



**RANCANG BANGUN MOTOR *THREE-PHASE BRUSHLESS*
DIRECT CURRENT TIPE *AXIAL FLUX* KONSTRUKSI
ROTOR GANDA MAGNET PERMANEN**

SKRIPSI

Oleh

Bagas Abib Sastiko
NIM 161910201013

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2020**



**RANCANG BANGUN MOTOR *THREE-PHASE BRUSHLESS*
DIRECT CURRENT TIPE *AXIAL FLUX* KONSTRUKSI
ROTOR GANDA MAGNET PERMANEN**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

oleh:

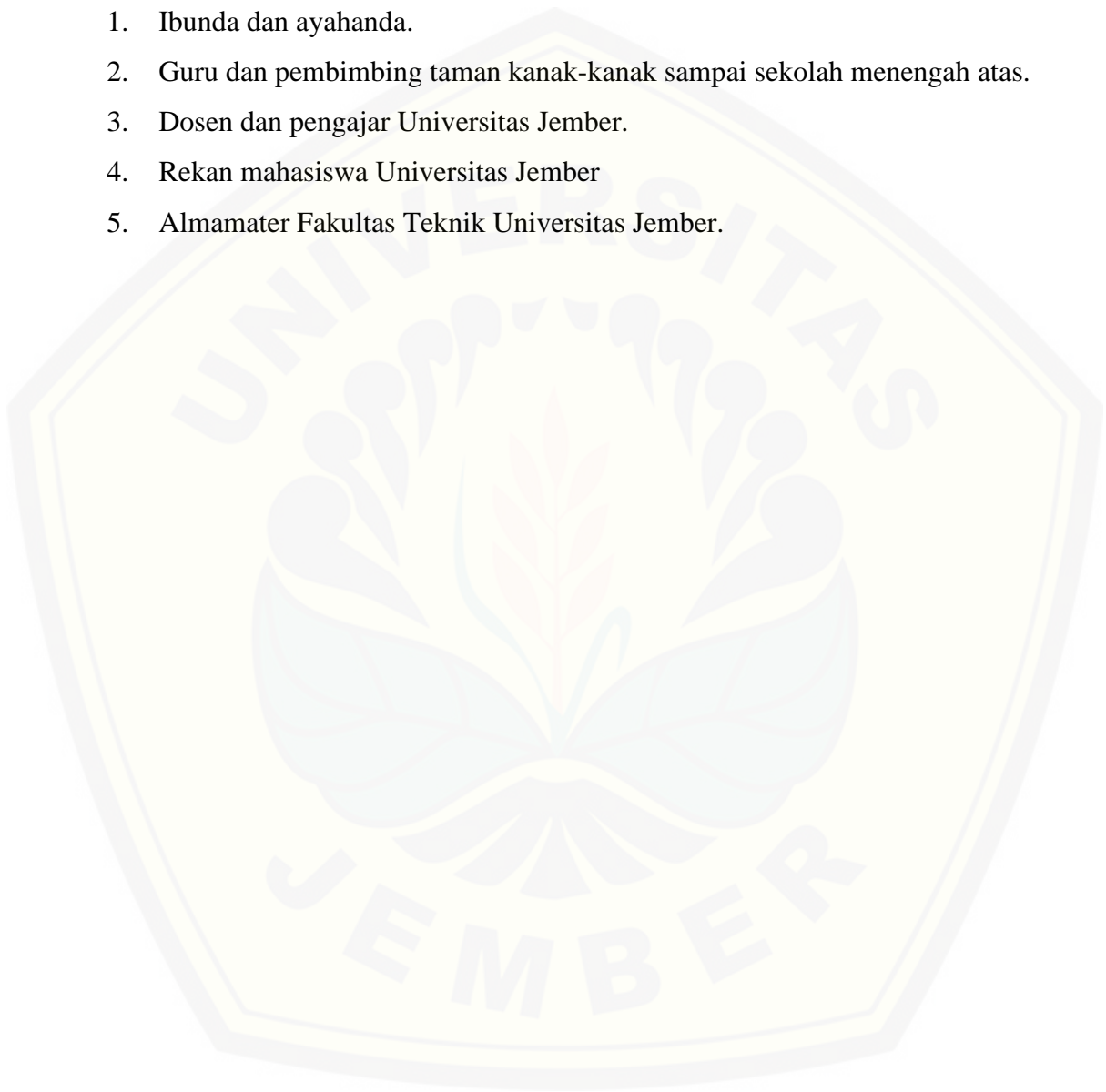
Bagas Abib Sastiko
NIM 161910201013

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2020**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini dipersembahkan untuk:

1. Ibunda dan ayahanda.
2. Guru dan pembimbing taman kanak-kanak sampai sekolah menengah atas.
3. Dosen dan pengajar Universitas Jember.
4. Rekan mahasiswa Universitas Jember
5. Almamater Fakultas Teknik Universitas Jember.



MOTO

Keberhasilan bukanlah milik orang yang pintar, keberhasilan adalah milik mereka yang senantiasa berusaha.¹



¹ Bacharuddin Jusuf Habibie

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

nama : Bagas Abib Sastiko

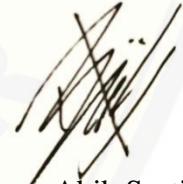
NIM : 161910201013

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul “RANCANG BANGUN MOTOR *THREE-PHASE BRUSHLESS DIRECT CURRENT* TIPE *AXIAL FLUX* KONSTRUKSI ROTOR GANDA MAGNET PERMANEN” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah disebutkan sumbernya, belum pernah dan belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

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

Jember, 2 Juli 2020

Yang menyatakan,



Bagas Abib Sastiko

NIM 161910201013

SKRIPSI

**RANCANG BANGUN MOTOR *THREE-PHASE BRUSHLESS*
DIRECT CURRENT TIPE *AXIAL FLUX* KONSTRUKSI
ROTOR GANDA MAGNET PERMANEN**

Oleh

Bagas Abib Sastiko
NIM 161910201013

Pembimbing:

Dosen Pembimbing Utama : Ir. Widyono Hadi, M.T.
Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Ir. Satryo Budi Utomo, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul "Rancang Bangun Motor *Three-Phase Brushless Direct Current* Tipe *Axial Flux* Konstruksi Rotor Ganda Magnet Permanen" karya Bagas Abib Sastiko telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Kamis, 9 Juli 2020

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

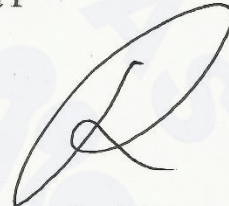
Tim Penguji:

Ketua,



Ir. Widyono Hadi, M.T.
NIP 19610414 198902 1 001

Anggota I



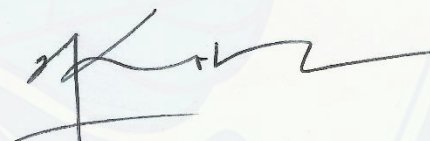
Dr. Ir. Satryo Budi Utomo, S.T., M.T.
NIP 19850126 200801 1 002

