan (*no load test*) dan saat diberi pembebanan (*load test*).

Pada pengujian ini disiapkan baterai *pack* tegangan *ouput* 96 V yang sudah di *charge* sampai penuh, lalu menyiapkan kontroler sesuai *wiring* nya. Dari sisi keluaran kontroler melalui kabel yang dihubungkan dengan urutan fasa U, V dan W disesuaikan dengan motor BLDC. Namun sebelum *wiring* baterai dan kontroler sudah tersambung, motor BLDC yang terkopel dengan motor dynotest sudah dipasang pada meja pengujian sehingga memudahkan proses pengujian. Setelah semua peralatan terhubung, maka dipasang *monitoring* untuk kontroler, motor BLDC dan motor dynotest yaitu dengan memasang PC Interface BLDC tool, alat ukur *fluke power analyzer* dan PC Interface Dynotest. Disisi lain kontroler akan dimonitor berapa nilai tegangan baterai, arus baterai, arus motor, persentase *duty cycle*, erpm dan suhu pada motor. Sedangkan dari alat ukur *fluke power analyzer* didapatkan nilai arus motor, tegangan motor, daya input motor, dan faktor daya. Terakhir dari monitoring dynotest didapatkan nilai daya keluaran motor, torsi, dan kecepatan motor.



a)

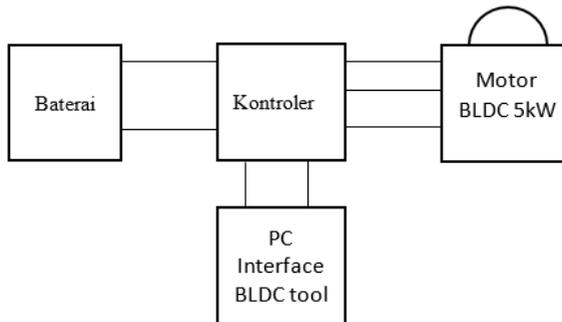


b)

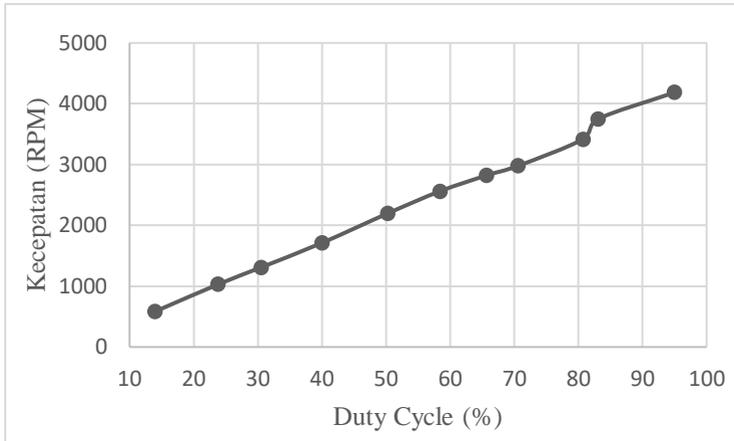
**Gambar 4.7** a) Skema pengujian motor b) Monitoring pengujian motor menggunakan PC

#### 4.2.1 Pengujian motor BLDC tanpa pembebanan

Dalam pengujian ini yaitu dengan memasang motor tanpa menggunakan beban torsi mekanik. Pada grafik dibawah ini menunjukkan bahwa peralatan komponen pendukung pada pengaturan kecepatan motor *axial flux* BLDC berjalan dengan baik. Hal ini ditunjukkan dari fungsi *throttle* yang mana kecepatan akan meningkat seiring dengan meningkatnya *duty cycle* atau tingkat *throttle* nya. Untuk skema pengujian motor BLDC tanpa pembebanan ini seperti ditunjukkan pada gambar 4.8 dimana motor BLDC ini tidak dibebani dengan beban mekanik. Sedangkan hasil pengujian motor ini berdasarkan grafik 4.9 juga menunjukkan bahwa semakin besar *duty cycle* yang dihasilkan dari *throttle* maka kecepatan motor akan semakin naik. Terlihat juga bahwa *duty cycle* maksimum pada saat posisi 95%, maka kecepatan motor mencapai 4185.5 rpm.

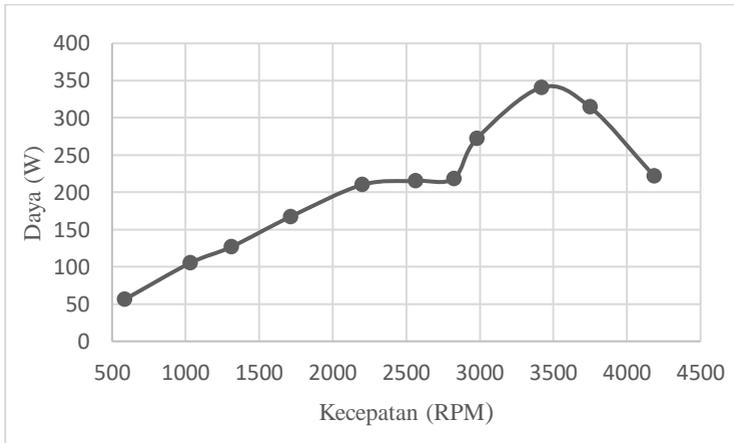


**Gambar 4.8** Skema pengujian motor BLDC tanpa pembebanan



**Gambar 4.9** Grafik *duty cycle* terhadap kecepatan tanpa pembebanan

Pada gambar diatas menunjukan bahwa sistem kontrol motor BLDC berjalan dengan baik dan mampu menunjukan performanya.



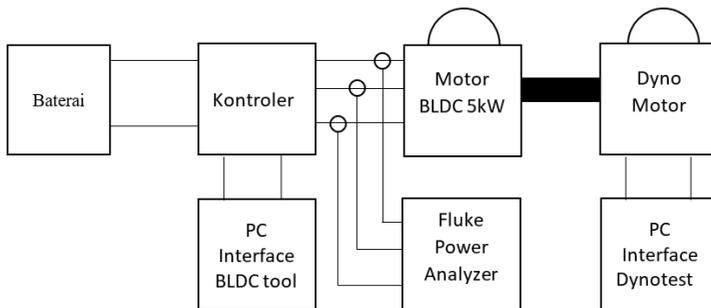
**Gambar 4.10** Grafik kecepatan terhadapap daya tanpa pembebanan

Dalam pengujian tanpa pembebanan ini juga untuk memperlihatkan karakteristik dari kecepatan terhadap daya yang dibutuhkan untuk

mensuplai motor. Adapun dari gambar 4.10 menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan rpm motor maka semakin besar pula daya yang dibutuhkan. Daya maksimum mencapai 340.7Watt pada saat kecepatan 3417 rpm.

#### 4.2.2 Pengujian motor BLDC dengan pembebanan

Dalam pengujian motor BLDC ini dilakukan dengan memberikan beban mekanik pada sisi shaft motor yang dikopel dengan motor uji DC Dynotest. Berikut adalah skema pengujian motor BLDC dengan pembebanan mekanik pada *shaft*:

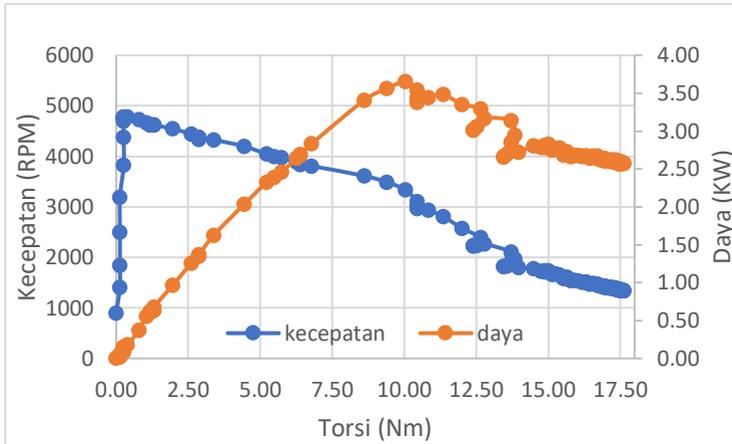


**Gambar 4.11** Skema pengujian motor BLDC dengan pembebanan

Adapun dalam pengujian didapatkan beberapa hasil pengujian seperti dijabarkan dalam sub bab dibawah:

##### 4.2.2.1 Pengujian Kecepatan dan Daya terhadap Pembebanan

Pada pengujian ini motor BLDC dikopel dengan motor dynotest sebagai alat pengukur performa motor, menunjukkan hasil pengujian dalam bentuk kurva karakteristik dari motor BLDC. Grafik kecepatan dan daya terhadap pembebanan ditunjukkan pada gambar 4.11

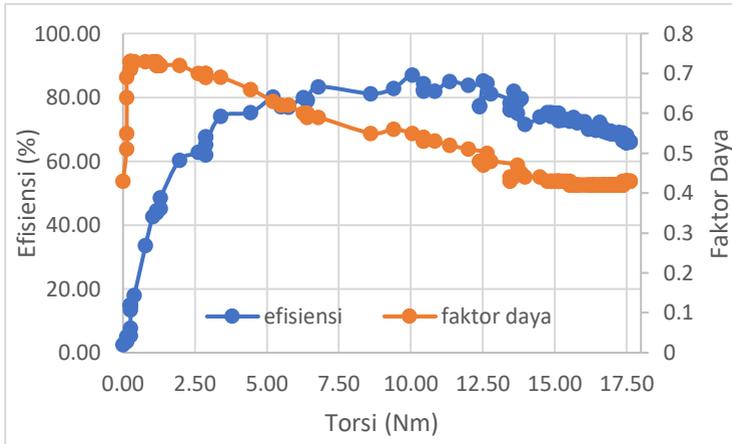


**Gambar 4.12** Grafik torsi terhadap kecepatan dan daya

Karakteristik yang dihasilkan dari pengujian motor BLDC ini menunjukkan bahwa pada saat pembebanan torsi awal 0.26 Nm, kecepatan pada motor mencapai pada titik maksimalnya yaitu pada 4778 rpm. Lalu seiring dengan torsi pembebanan yang dinaikan hingga torsi maksimalnya 17.62 Nm, maka kecepatan rpm motor akan menurun dengan kecepatan 1348 rpm. Sedangkan dari sisi daya keluaran yang dihasilkan pada saat torsi awal 0.13 Nm, nilai daya keluarannya juga masih rendah yaitu 0.02 kW. Lalu saat diberi pembebanan hingga torsi puncaknya, daya keluaran yang dihasilkan mencapai 2.58 kW. Namun motor BLDC ini mampu bekerja hingga mampu mengeluarkan daya maksimalnya 3.66 kW pada saat torsi pembebanan 10.05 Nm.

#### 4.2.2.2 Pengujian Efisiensi terhadap Pembebanan

Pengujian motor BLDC juga menunjukkan kurva karakteristik dasar motor yang menunjukkan efisiensi kerja dari motor BLDC. Karena dalam melakukan pendesainan motor sangat penting untuk memperhatikan aspek efisiensi dalam artian efektifitas dalam semua parameter perancangannya.