Anggota II,



Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP 19700404 199601 1 001

Anggota III,



Ir. Ike Fibriani, S.T., M.T.
NIP 19800207 201504 2 001

Mengesahkan
Dekan,

Dr. Triwahju Hardianto, S.T., M.T.
NIP 19700826 199702 1 001

RINGKASAN

Rancang Bangun Motor *Three-Phase Brushless Direct Current Tipe Axial Flux* Konstruksi Rotor Ganda Magnet Permanen; Bagas Abib Sastiko; NIM 161910201013; 2020; 76 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Indonesia diperkirakan tidak akan memproduksi minyak lagi apabila perkiraan berdasarkan persediaan minyak sekarang 3.6 miliar barel dengan rata-rata produksi 800.000 barel per hari. Oleh karena itu pengembangan motor listrik menjadi salah satu solusi untuk menghadapi isu persediaan minyak yang akan habis. (Kementerian ESDM, 2019)

Motor listrik menjadi salah satu solusi permasalahan tersebut. Motor listrik banyak diteliti untuk menggantikan motor bahan bakar pada beberapa bidang penerapan motor.

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) merupakan salah satu motor yang sedang banyak diteliti. Motor ini dapat diterapkan di berbagai sektor, seperti: otomotif, astronomi, medis, dan industri. Motor BLDC banyak digunakan di sektor industri. Hal ini disebabkan desain yang simpel dan memiliki kemampuan tinggi untuk berputar pada kecepatan kencang. (Shenov, Latha, Kumar, & Satyendra, 2016) Motor BLDC terdapat dua jenis yaitu *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) dan PMBLDC. (Sim, 2014) Motor BLDC terdapat dua jenis berdasarkan konstruksinya, yaitu bentuk *radial* dan *axial*. Beberapa penelitian sebelumnya membuktikan bahwa motor BLDC bentuk *axial flux* memiliki torsi yang lebih tinggi daripada bentuk *radial flux*. (Simsir & Ertan, 1999) Selain itu, Motor BLDC bentuk radial flux memiliki rugi daya yang lebih tinggi daripada bentuk *axial flux*. (Qu, Aydin, & Lipo, 2003) Motor BLDC radial memiliki efisiensi yang semakin tinggi apabila kecepatan putar juga semakin tinggi, namun pada kecepatan maksimal efisiensi tersebut mengalami penurunan. (Alberti & Berardi, 2018)

Motor BLDC 3 fasa dapat bekerja salah satunya menggunakan sensor *hall effect*. (Wu, Wen, & Wong, 2016) Terdapat penelitian sebelumnya bahwa

kemampuan sensor *hall effect* sangat efektif untuk bekerja meskipun salah satu sensor *hall effect* rusak atau tidak berfungsi. (Nama, Gogoi, & Tripathy, 2017)

Motor BLDC memiliki efisiensi daya yang berubah saat kecepatan juga berubah. Apabila kecepatan semakin tinggi maka efisiensi daya motor juga semakin tinggi. (Lee & Kim, 2019)

Penelitian ini membahas rancang bangun motor *three-phase brushless direct current* tipe *axial flux* konstruksi rotor ganda magnet permanen (AFPM BLDC rotor ganda). Motor ini menggunakan magnet permanen jenis neodimium yang memiliki spesifikasi fluks magnet paling besar. Penelitian dilakukan untuk mengetahui kecepatan putar motor (rpm) yang dihasilkan pada variasi tegangan DC 10 V sampai 24 V. Analisis dilakukan berdasarkan data dari nilai kecepatan putar dan pengaruh tegangan masukan terhadap kecepatan putar motor, torsi motor, daya motor, rugi daya motor, daya mekanis motor, dan efisiensi motor.

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, diperoleh kecepatan terbesar terukur 2365 rpm dan arus tertinggi 1.47 A. Berdasarkan analisis perhitungan yang dilakukan, diperoleh persentase eror kecepatan putar motor tertinggi 1.67%, torsi tertinggi 0.057 Nm, dan efisiensi tertinggi diperoleh 71.30%.

Hasil pengujian dan analisis perhitungan performa motor AFPM BLDC rotor ganda dibandingkan dengan motor AFPM BLDC rotor tunggal. Berdasarkan perbandingan dilakukan diperoleh kecepatan, torsi, dan efisiensi motor AFPM BLDC rotor ganda lebih tinggi daripada motor AFPM BLDC rotor tunggal.

SUMMARY

Design of Three-Phase Double Rotor Axial Flux Permanent Magnet Brushless Direct Current Motors; Bagas Abib Sastiko; NIM 161910201013; 2020; 76 pages; Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Jember.

Indonesia is not expected to produce more oil if estimates based on current oil inventories are 3.6 billion barrels with an average production of 800,000 barrels per day. Therefore, the development of electric motors is one solution to deal with the issue of oil supplies that will run out. (ESDM, 2019)

Electric motors are one of the solutions to these problems. Electric motors are widely studied to replace fuel motors in several fields of application of motors.

Motor Brushless Direct Current (BLDC) is one of the motors that is being widely studied. This motorbike can be applied in various sectors, such as automotive, astronomy, medical, and industry. BLDC motors are widely used in the industrial sector. This is due to a simple design and has a high ability to spin at fast speeds. (Shenov, Latha, Kumar, & Satyendra, 2016) There are two types of BLDC motorcycles, namely Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) and PMBLDC. (Sim, 2014) There are two types of BLDC motors based on their construction, namely forms radial and axial. Several previous studies have shown that the BLDC motor is axial flux has a higher torque than shape radial flux. (Simsir & Ertan, 1999) Besides, the BLDC motor in the form of radial flux has a higher power loss than the form axial flux. (Qu, Aydin, & Lipo, 2003) Radial BLDC motors have higher efficiency when the rotating speed is also higher, but at the maximum speed, the efficiency decreases. (Alberti & Berardi, 2018)

The 3 phase BLDC motor can work one of them using the hall effect sensor. (Wu, Wen, & Wong, 2016) There have been previous studies that the ability of the Hall effect sensor is very effective to work even though one hall effect sensor is damaged or not functioning. (Name, Gogoi, & Tripathy, 2017)

BLDC motors have power efficiency that changes when speed also changes. If the speed is higher, the motor power efficiency will also be higher. (Lee & Kim, 2019)

This study discusses the design of motor three-phase brushless direct current types of axial flux permanent magnet dual rotor construction (AFPM BLDC double rotor). This motor uses a neodymium type permanent magnet which has the largest magnetic flux specification. The study was conducted to determine the motor rotational speed (rpm) generated in DC voltage variations of 10 V to 24 V. The analysis was performed based on data from the value of the rotational speed and the influence of the input voltage on the motor rotational speed, motor torque, motor power, motor power loss, motor mechanical power, and motor efficiency.