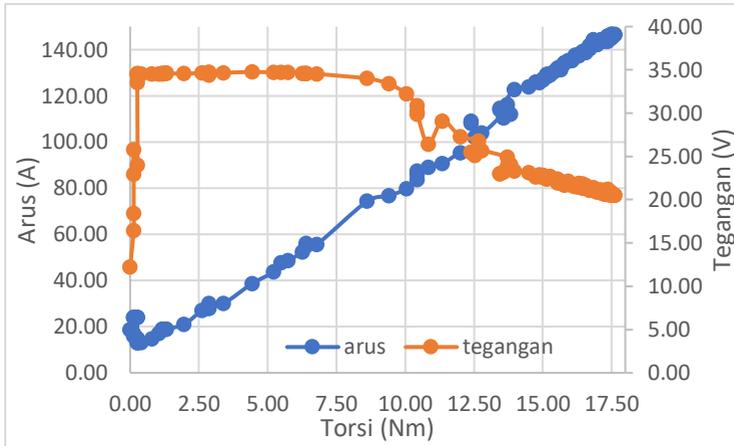


**Gambar 4.13** Grafik torsi terhadap efisiensi dan faktor daya

Dari grafik tersebut menunjukkan bahwa efisiensi kerja motor BLDC mampu mencapai titik maksimum 87.03 % pada saat diberi pembebanan sekitar nilai torsi *rating*-nya 10.05 Nm dan efisiensi maksimalnya juga tercapai pada saat daya keluaran motor pada titik puncaknya di 3.66 kW. Sedangkan disisi lain faktor daya maksimal yang dihasilkan hanya mencapai 0.55 saja. Pada pengujian ini menunjukkan tren pengujian yaitu pembebanan motor yang semakin besar juga diikuti oleh efisiensi yang naik. Namun setelah torsi *rating*-nya terlampaui maka efisiensi motor mengalami penurunan.

#### 4.2.2.3 Pengujian Tegangan dan Arus terhadap Pembebanan

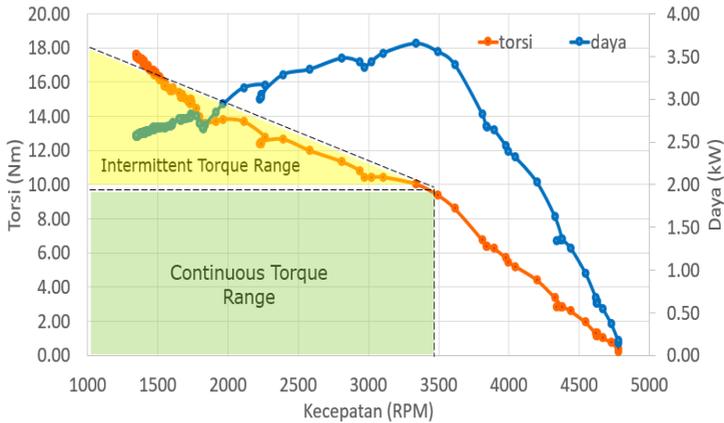
Pengujian motor juga memperlihatkan parameter elektrik seperti tegangan dan arus pada motor. Berdasarkan grafik 4.14 menunjukkan bahwa pada awal pembebanan torsi sebesar 4.44 Nm, maka tegangan pada terminal motor mencapai titik maksimalnya di 34.77 V dengan arusnya mencapai 38.67 A. Namun seiring dengan kenaikan pembebanan maka arus puncak yang dicapai motor BLDC ini mencapai 146.67 A pada saat torsi maksimalnya 17.62 Nm



**Gambar 4.14** Grafik torsi terhadap arus dan tegangan

#### 4.2.2.4 Kurva karakteristik pada motor BLDC

Pada grafik dibawah merupakan kurva karakteristik pada motor BLDC yang diperoleh dari hasil pengujian motor sebelumnya.



**Gambar 4.15** Grafik karakteristik pada motor BLDC

Berdasarkan hasil simulasi bahwa torsi *rating* motor adalah 9.55 Nm. Maka dari torsi *rating* tersebut dijadikan acuan untuk menentukan kecepatan dan daya *rating*. Adapun nilai *rating* yang didapatkan yaitu kecepatan *rating* motor sebesar 3446 rpm dan daya *rating* sebesar 3.61 kW. Pada grafik 4.15 juga menunjukkan bahwa pada zona *continuous torque range* merupakan daerah pembebanan untuk motor yang dioperasikan pada kondisi yang konstan dan terus menerus dengan durasi yang cukup lama, dimana pembebanan tersebut masih dibawah kecepatan dan torsi *rating*-nya. Sedangkan untuk zona *intermittent torque range* merupakan daerah pembebanan untuk yang dioperasikan untuk kondisi tertentu seperti pada saat memelukan torsi *start* yang tinggi, namun pada durasi yang tidak terlalu lama.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Adapun dalam tugas akhir ini terdapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil implementasi motor *axial flux* BLDC ini memiliki spesifikasi konstruksi dan ukuran diameter dalam 80 mm dan diameter luar 152 mm, jumlah slot 12, jumlah kutub 8, dan jumlah *turn* pada *winding* sebanyak 8 *turn* dengan 16 paralel
2. Dari hasil pengujian motor *axial flux* BLDC ini didapatkan daya keluaran motor maksimum 3.66 kW, kecepatan maksimum 4778 rpm dan torsi maksimum 17.62 Nm
3. Dari hasil pengujian motor *axial flux* BLDC ini juga mampu memberikan efisiensi maksimum motor sebesar 87.03 % pada saat torsi 10.05 Nm, kecepatan 3335 rpm dan daya 3.66 kW
4. Hasil pengujian motor *axial flux* BLDC ini mampu beroperasi pada tahanan maksimal 34.5 Volt dan arus maksimal 146.67 A
5. Dari pengujian motor BLDC dengan pembebanan didapatkan karakteristik motor yaitu daya *rating* 3.61 kW, kecepatan *rating* 3446 dan torsi *rating* 9.55 Nm

#### **5.2 Saran**

1. Dalam pengujian performansi motor ini masih terbatas pada performa dasar motor, sehingga belum bisa dilakukan pengujian dengan spesifikasi desain motor dengan berbagai variasi torsi
2. Pembuatan motor ini masih menggunakan faktor konstrain, sehingga hasil desain motor masih belum optimal. Harapannya dalam desain dan implementasi motor kedepannya menggunakan parameter-parameter optimalnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Yilmaz, "Comparison of Axial Flux and Radial Flux Brushless DC Motor Topologies for Control Moment Gyroscope Wheel Application," no. April, 2009.
- [2] J. F. Gieras, R.-J. Wang, and M. J. Kamper, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. 2008.
- [3] D. D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design*, vol. 26, no. 3. 1978.
- [4] C. Cham and Z. Bin Samad, "Brushless DC Motor Electromagnetic Torque Estimation with Single-Phase Brushless DC Motor Electromagnetic Torque Estimation with Single-Phase Current Sensing," no. May, 2014.
- [5] E. Yeşilbag, Y. Ertuğrul, and L. Ergene, "Axial flux PM BLDC motor design methodology and comparison with a radial flux PM BLDC motor," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 25, no. 4, pp. 3455–3467, 2017.
- [6] Q. Ali, S. Syed, H. Kurtovi, and I. Hahn, "Double Stator and Single Rotor Type Single-Phase Flux Switching Axial Flux Permanent Magnet Motor," 2017.
- [7] İ. Tar, "Performance Comparison of Internal and External Rotor Structured Wind Generators Mounted from Same Permanent Magnets on Same Geometry," vol. 4, no. 4, pp. 1–6, 2009.
- [8] J. O. A. O. Onohaebi, "Ferromagnetic Materials Characteristics : Their Application in Magnetic Coresdesign Using Hysteresis Loop Measurements," no. 7, pp. 113–119, 2018.
- [9] S. H. Rhyu, S. Khaliq, R. E. Kim, and K. D. Lee, "Design and analysis of axial flux permanent magnet motor for electric bicycles with hybrid stator core," *2017 20th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2017*, 2017.

- [10] Y. B. A. Apatya, A. Subiantoro, and F. Yusivar, "Design and Prototyping of 3-Phase BLDC Motor," pp. 209–214, 2017.
- [11] J. Zambada, "Sinusoidal Control of PMSM Motors with dsPIC30F DSC," 2005.
- [12] P. Mukherjee and M. Sengupta, "Design, analysis and fabrication of a brush-less DC motor," in *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2014*, 2014.
- [13] A. Mahmoudi, S. Kahourzade, N. A. Rahim, and W. P. Hew, "Optimum Design of an Inside-Out Axial-Flux Permanent-Magnet Motor Using Genetic Algorithm and Finite Element Analysis," vol. 7, no. March, pp. 3814–3828, 2012.

## LAMPIRAN

**Tabel 7.1** Pengujian sinyal pada hall sensor

| <b>Time (ms)</b> | <b>Channel A (Tegangan)</b> | <b>Channel B (Tegangan)</b> | <b>Channel C (Tegangan)</b> |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0                | 13.1                        | 12.71                       | 0.17                        |
| 1                | 12.96                       | 12.68                       | 0.19                        |
| 2                | 12.89                       | 12.64                       | 0.18                        |
| 3                | 12.86                       | 12.61                       | 0.19                        |
| 4                | 12.82                       | 12.56                       | 0.17                        |
| 5                | 12.9                        | 12.6                        | 0.16                        |
| 6                | 12.93                       | 12.62                       | 0.18                        |
| 7                | 13.08                       | 12.65                       | 0.19                        |
| 8                | 12.98                       | 12.71                       | 0.21                        |
| 9                | 0.17                        | 12.71                       | 0.22                        |
| 10               | 0.19                        | 12.8                        | 0.19                        |
| 11               | 0.18                        | 12.64                       | 0.17                        |
| 12               | 0.19                        | 12.61                       | 0.16                        |
| 13               | 0.17                        | 12.56                       | 0.18                        |
| 14               | 0.16                        | 12.6                        | 0.19                        |
| 15               | 0.18                        | 12.62                       | 0.17                        |
| 16               | 0.19                        | 12.65                       | 0.19                        |
| 17               | 0.21                        | 12.71                       | 0.18                        |
| 18               | 0.22                        | 12.71                       | 0.19                        |
| 19               | 0.19                        | 12.68                       | 0.17                        |
| 20               | 0.17                        | 12.64                       | 0.16                        |
| 21               | 0.16                        | 12.61                       | 0.18                        |

| <b>Time (ms)</b> | <b>Channel A (Tegangan)</b> | <b>Channel B (Tegangan)</b> | <b>Channel C (Tegangan)</b> |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 22               | 0.18                        | 12.56                       | 0.19                        |
| 23               | 0.19                        | 12.6                        | 12.72                       |
| 24               | 0.21                        | 12.62                       | 12.68                       |
| 25               | 0.19                        | 12.65                       | 12.63                       |
| 26               | 0.17                        | 12.71                       | 12.6                        |
| 27               | 0.18                        | 12.71                       | 12.71                       |
| 28               | 0.17                        | 12.68                       | 12.8                        |
| 29               | 0.19                        | 0.16                        | 12.76                       |
| 30               | 0.18                        | 0.18                        | 12.72                       |
| 31               | 0.17                        | 0.19                        | 12.69                       |
| 32               | 0.19                        | 0.21                        | 12.65                       |
| 33               | 0.17                        | 0.2                         | 12.62                       |
| 34               | 0.19                        | 0.16                        | 12.6                        |
| 35               | 0.18                        | 0.19                        | 12.57                       |
| 36               | 0.16                        | 0.2                         | 12.55                       |
| 37               | 0.18                        | 0.19                        | 12.62                       |
| 38               | 0.19                        | 0.21                        | 12.65                       |
| 39               | 0.17                        | 0.19                        | 12.7                        |
| 40               | 0.19                        | 0.22                        | 12.76                       |
| 41               | 0.18                        | 0.19                        | 12.8                        |
| 42               | 0.19                        | 0.17                        | 12.76                       |
| 43               | 13.1                        | 0.16                        | 12.72                       |
| 44               | 12.96                       | 0.21                        | 12.69                       |
| 45               | 12.89                       | 0.2                         | 12.65                       |
| 46               | 12.86                       | 0.16                        | 12.62                       |
| 47               | 12.82                       | 0.19                        | 12.6                        |
| 48               | 12.7                        | 0.2                         | 12.57                       |