Based on the tests carried out, the largest measured speed is 2365 rpm and the highest current is 1.47 A. Based on the analysis of the calculations, the highest percentage of motor speed error is 1.67%, the highest torque is 0.057 Nm, and the highest efficiency is 71.30%.

The results of testing and analysis of the calculation of the performance of a double rotor AFPM BLDC motor compared to a single rotor AFPM BLDC motor. Based on the comparison, speed, torque, and efficiency of double rotor AFPM BLDC motors are higher than those of single rotor AFPM BLDC motors.

PRAKATA

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Rancang Bangun Motor *Three-Phase Brushless Direct Current* Tipe *Axial Flux* Konstruksi Rotor Ganda Magnet Permanen". Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat menyelesaikan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penyusunan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Ir. Widyono Hadi, M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Dr. Ir. Satryo Budi Utomo, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota I yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini;
2. Supriyadi Prasetyono, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I, dan Ir. Ike Fibriani, S.T., M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam ujian skripsi ini;
3. Supriyadi Prasetyono, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa;
1. Ayahanda dan ibunda yang telah memberikan dorongan dan doanya demi terselesaikannya skripsi ini;
2. Rekan-rekan mahasiswa Universitas Jember.

Penulis juga menerima segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga skripsi ini dapat bermanfaat.

Jember, Juli 2020

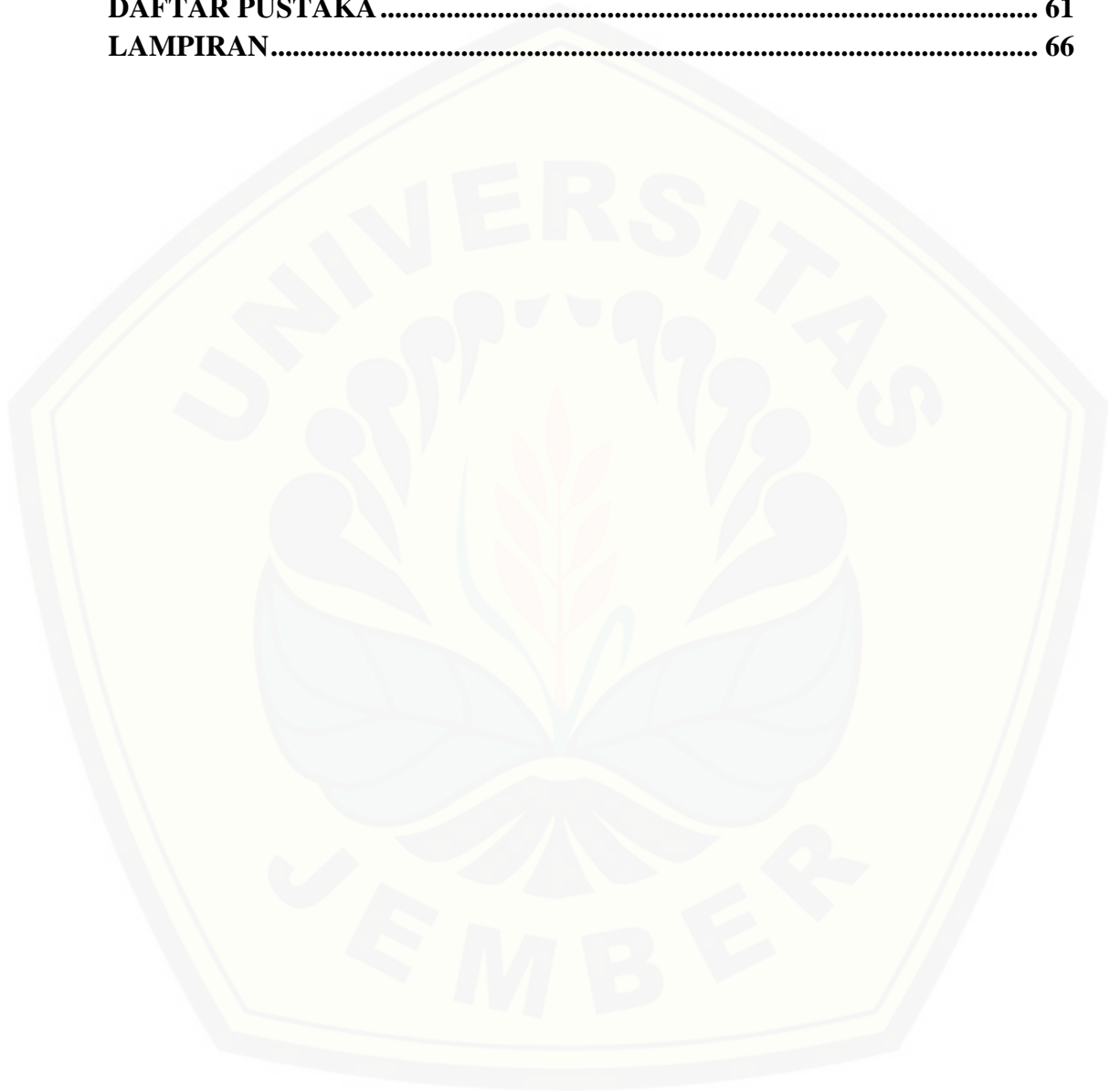
Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN.....	v
HALAMAN PEMBIMBINGAN.....	vi
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	x
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terkait.....	5
2.2 Motor Brushless Direct Current (BLDC).....	6
2.3 Magnet Permanen	7
2.4 Axial flux.....	7
2.5 Sensor Hall Effect	8
2.6 Potensiometer	10
2.7 Kawat tembaga.....	10
2.8 Driver Motor BLDC	11
2.9 Fluks Magnet.....	12
2.10 Kecepatan Putar.....	13
2.11 Persentase Error Kecepatan Putar	13
2.12 Faktor Distribusi.....	13
2.13 Faktor Pitch.....	14
2.14 Faktor Lilitan	14

2.15 Torsi Elektromagnetik.....	14
2.16 Rugi Daya Gesek pada Bearing.....	15
2.17 Rugi Daya Lilitan pada Armature	15
2.18 Rugi Daya Stray	15
2.19 Daya Elektromagnetik.....	15
2.20 Daya Mekanis Motor	15
2.21 Torsi	16
2.22 Daya Masukan.....	16
2.23 Efisiensi	16
2.24 Persamaan Linier Regresi.....	16
2.25 Konfigurasi Rangkaian Hubung Stator Motor AFPM BLDC rotor ganda	17
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1 Metode Penelitian.....	19
3.2 Tempat Penelitian	19
3.3 Waktu Penelitian.....	19
3.4 Jenis dan Pengumpulan Data	20
3.5 Alat dan Bahan.....	22
3.6 Rancangan Penelitian	23
3.7 Blok Diagram dan Perancangan Sistem	23
3.8 Perencanaan Motor	24
3.9 Desain Alat.....	27
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	30
4.1 Perancangan Motor AFPM BLDC Rotor Ganda.....	31
4.2 Spesifikasi Perancangan Motor AFPM BLDC Rotor Ganda.....	32
4.3 Pengujian Motor AFPM BLDC Rotor Ganda	34
4.3.1 Analisis Intensitas Medan Magnet.....	39
4.3.2 Analisis Rugi Daya	39
4.3.3 Analisis Daya Motor.....	43
4.3.4 Analisis Torsi	45
4.3.5 Analisis Efisiensi	47
4.3.6 Analisis Daya Masukan, Torsi, dan Efisiensi Motor AFPM BLDC Rotor Ganda	49
4.3.7 Analisis Persamaan Regresi Linier Kecepatan Putar Terhadap Daya Masukan Motor	50
4.4 Perbandingan Motor AFPM BLDC Rotor Ganda dengan Rotor Tunggal	52
4.4.1 Perbandingan Kecepatan.....	52
4.4.2 Perbandingan Daya	53
4.4.3 Perbandingan Torsi	55

4.4.4 Perbandingan Efisiensi	57
BAB 5. PENUTUP	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN	66



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi Sensor <i>Hall Effect</i> A3144.....	9
Tabel 2.2 Tabel spesifikasi <i>motor driver</i>	12
Tabel 3.1 Parameter perancangan motor AFPM BLDC rotor ganda.....	25
Tabel 4.1 Spesifikasi kawat email.....	31
Tabel 4.2 Spesifikasi motor AFPM BLDC rotor ganda.....	33
Tabel 4.3 Hasil pengujian motor AFPM BLDC rotor ganda	35
Tabel 4.4 Perbandingan kecepatan motor hasil ukur dengan teori	38
Tabel 4.5 Intensitas medan magnet terhadap kecepatan putar motor dan tegangan masukan.....	40
Tabel 4.6 Rugi daya motor.....	42
Tabel 4.7 Hasil analisis daya motor	44
Tabel 4.8 Pengujian torsi motor	46
Tabel 4.9 Pengujian rugi daya motor AFPM BLDC rotor ganda	48
Tabel 4.10 Daya masukan motor dan kecepatan putar serta variabel X dan Y	50
Tabel 4.11 <i>Summary</i> untuk masing-masing variabel	50
Tabel 4.12 Perbandingan kecepatan putar	52
Tabel 4.13 Perbandingan daya motor	54
Tabel 4.14 Perbandingan torsi motor	56
Tabel 4.15 Perbandingan efisiensi	58

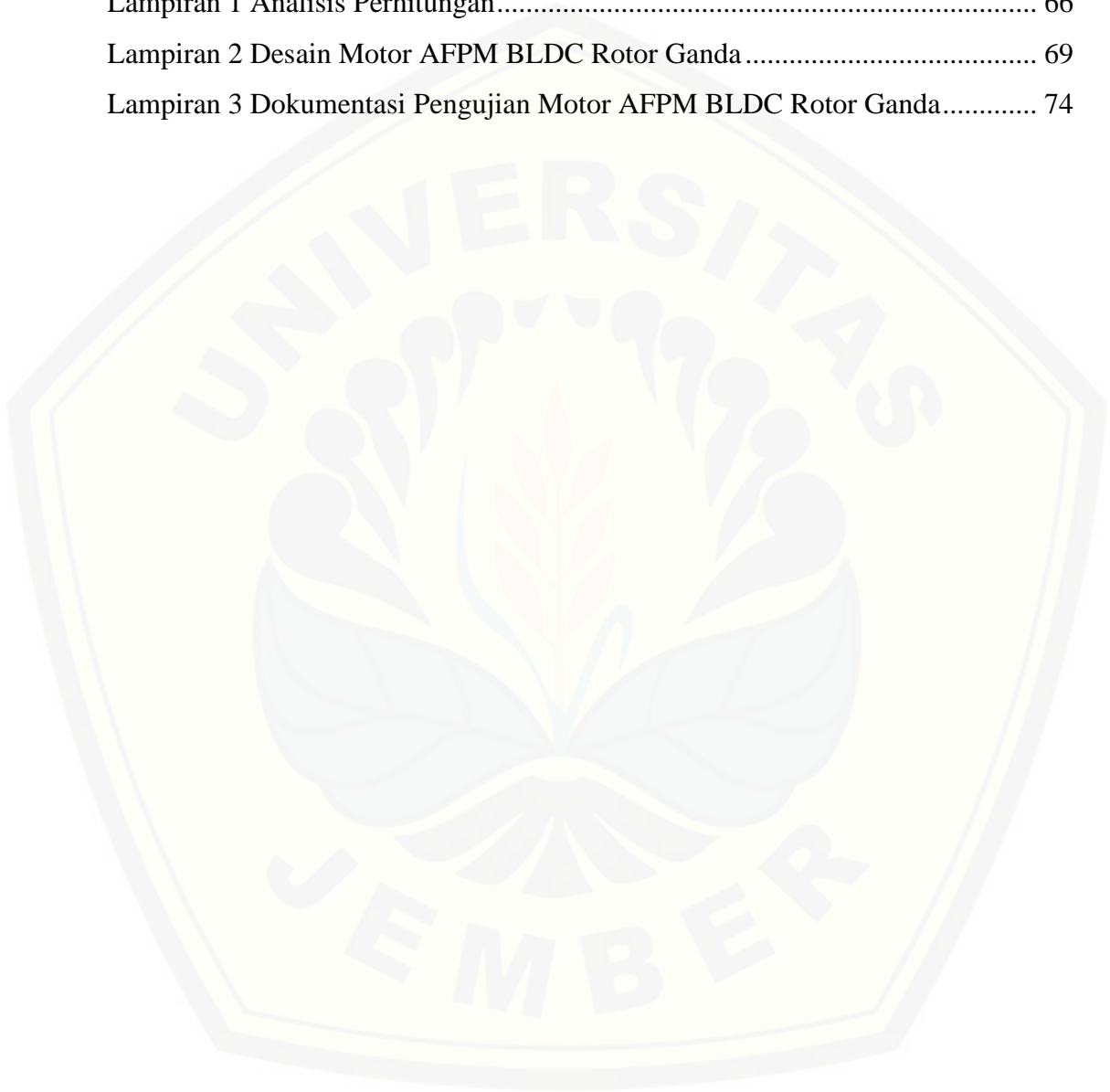
DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Konstruksi Motor BLDC tipe <i>radial flux</i> dan <i>axial flux</i>	7
Gambar 2.2 Magnet neodimium bentuk koin.	7
Gambar 2.3 Konstruksi motor secara fluks axial	8
Gambar 2.4 Rangkaian Sensor Hall <i>Effect</i> tipe A3144.....	9
Gambar 2.5 Sensor <i>Hall Effect</i> tipe A3144.....	9
Gambar 2.6 Potensiometer	10
Gambar 2.7 Kawat tembaga diameter 0.5 mm.....	11
Gambar 2.8 <i>Driver</i> Motor BLDC 3 fasa	11
Gambar 2.9 <i>wiring diagram</i> dari Motor BLDC <i>driver</i>	12
Gambar 2.10 Aliran fluks magnet pada motor.....	17
Gambar 2.11 Konfigurasi rangkaian stator pada motor AFPM BLDC rotor ganda	18
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian	20
Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem	23
Gambar 3.3 <i>Wiring diagram</i> pengujian motor AFPM BLDC rotor ganda.....	24
Gambar 3.4 Pengukuran magnet permanen neodimium.....	26
Gambar 3.5 Desain 3 dimensi motor AFPM BLDC rotor ganda.....	28
Gambar 3.6 Desain stator	28
Gambar 3.7 Desain rotor tampak depan.....	29
Gambar 4.1 Hasil perancangan motor AFPM BLDC rotor ganda.....	31
Gambar 4.2 Desain rotor menggunakan <i>software</i> Autocad	32
Gambar 4.3 Grafik tegangan antar fasa dan arus motor terhadap kecepatan putar motor	36
Gambar 4.4 Grafik kecepatan motor dan frekuensi terhadap tegangan DC masukan <i>driver</i>	37
Gambar 4.5 Grafik kecepatan putar motor dan persentase eror terhadap tegangan masukan.....	39