| <b>Time (ms)</b> | <b>Channel A (Tegangan)</b> | <b>Channel B (Tegangan)</b> | <b>Channel C (Tegangan)</b> |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 49               | 12.6                        | 0.19                        | 12.55                       |
| 50               | 12.4                        | 0.21                        | 12.62                       |
| 51               | 12.96                       | 0.19                        | 12.65                       |
| 52               | 12.89                       | 0.22                        | 12.7                        |
| 53               | 12.86                       | 0.19                        | 12.76                       |
| 54               | 12.82                       | 0.17                        | 12.8                        |
| 55               | 12.9                        | 0.16                        | 0.17                        |
| 56               | 12.93                       | 0.2                         | 0.19                        |
| 57               | 13.08                       | 0.19                        | 0.18                        |
| 58               | 12.98                       | 0.21                        | 0.19                        |
| 59               | 12.96                       | 0.19                        | 0.17                        |
| 60               | 12.89                       | 0.22                        | 0.16                        |
| 61               | 12.86                       | 0.19                        | 0.18                        |
| 62               | 12.82                       | 0.17                        | 0.19                        |
| 63               | 12.9                        | 0.16                        | 0.21                        |
| 64               | 12.93                       | 0.19                        | 0.22                        |
| 65               | 13.08                       | 12.61                       | 0.19                        |
| 66               | 12.98                       | 12.56                       | 0.17                        |
| 67               | 12.96                       | 12.6                        | 0.16                        |
| 68               | 12.89                       | 12.62                       | 0.18                        |
| 69               | 12.86                       | 12.65                       | 0.19                        |
| 70               | 12.82                       | 12.54                       | 0.17                        |
| 71               | 12.9                        | 12.57                       | 0.19                        |
| 72               | 12.93                       | 12.68                       | 0.18                        |
| 73               | 13.08                       | 12.64                       | 0.19                        |
| 74               | 12.98                       | 12.61                       | 0.17                        |
| 75               | 0.17                        | 12.56                       | 0.16                        |

| <b>Time (ms)</b> | <b>Channel A (Tegangan)</b> | <b>Channel B (Tegangan)</b> | <b>Channel C (Tegangan)</b> |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 76               | 0.19                        | 12.6                        | 0.18                        |
| 77               | 0.18                        | 12.62                       | 0.19                        |
| 78               | 0.19                        | 12.65                       | 0.17                        |
| 79               | 0.17                        | 12.71                       | 0.19                        |
| 80               | 0.16                        | 12.71                       | 0.18                        |
| 81               | 0.18                        | 12.68                       | 0.19                        |
| 82               | 0.19                        | 12.65                       | 0.17                        |
| 83               | 0.21                        | 12.71                       | 0.16                        |
| 84               | 0.22                        | 12.45                       | 0.18                        |
| 85               | 0.19                        | 12.49                       | 0.19                        |
| 86               | 0.17                        | 12.56                       | 12.6                        |
| 87               | 0.16                        | 12.61                       | 12.57                       |
| 88               | 0.18                        | 12.56                       | 12.55                       |
| 89               | 0.19                        | 12.6                        | 12.62                       |
| 90               | 0.17                        | 12.61                       | 12.65                       |
| 91               | 0.19                        | 12.65                       | 12.7                        |
| 92               | 0.18                        | 12.71                       | 12.76                       |
| 93               | 0.19                        | 12.71                       | 12.8                        |
| 94               | 0.17                        | 12.68                       | 12.76                       |
| 95               | 0.16                        | 12.65                       | 12.72                       |
| 96               | 0.18                        | 12.71                       | 12.69                       |
| 97               | 0.19                        | 12.54                       | 12.65                       |
| 98               | 0.21                        | 12.48                       | 12.62                       |

**Tabel 7.2** Pengujian Motor Sistem Keseluruhan

| <b>RPM</b> | <b>Teg (V)</b> | <b>Arus (A)</b> | <b>Faktor Daya</b> | <b>Daya Input (kW)</b> | <b>Daya Ouput (kW)</b> | <b>Torsi (Nm)</b> |
|------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 893        | 12.20          | 18.67           | 0.43               | 0.01                   | 0.01                   | 0.00              |
| 1408       | 16.47          | 16.00           | 0.51               | 0.02                   | 0.02                   | 0.13              |
| 1844       | 18.40          | 17.00           | 0.55               | 0.03                   | 0.03                   | 0.13              |
| 2505       | 22.97          | 24.00           | 0.64               | 0.04                   | 0.04                   | 0.13              |
| 3185       | 25.80          | 24.00           | 0.69               | 0.05                   | 0.05                   | 0.13              |
| 3826       | 24.00          | 24.00           | 0.71               | 0.08                   | 0.08                   | 0.26              |
| 4382       | 33.53          | 24.00           | 0.71               | 0.13                   | 0.13                   | 0.26              |
| 4701       | 34.53          | 15.00           | 0.73               | 0.15                   | 0.15                   | 0.26              |
| 4762       | 34.50          | 14.00           | 0.73               | 0.15                   | 0.15                   | 0.26              |
| 4773       | 34.57          | 13.00           | 0.73               | 0.15                   | 0.15                   | 0.26              |
| 4776       | 34.50          | 13.00           | 0.73               | 0.15                   | 0.15                   | 0.26              |
| 4778       | 34.50          | 13.00           | 0.73               | 0.15                   | 0.15                   | 0.26              |
| 4777       | 34.50          | 13.00           | 0.73               | 0.18                   | 0.18                   | 0.39              |
| 4730       | 34.50          | 14.67           | 0.73               | 0.37                   | 0.37                   | 0.78              |
| 4667       | 34.53          | 17.00           | 0.73               | 0.55                   | 0.55                   | 1.04              |
| 4627       | 34.67          | 19.00           | 0.72               | 0.63                   | 0.63                   | 1.31              |
| 4623       | 34.53          | 19.00           | 0.73               | 0.62                   | 0.62                   | 1.17              |
| 4625       | 34.60          | 19.00           | 0.72               | 0.61                   | 0.61                   | 1.17              |
| 4627       | 34.57          | 18.67           | 0.72               | 0.61                   | 0.61                   | 1.17              |
| 4619       | 34.60          | 19.00           | 0.72               | 0.68                   | 0.68                   | 1.31              |
| 4546       | 34.57          | 21.00           | 0.72               | 0.96                   | 0.96                   | 1.96              |
| 4441       | 34.63          | 27.00           | 0.7                | 1.26                   | 1.26                   | 2.61              |
| 4380       | 34.53          | 28.00           | 0.7                | 1.35                   | 1.35                   | 2.87              |