Gambar 4.6 Grafik intensitas magnet dan kecepatan putar hasil pengukuran terhadap tegangan masukan	40
Gambar 4.7 Grafik rugi daya motor	42
Gambar 4.8 Grafik daya motor terhadap tegangan DC masukan.	45
Gambar 4.9 Grafik torsi terhadap tegangan DC masukan <i>driver</i> motor	47
Gambar 4.10 Grafik daya masukan, daya mekanis, dan efisiensi.....	48
Gambar 4.11 Grafik analisis torsi, daya masukan, dan efisiensi	49
Gambar 4.12 Grafik persamaan regresi linier kecepatan putar terhadap daya masukan.....	51
Gambar 4.13 Grafik perbandingan kecepatan motor	53
Gambar 4.14 Grafik perbandingan daya masukan motor	54
Gambar 4.15 Grafik perbandingan daya mekanis motor	55
Gambar 4.16 Grafik perbandingan torsi elektromagnetik motor	56
Gambar 4.17 Grafik perbandingan torsi motor	57
Gambar 4.18 Grafik perbandingan efisiensi	58

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Analisis Perhitungan.....	66
Lampiran 2 Desain Motor AFPM BLDC Rotor Ganda.....	69
Lampiran 3 Dokumentasi Pengujian Motor AFPM BLDC Rotor Ganda.....	74



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia diperkirakan tidak akan memproduksi minyak lagi apabila perkiraan berdasarkan persediaan minyak sekarang 3.6 miliar barel dengan rata-rata produksi 800.000 barel per hari. Oleh karena itu pengembangan motor listrik menjadi salah satu solusi untuk menghadapi isu persediaan minyak yang akan habis. (Kementerian ESDM, 2019)

Motor listrik menjadi kebutuhan penting dalam bidang penerapan teknologi. Motor listrik banyak diterapkan dalam industri maupun kebutuhan masyarakat. Motor listrik terdapat dua jenis berdasarkan sumber tegangan: motor AC (*Alternating Current*) dan Motor DC (*Direct Current*). Motor listrik DC dibedakan menjadi Motor *Brushed Direct Current* (BDC) dan Motor *Brushless Direct Current* (BLDC). Aplikasi Motor BDC banyak diterapkan pada industri, seperti mesin bubut, *Drills*, *Boring Mills*, dan *Spinning*. Namun motor BDC memiliki kelemahan yaitu terdapat daya dan tegangan hilang pada komutator dan *brush*. Motor BLDC terdapat dua jenis yaitu *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM) dan *Permanent Magnet Brushless Direct Current* PMBLDC. (Sim, 2014; Sim, 2014) Motor BLDC terdapat dua jenis berdasarkan konstruksinya, yaitu bentuk *radial* dan *axial*. Beberapa penelitian sebelumnya membuktikan bahwa motor BLDC bentuk axial flux memiliki torsi yang lebih tinggi daripada bentuk *radial flux*. (Simsir & Ertan, 1999) Selain itu, Motor BLDC bentuk *radial flux* memiliki rugi daya yang lebih tinggi daripada bentuk axial flux. (Qu, Aydin, & Lipo, 2003)

Motor *Brushless Direct Current* (BLDC) digunakan secara luas dalam beberapa bidang: otomotif, dirgantara (*aerospace*), medis, dan automasi industri (Zhao & Yu, 2014). Hal ini disebabkan desain yang simpel dan memiliki kemampuan tinggi untuk berputar pada kecepatan kencang. (Shenov, Latha, Kumar, & Satyendra, 2016) Motor BLDC memiliki banyak keunggulan dan sedikit kekurangan dibandingkan dengan Motor BDC. Kelebihan Motor BLDC yaitu efisiensi lebih tinggi daripada motor BDC karena tidak ada rugi tegangan dan daya

pada komutator dan *brush*, polusi suara yang lebih rendah, dan biaya perawatan (*maintenance*) yang sedikit sehingga memiliki umur pakai yang lebih lama daripada motor BDC. (Yedamale, 2003)

Magnet permanen dari magnet neodimium diketahui memiliki pengaruh terhadap torsi lebih tinggi daripada penggunaan magnet ferrite. (Saxena, 2014) Motor BLDC 3 fasa dapat bekerja salah satunya menggunakan sensor hall effect. (Wu, Wen, & Wong, 2016) Terdapat penelitian sebelumnya bahwa kemampuan sensor *hall effect* sangat efektif untuk bekerja meskipun salah satu sensor *hall effect* rusak atau tidak berfungsi. Motor BLDC memiliki efisiensi daya yang berubah saat kecepatan juga berubah. Apabila kecepatan semakin tinggi maka efisiensi daya motor juga semakin tinggi. (Nama, Gogoi, & Tripathy, 2017)

Pembahasan penelitian ini yaitu rancang bangun motor *three-phase brushless direct current* tipe *axial flux* konstruksi rotor ganda magnet permanen (AFPM BLDC rotor ganda). Motor ini menggunakan magnet permanen jenis neodimium yang memiliki spesifikasi fluks magnet paling besar. Penelitian dilakukan untuk mengetahui kecepatan putar motor (rpm) yang dihasilkan pada variasi tegangan masukan DC 10 V sampai 24 V. Analisis dilakukan berdasarkan data dari nilai kecepatan putar dan pengaruh tegangan masukan terhadap kecepatan putar motor, torsi motor, daya motor, rugi daya motor, daya mekanis motor, dan efisiensi motor.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, dapat dirumuskan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara merancang motor AFPM BLDC rotor ganda?
2. Bagaimana nilai tegangan antar fasa luaran *driver*, arus motor, frekuensi luaran *driver*, kecepatan putar motor, torsi motor, daya motor, rugi daya motor, daya mekanis motor, dan efisiensi motor yang dapat dihasilkan motor AFPM BLDC rotor ganda?
3. Bagaimana perbandingan arus motor, kecepatan putar motor, torsi motor, daya motor, dan efisiensi dari motor *three-phase brushless direct current* tipe *axial flux* konstruksi rotor ganda dengan rotor tunggal?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui cara merancang motor AFPM BLDC rotor ganda.
2. Mengetahui kecepatan putar motor, torsi motor, daya motor, rugi daya motor, daya mekanis motor, dan efisiensi motor yang dapat dihasilkan motor AFPM BLDC rotor ganda.
3. Mengetahui perbandingan arus motor, kecepatan putar motor, torsi motor, daya motor, dan efisiensi dari motor *three-phase brushless direct current tipe axial flux* konstruksi rotor ganda dengan rotor tunggal.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mengetahui tegangan antar fasa luaran *driver*, arus motor, frekuensi luaran *driver*, kecepatan putar motor, torsi motor, daya motor, rugi daya motor, daya mekanis motor, dan efisiensi motor yang dihasilkan motor AFPM BLDC rotor ganda serta pengaruh tegangan masukan terhadap kecepatan motor tersebut.
2. Mengetahui perbandingan arus motor, kecepatan putar motor, torsi motor, daya motor, dan efisiensi dari motor *three-phase brushless direct current tipe axial flux* konstruksi rotor ganda dengan rotor tunggal.
3. Penelitian ini dapat dikembangkan dalam penerapan teknologi bidang motor listrik.

1.5 Batasan Masalah

Untuk lebih mengarahkan pembahasan dalam penelitian ini diperlukan batasan masalah, yaitu:

1. Bahan dasar rotor, stator, dan duduk motor terbuat dari akrilik.
2. Magnet permanen yang digunakan yaitu magnet neodimium berbentuk koin dengan tebal 2 mm dan diameter 15 mm.

3. Konstruksi motor *6 slot 8 pole*: tersusun dari 6 stator dan 8 magnet permanen dengan susunan U-S-U-S.
4. Tidak menggunakan *housing* tertutup pada motor.
5. *Driver* motor yang digunakan yaitu modul DC 12V-36V 15A 500W *Brushless Motor Controller Hall BLDC Driver Board Support Hall Motor*.
6. Sensor *Hall Effect* yang digunakan yaitu *Hall Effect 3144 515*.
7. Variasi tegangan masukan yaitu antara 10 V_{DC} sampai 24 V_{DC}.
8. Pengukuran nilai dan analisis data meliputi tegangan antar fasa luaran *driver*, arus motor, frekuensi *driver*, kecepatan putar motor
9. Perhitungan nilai dan analisis meliputi torsi motor, daya motor, rugi daya motor, daya mekanis motor, dan efisiensi motor.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Terdapat penelitian sebelumnya mengenai motor AFPM BLDC, yaitu: *Speed Control and Electrical Braking of Axial flux BLDC Motor* (P. Awari et al., 2017); dan *Design and Comparison of Radial Flux and Axial flux Brushless DC Motors for Power Tool Applications* (A. Echle et al., 2018)

Penelitian *Speed Control and Electrical Braking of Axial flux BLDC Motor* dihasilkan kesimpulan: motor AFBLDC telah dirancang dan dibuat dengan simulasi dari skema yang diusulkan membuktikan efektivitas pada operasi dengan berbagai kondisi menggunakan teknik PWM sebagai kontrol dihasilkan kecepatan motor selama teknik pengereman mengalami penurunan. Penelitian *Design and Comparison of Radial Flux and Axial flux Brushless DC Motors for Power Tool Applications* dihasilkan kesimpulan: proses desain dan perbandingan antara *radial flux* dengan *axial flux* diketahui bahwa pada simulasi 3-D *Finite Element Method*, *axial flux* BLDC motor memiliki *power density* lebih tinggi 140% daripada *radial flux motor* dan ukuran *axial flux motor* mampu lebih pendek 30%.

Terdapat beberapa penelitian sebelumnya mengenai motor AFPM BLDC, yaitu: Rancang Bangun Motor Searah Tanpa Sikat Satu Fasa (Rizky, 2012); Analisis *Driver* Terhadap Kecepatan Motor *Brushless Direct Current* 1 Fasa Konstruksi *Axial Flux* Celah Udara Tunggal (Afif, 2018); Analisis *Driver H Bridge* pada Motor BLDC Konstruksi *Axial flux* Celah Ganda (Pradana, 2017); dan Motor *Brushless Direct Current* 3 Phase Fluks *Axial* (Reqzy, 2019).

Berdasarkan penelitian berjudul Rancang Bangun Motor Searah Tanpa Sikat Satu Fasa terdapat kesimpulan bahwa semakin besar diameter kawat tembaga (email) maka semakin tinggi nilai kecepatan putar motor.

Berdasarkan penelitian Analisis *Driver* Terhadap Kecepatan Motor *Brushless Direct Current* 1 Fasa Konstruksi *Axial flux* Celah Udara Tunggal terdapat kesimpulan: semakin besar frekuensi yang diatur maka semakin besar kecepatan putar motor BLDC.

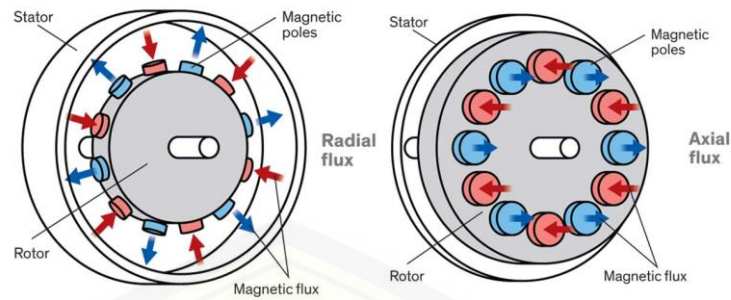
Berdasarkan penelitian Analisis *Driver H Bridge* pada Motor BLDC Konstruksi *Axial flux* Celah Ganda terdapat kesimpulan: semakin banyak jumlah lilitan maka semakin kecil arus maksimal dan dengan tegangan masukan sama yaitu 24 V diperoleh kecepatan putar tertinggi pada lilitan 100, torsi terbesar pada lilitan 100, dan efisiensi terbesar pada lilitan 100.

Berdasarkan penelitian Motor *Brushless Direct Current 3 Phase* Fluks *Axial* diperoleh kesimpulan: motor *brushless direct current 3 phase* fluks *axial* diperoleh persentase eror kecepatan putar yang lebih rendah daripada motor BLDC tiga fase *sensorless tipe out-runner*.