| <b>RPM</b> | <b>Teg (V)</b> | <b>Arus (A)</b> | <b>Faktor Daya</b> | <b>Daya Input (kW)</b> | <b>Daya Ouput (kW)</b> | <b>Torsi (Nm)</b> |
|------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 4338       | 34.40          | 28.00           | 0.7                | 1.35                   | 1.35                   | 2.87              |
| 4365       | 34.70          | 30.00           | 0.69               | 1.36                   | 1.36                   | 2.87              |
| 4378       | 34.70          | 29.00           | 0.69               | 1.37                   | 1.37                   | 2.87              |
| 4328       | 34.67          | 30.00           | 0.69               | 1.63                   | 1.63                   | 3.39              |
| 4199       | 34.77          | 38.67           | 0.66               | 2.03                   | 2.03                   | 4.44              |
| 4047       | 34.70          | 43.67           | 0.63               | 2.32                   | 2.32                   | 5.22              |
| 3997       | 34.70          | 47.67           | 0.62               | 2.39                   | 2.39                   | 5.48              |
| 3977       | 34.73          | 48.67           | 0.62               | 2.46                   | 2.46                   | 5.74              |
| 3895       | 34.57          | 52.33           | 0.6                | 2.64                   | 2.64                   | 6.26              |
| 3845       | 34.57          | 55.00           | 0.6                | 2.68                   | 2.68                   | 6.39              |
| 3836       | 34.60          | 56.00           | 0.59               | 2.69                   | 2.69                   | 6.39              |
| 3809       | 34.53          | 55.67           | 0.59               | 2.83                   | 2.83                   | 6.79              |
| 3614       | 34.00          | 74.33           | 0.55               | 3.41                   | 3.41                   | 8.61              |
| 3492       | 33.40          | 76.67           | 0.56               | 3.56                   | 3.56                   | 9.40              |
| 3335       | 32.23          | 79.67           | 0.55               | 3.66                   | 3.66                   | 10.05             |
| 3105       | 30.87          | 83.67           | 0.54               | 3.54                   | 3.54                   | 10.44             |
| 3020       | 30.17          | 86.00           | 0.53               | 3.44                   | 3.44                   | 10.44             |
| 2969       | 29.90          | 87.33           | 0.53               | 3.38                   | 3.38                   | 10.44             |
| 2936       | 26.43          | 89.00           | 0.53               | 3.44                   | 3.44                   | 10.83             |
| 2809       | 29.07          | 90.67           | 0.52               | 3.48                   | 3.48                   | 11.35             |
| 2579       | 27.30          | 95.33           | 0.51               | 3.35                   | 3.35                   | 12.01             |
| 2391       | 26.80          | 97.33           | 0.5                | 3.29                   | 3.29                   | 12.66             |
| 2234       | 25.13          | 102.00          | 0.47               | 3.06                   | 3.06                   | 12.53             |
| 2224       | 25.47          | 109.00          | 0.48               | 3.01                   | 3.01                   | 12.40             |
| 2235       | 25.47          | 108.00          | 0.48               | 3.02                   | 3.02                   | 12.40             |
| 2264       | 25.67          | 104.00          | 0.48               | 3.17                   | 3.17                   | 12.79             |
| 2111       | 24.90          | 113.67          | 0.47               | 3.14                   | 3.14                   | 13.70             |

| <b>RPM</b> | <b>Teg (V)</b> | <b>Arus (A)</b> | <b>Faktor Daya</b> | <b>Daya Input (kW)</b> | <b>Daya Ouput (kW)</b> | <b>Torsi (Nm)</b> |
|------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 1965       | 24.07          | 112.00          | 0.45               | 2.95                   | 2.95                   | 13.83             |
| 1914       | 23.90          | 116.33          | 0.45               | 2.85                   | 2.85                   | 13.70             |
| 1836       | 23.20          | 110.33          | 0.44               | 2.70                   | 2.70                   | 13.57             |
| 1822       | 23.00          | 114.67          | 0.43               | 2.66                   | 2.66                   | 13.44             |
| 1819       | 23.03          | 114.00          | 0.44               | 2.66                   | 2.66                   | 13.44             |
| 1795       | 23.30          | 122.67          | 0.44               | 2.72                   | 2.72                   | 13.96             |
| 1776       | 23.13          | 124.00          | 0.44               | 2.81                   | 2.81                   | 14.49             |
| 1738       | 22.87          | 126.00          | 0.43               | 2.81                   | 2.81                   | 14.88             |
| 1735       | 22.83          | 127.00          | 0.43               | 2.83                   | 2.83                   | 15.01             |
| 1720       | 22.70          | 125.67          | 0.43               | 2.78                   | 2.78                   | 14.88             |
| 1728       | 22.63          | 126.00          | 0.43               | 2.78                   | 2.78                   | 14.75             |
| 1699       | 22.57          | 127.33          | 0.43               | 2.78                   | 2.78                   | 15.01             |
| 1681       | 22.50          | 129.33          | 0.43               | 2.78                   | 2.78                   | 15.14             |
| 1674       | 22.47          | 128.33          | 0.43               | 2.77                   | 2.77                   | 15.14             |
| 1664       | 22.40          | 129.33          | 0.43               | 2.75                   | 2.75                   | 15.14             |
| 1669       | 22.47          | 129.33          | 0.43               | 2.76                   | 2.76                   | 15.14             |
| 1674       | 22.67          | 129.00          | 0.43               | 2.77                   | 2.77                   | 15.27             |
| 1653       | 22.40          | 130.33          | 0.43               | 2.78                   | 2.78                   | 15.40             |
| 1606       | 22.17          | 131.33          | 0.42               | 2.73                   | 2.73                   | 15.66             |
| 1590       | 22.00          | 131.67          | 0.42               | 2.68                   | 2.68                   | 15.53             |
| 1603       | 22.40          | 131.67          | 0.43               | 2.70                   | 2.70                   | 15.53             |
| 1590       | 21.97          | 132.00          | 0.42               | 2.70                   | 2.70                   | 15.53             |
| 1574       | 21.87          | 132.67          | 0.42               | 2.69                   | 2.69                   | 15.66             |
| 1559       | 21.83          | 134.00          | 0.42               | 2.68                   | 2.68                   | 15.79             |
| 1549       | 22.17          | 135.33          | 0.42               | 2.68                   | 2.68                   | 15.92             |
| 1547       | 21.73          | 134.00          | 0.42               | 2.66                   | 2.66                   | 15.79             |
| 1549       | 21.73          | 134.33          | 0.42               | 2.67                   | 2.67                   | 15.79             |

| <b>RPM</b> | <b>Teg (V)</b> | <b>Arus (A)</b> | <b>Faktor Daya</b> | <b>Daya Input (kW)</b> | <b>Daya Ouput (kW)</b> | <b>Torsi (Nm)</b> |
|------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 1535       | 21.67          | 135.33          | 0.42               | 2.68                   | 2.68                   | 16.05             |
| 1511       | 21.57          | 137.67          | 0.42               | 2.66                   | 2.66                   | 16.18             |
| 1508       | 21.47          | 137.33          | 0.42               | 2.67                   | 2.67                   | 16.31             |
| 1510       | 21.90          | 137.67          | 0.42               | 2.67                   | 2.67                   | 16.31             |
| 1510       | 21.53          | 137.00          | 0.42               | 2.67                   | 2.67                   | 16.18             |
| 1499       | 21.63          | 138.00          | 0.42               | 2.67                   | 2.67                   | 16.31             |
| 1484       | 21.40          | 138.67          | 0.42               | 2.67                   | 2.67                   | 16.57             |
| 1475       | 21.83          | 139.33          | 0.42               | 2.65                   | 2.65                   | 16.44             |
| 1481       | 21.33          | 138.67          | 0.42               | 2.65                   | 2.65                   | 16.44             |
| 1478       | 21.63          | 139.67          | 0.42               | 2.66                   | 2.66                   | 16.57             |
| 1470       | 21.27          | 140.67          | 0.42               | 2.67                   | 2.67                   | 16.70             |
| 1456       | 21.27          | 141.00          | 0.42               | 2.66                   | 2.66                   | 16.70             |
| 1451       | 21.17          | 141.67          | 0.42               | 2.64                   | 2.64                   | 16.70             |
| 1458       | 21.23          | 140.33          | 0.42               | 2.65                   | 2.65                   | 16.70             |
| 1446       | 21.10          | 141.67          | 0.42               | 2.63                   | 2.63                   | 16.70             |
| 1437       | 21.07          | 144.33          | 0.42               | 2.63                   | 2.63                   | 16.83             |
| 1432       | 21.10          | 142.00          | 0.42               | 2.62                   | 2.62                   | 16.83             |
| 1433       | 21.37          | 144.00          | 0.42               | 2.62                   | 2.62                   | 16.83             |
| 1427       | 21.07          | 142.33          | 0.42               | 2.63                   | 2.63                   | 16.97             |
| 1423       | 21.03          | 142.67          | 0.42               | 2.62                   | 2.62                   | 16.97             |
| 1428       | 21.07          | 142.33          | 0.42               | 2.63                   | 2.63                   | 16.97             |
| 1424       | 20.93          | 143.00          | 0.42               | 2.63                   | 2.63                   | 16.97             |
| 1418       | 20.97          | 143.33          | 0.42               | 2.63                   | 2.63                   | 16.97             |
| 1412       | 20.93          | 143.67          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 16.97             |
| 1414       | 20.97          | 142.67          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 16.97             |
| 1410       | 20.90          | 143.33          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 16.97             |
| 1405       | 20.90          | 144.00          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.10             |