2.2 Motor Brushless Direct Current (BLDC)

Brushless Direct Current Motor (Motor Searah Tanpa Sikat) atau disingkat Motor BLDC merupakan salah satu jenis motor DC yang memiliki efisiensi terbesar. Motor *Direct Current Brush* (BDC) memiliki beragam keunggulan: efisiensi tinggi, mampu untuk turun ukuran (*downsize*), mampu bekerja pada sumber energi listrik, dan biaya manufaktur yang murah. Namun motor BDC memiliki kelemahan seperti bising pada sikat (*brush*), menghasilkan percikan api, dan masa pakai yang terbatas karena memakai sikat. Sehingga mengembangkan motor BLDC menjadi solusi untuk kelemahan tersebut.

Pada motor BLDC, rotor yang terbuat dari magnet permanen, mampu diputar melalui gaya magnet dari rangkaian lilitan pada stator. Jika motor BDC menggunakan sikat dan komutator sebagai *current switching* (saklar arus), maka motor BLDC menggunakan sensor dan rangkaian elektronik untuk *current switching*. Mengembangkan motor BLDC juga ikut serta dalam pengembangan evolusi dari semikonduktor dan teknologi perangkat *peripheral*. Fitur dari motor BLDC yaitu ukuran yang rapat, tidak menimbulkan percikan api dan *noise* komutator, serta mampu digunakan pada berbagai aplikasi seperti pada PC (*Personal Computer*) dan peralatan rumah tangga. (Nidec, 2019)



Gambar 2.1 Konstruksi Motor BLDC tipe *radial flux* dan *axial flux* (Moreels & Leijnen, 2019)

2.3 Magnet Permanen

Magnet neodimium merupakan magnet permanen dengan kekuatan magnetik terkuat. Magnet neodimium terbuat dari paduan neodimium, besi dan boron. Magnet jenis ini merupakan magnet paling kuat daripada magnet jenis lainnya. Kuat medan magnet ini bisa menjadi bahaya dan dapat mengakibatkan kesalahan fatal apabila tidak digunakan secara tepat. (Hill, 2019)



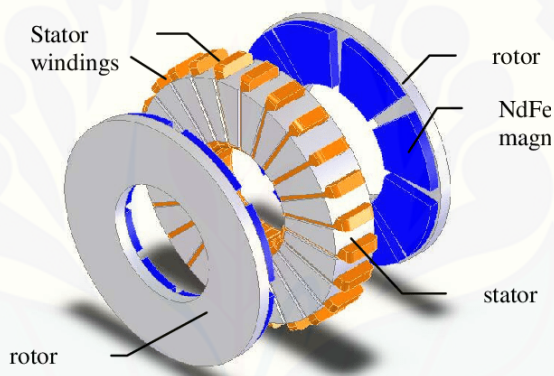
Gambar 2.2 Magnet neodimium bentuk koin (Imagnet, 2018)

2.4 Axial flux

Axial flux didesain oleh Nicola Tesla yang telah diteliti dan mendapat paten pada tahun 1889. Motor *Axial flux* disusun dengan magnet permanen pada permukaan rotor dan stator ditempatkan di depan rotor.

Arah gaya fluks magnet dimulai dari magnet permanen pada rotor kemudian melewati *air gap* (celah jarak) antara stator dan rotor. *Axial flux* memiliki efisiensi lebih besar daripada *radial flux*. Semakin besar diameter rotor yang digunakan, maka semakin besar torsi motor yang dihasilkan. (Clemens, 2018)

Konstruksi *axial flux* terdiri dari rotor, stator, dan *shaft*. Semakin tinggi nilai medan magnet kutub pada *axial flux* maka semakin tinggi juga efisiensi energi dan medan magnet pada motor. Stator difungsikan sebagai tempat untuk lilitan kawat tembaga dan disusun untuk menghasilkan medan magnet yang kemudian mampu memutar rotor. Stator dan rotor dihubungkan porosnya menggunakan shaft sebagai transfer energi mekanik. (Krstic, 2011)



Gambar 2.3 Konstruksi motor *axial flux* (Aydin, 2008)

2.5 Sensor Hall Effect

Sensor *Hall Effect* merupakan alat untuk mendeteksi *magnitude* dari medan magnet. Sensor tersebut mengeluarkan tegangan berdasarkan kekuatan magnet yang terdeteksi. Sensor *Hall Effect* digunakan untuk mendeteksi *proximity*, posisi, dan kecepatan. (Ramsden, 2006)

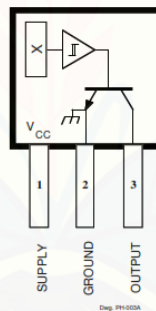
Sensor *Hall Effect* yang digunakan yaitu jenis Sensor A3144. Sensor ini merupakan rangkaian *monolithic* yang terintegrasi dengan spesifikasi magnetik yang lebih kuat. Sensor ini didesain untuk operasi secara berkelanjutan sampai suhu 150°C dan lebih stabil pada perubahan suhu dan tegangan masukan. Setiap sensor

ini terdapat tegangan suplai 4.5 sampai 24 volt dan dioda untuk proteksi tegangan balik.

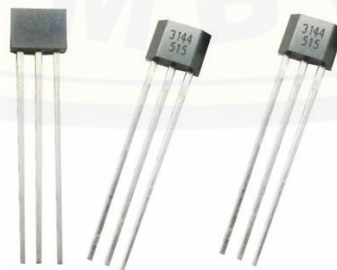
Tabel 2.1 Spesifikasi Sensor *Hall Effect* A3144

<i>Absolute maximum ratings at T_A = + 25°C</i>	
<i>Supply Voltage (V_{CC})</i>	28 V
<i>Reverse Battery Voltage (V_{ACC})</i>	-35 V
<i>Magnetic Flux Density (B)</i>	<i>Unlimited</i>
<i>Output OFF Voltage (V_{out})</i>	28 V
<i>Reserve Output Voltage (V_{out})</i>	-0.5 V
<i>Continuous Output Current (I_{out})</i>	25 mA
<i>Operating Temperature Range (T_A)</i>	
Suffix 'E-'	-40°C to +85°C
Suffix 'L-'	-40°C to +150°C
<i>Storage Temperatur Range (T_s)</i>	-65°C to +170°C

Sumber: *A3144 Hall Effect Sensor Datasheet* (Allegro MicroSystems, Inc, 2005)



Gambar 2.4 Rangkaian Sensor *Hall Effect* tipe A3144 (Allegro MicroSystems, Inc, 2005)



Gambar 2.5 Sensor *Hall Effect* tipe A3144 (Components101, 2018)

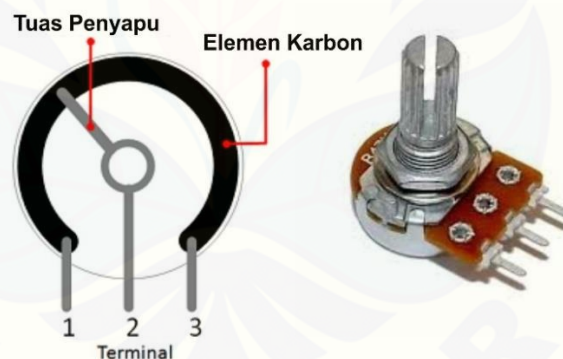
2.6 Potensiometer

Potensiometer adalah salah satu jenis resistor variabel yang nilai resistansi dapat diubah melalui tindakan mekanis dari penggunaannya. Tindakan mekanis tersebut bisa berupa diputar atau digeser, baik itu diputar dengan tangan atau menggunakan alat berupa obeng *trimmer*.