| <b>RPM</b> | <b>Teg (V)</b> | <b>Arus (A)</b> | <b>Faktor Daya</b> | <b>Daya Input (kW)</b> | <b>Daya Ouput (kW)</b> | <b>Torsi (Nm)</b> |
|------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 1404       | 20.93          | 144.00          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.10             |
| 1405       | 20.87          | 143.33          | 0.42               | 2.60                   | 2.60                   | 17.10             |
| 1404       | 21.13          | 143.67          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.10             |
| 1398       | 20.87          | 144.00          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.10             |
| 1400       | 21.07          | 144.67          | 0.42               | 2.62                   | 2.62                   | 17.23             |
| 1402       | 20.87          | 143.67          | 0.42               | 2.62                   | 2.62                   | 17.23             |
| 1394       | 21.03          | 144.33          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.23             |
| 1390       | 20.83          | 144.67          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.23             |
| 1388       | 20.80          | 144.33          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.23             |
| 1388       | 20.83          | 144.67          | 0.42               | 2.60                   | 2.60                   | 17.23             |
| 1388       | 20.67          | 144.67          | 0.42               | 2.60                   | 2.60                   | 17.23             |
| 1386       | 20.87          | 145.00          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.36             |
| 1385       | 20.60          | 145.00          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.36             |
| 1386       | 20.83          | 145.00          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.36             |
| 1386       | 21.20          | 143.67          | 0.42               | 2.62                   | 2.62                   | 17.36             |
| 1381       | 20.77          | 144.67          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.36             |
| 1378       | 20.70          | 145.00          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.36             |
| 1379       | 20.77          | 144.67          | 0.42               | 2.61                   | 2.61                   | 17.36             |
| 1377       | 20.70          | 144.67          | 0.42               | 2.60                   | 2.60                   | 17.36             |
| 1369       | 20.70          | 145.67          | 0.43               | 2.59                   | 2.59                   | 17.36             |
| 1363       | 20.67          | 145.00          | 0.43               | 2.59                   | 2.59                   | 17.49             |
| 1364       | 20.67          | 146.00          | 0.43               | 2.59                   | 2.59                   | 17.49             |
| 1363       | 20.67          | 146.00          | 0.42               | 2.58                   | 2.58                   | 17.36             |
| 1364       | 20.60          | 145.67          | 0.43               | 2.59                   | 2.59                   | 17.49             |
| 1363       | 20.70          | 145.33          | 0.43               | 2.60                   | 2.60                   | 17.49             |
| 1359       | 20.60          | 145.67          | 0.43               | 2.59                   | 2.59                   | 17.49             |
| 1361       | 20.87          | 145.33          | 0.43               | 2.59                   | 2.59                   | 17.49             |

| <b>RPM</b> | <b>Teg (V)</b> | <b>Arus (A)</b> | <b>Faktor Daya</b> | <b>Daya Input (kW)</b> | <b>Daya Ouput (kW)</b> | <b>Torsi (Nm)</b> |
|------------|----------------|-----------------|--------------------|------------------------|------------------------|-------------------|
| 1354       | 20.57          | 146.00          | 0.43               | 2.57                   | 2.57                   | 17.49             |
| 1349       | 20.53          | 146.67          | 0.43               | 2.57                   | 2.57                   | 17.49             |
| 1350       | 20.53          | 146.33          | 0.43               | 2.57                   | 2.57                   | 17.49             |
| 1351       | 20.57          | 146.00          | 0.43               | 2.57                   | 2.57                   | 17.49             |
| 1348       | 20.57          | 146.67          | 0.43               | 2.57                   | 2.57                   | 17.49             |
| 1346       | 20.53          | 146.33          | 0.43               | 2.57                   | 2.57                   | 17.62             |
| 1347       | 20.53          | 146.33          | 0.43               | 2.58                   | 2.58                   | 17.62             |
| 1348       | 20.53          | 146.67          | 0.43               | 2.58                   | 2.58                   | 17.62             |

**Tabel 7.3** Ukuran Kawat Tembaga berdasarkan American Wire Gauge (AWG)

| <b>AWG Gauge</b> | <b>Diameter Konduktor (mm)</b> | <b>Arus Maksimal untuk Wiring (A)</b> | <b>Frekuensi Maksimal</b> | <b>Breaking Force</b> |
|------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| 1                | 7,34822                        | 211                                   | 325 Hz                    | 2430 lbs              |
| 2                | 6,54304                        | 181                                   | 410 Hz                    | 1930 lbs              |
| 3                | 5,82676                        | 158                                   | 500 Hz                    | 1530 lbs              |
| 4                | 5,18922                        | 135                                   | 650 Hz                    | 1210 lbs              |
| 5                | 4,62026                        | 118                                   | 810 Hz                    | 960 lbs               |
| 6                | 4,1148                         | 101                                   | 1100 Hz                   | 760 lbs               |
| 7                | 3,66522                        | 89                                    | 1300 Hz                   | 605 lbs               |
| 8                | 3,2639                         | 73                                    | 1650 Hz                   | 480 lbs               |
| 9                | 2,90576                        | 64                                    | 2050 Hz                   | 380 lbs               |
| 10               | 2,58826                        | 55                                    | 2600 Hz                   | 314 lbs               |
| 11               | 2,30378                        | 47                                    | 3200 Hz                   | 249 lbs               |
| 12               | 2,05232                        | 41                                    | 4150 Hz                   | 197 lbs               |
| 13               | 1,8288                         | 35                                    | 5300 Hz                   | 150 lbs               |
| 14               | 1,62814                        | 32                                    | 6700 Hz                   | 119 lbs               |
| 15               | 1,45034                        | 28                                    | 8250 Hz                   | 94 lbs                |
| 16               | 1,29032                        | 22                                    | 11 k Hz                   | 75 lbs                |
| 17               | 1,15062                        | 19                                    | 13 k Hz                   | 59 lbs                |
| 18               | 1,02362                        | 16                                    | 17 kHz                    | 47 lbs                |
| 19               | 0,91186                        | 14                                    | 21 kHz                    | 37 lbs                |
| 20               | 0,8128                         | 11                                    | 27 kHz                    | 29 lbs                |

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT PENULIS



Dapat menyelesaikan tugas akhir ini merupakan suatu kebanggaan dan bentuk syukur bagi penulis yang tidak dapat penulis luapkan. Penulis bernama Ghufron Fawaid lahir di Kebumen, Mei 1996. Riwayat pendidikan penulis dimulai saat di MTs N Kebumen 1 dan MAN Insan Cendekia Serpong, lalu pada akhirnya menempuh pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Selama masa perkuliahan, penulis juga aktif dalam kegiatan non akademis yaitu pada organisasi mahasiswa, unit kegiatan mahasiswa dan bidang keilmiahan, seperti menjadi staf ristek UKM robotika dan menjadi trainer keilmiahan dibawah naungan BEM ITS. Oleh karena itu penulis juga aktif dalam mengikuti kompetisi dan konferensi baik nasional maupun internasional. Penulis dapat dihubungi melalui email: [ghufronfawaid@gmail.com](mailto:ghufronfawaid@gmail.com) dan akun linkedin: Ghufron Fawaid

*Halaman ini sengaja dikosongkan*