Potensiometer memiliki tiga kaki, dua kakinya terhubung ke sebuah lempengan karbon yang dijadikan elemen utama untuk mengubah nilai hambatan. Selanjutnya satu kakinya yang lain menempel pada elemen karbon dan terhubung ke sebuah tuas penyapu yang bisa digerakkan melalui putaran atau pergeseran.

Dengan cara kerjanya yang bisa mengubah nilai hambatan secara variabel maka potensiometer banyak digunakan pada perangkat elektronika, khususnya yang memerlukan pengaturan dari pengguna. (Purnomo, 2015)

Pada penelitian ini potensiometer dihubungkan ke *motor driver* untuk difungsikan sebagai pengatur *Pulse Width Modulation* (PWM). PWM berfungsi untuk pengatur kecepatan motor dengan mengatur sinyal luaran *motor driver*.



Gambar 2.6 Potensiometer (Purnomo, 2015)

2.7 Kawat tembaga

Kawat tembaga (*copper wire*) merupakan kawat yang digunakan pada manufaktur kabel listrik, kabel tembaga yang konduktivitas dan resistansi termal yang hampir selalu diperlukan. Resistansi dari kawat tembaga tergantung dari jenis material dan suhu penggunaan. Perbedaan kawat tembaga diketahui dari resistansi saat beroperasi pada suhu 20°C. Penerapan kawat tembaga diperlukan pada

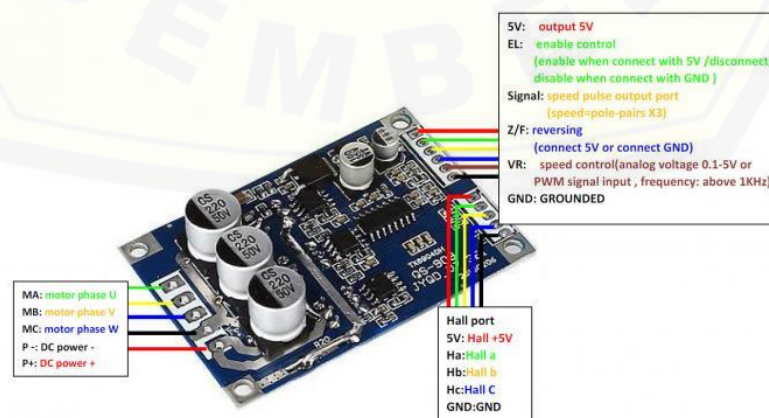
beberapa bidang: *power engineering*, *electrical engineering*, telekomunikasi, otomotif, *shipbuilding*, dan industri lainnya. (Bintire Metal Products Inc, 2020)



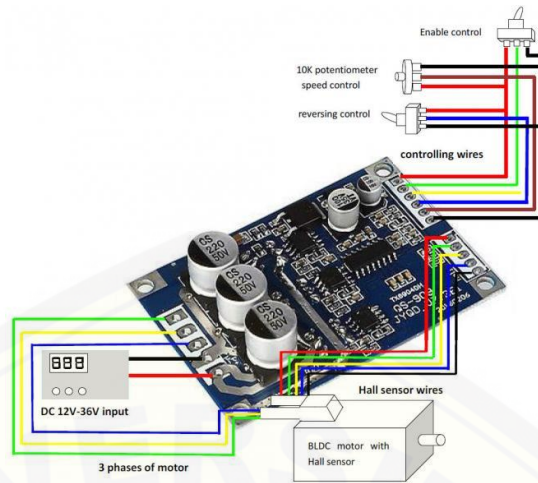
Gambar 2.7 Kawat tembaga diameter 0.5 mm (Findel Education, 2020)

2.8 Driver Motor BLDC

Motor BLDC *driver* difungsikan untuk motor BLDC menggunakan sensor *hall effect*. *Driver* ini perlu menggunakan *heatsink* apabila daya motor lebih dari 60 W. *Driver* ini bekerja pada tegangan DC dan memerlukan tegangan DC operasi 12 sampai 36 V. Daya luaran *driver* ini kurang dari 500 W. Terminal masukan *driver* ini yaitu tegangan suplai dan terminal luaran dihubungkan motor sejumlah tiga sebagai konfigurasi 3 fasa. Terminal *Hall* terdapat beberapa *port*: 5 V_{DC} dan GND sebagai suplai; Ha, Hb, dan Hc sebagai terminal untuk sensor *Hall Effect*. Terminal Potensiometer terdapat beberapa *port*: 5 Vdc dan GND sebagai suplai, EL sebagai *enable control*, *Signal* sebagai sinyal kecepatan, VR sebagai kontrol PWM. (Deng, 2020)



Gambar 2.8 *Driver* Motor BLDC 3 fasa (Deng, 2020)



Gambar 2.9 wiring diagram dari Motor BLDC driver (Deng, 2020)

Tabel 2.2 Tabel spesifikasi motor driver

<i>Operating voltage</i>	DC 12V – 36V
<i>Operating Current</i>	≤ 15A
<i>Driver Power</i>	≤ 500W
<i>Speed Voltage</i>	Input 0.1V-5V or PWM
<i>Operating Temperature</i>	-40-85 °C
<i>Humidity</i>	≤ 90%
<i>Stall protection</i>	Yes
<i>Enable Control</i>	Yes
<i>Over-current protection</i>	Yes
<i>Steering control</i>	Yes
<i>Speed control signal</i>	Yes
<i>Size</i>	63 x 42 x 17mm (L x W x H)

Sumber: (Deng, 2020).

2.9 Fluks Magnet

Fluks pada berbagai magnet berbeda-beda. Perlu dilakukan pengukuran densitas fluks magnet untuk mengetahui nilai fluks magnet. Semakin tinggi nilai densitas fluks magnet maka semakin tinggi nilai fluks magnet. Fluks magnet dihitung melalui hasil pengukuran dari densitas fluks magnet (B_r), diameter luar (D_{ext}) dan diameter dalam rotor (D_{in}) (A). (Gieras, 2010)

$$\Phi_f = B_r L_i \tau \times 2 \quad (\text{Wb}) \dots \dots \dots (2.1)$$

L_i dihitung dari $L_i = 0.5(D_{ext} - D_{in})$ dan τ dari $\tau = 0.5(\frac{D_{av}}{2p})$, D_{av} merupakan hasil dari $D_{av} = 0.5(D_{ext} + D_{in})$.

2.10 Kecepatan Putar

Kecepatan motor pada penelitian ini menggunakan satuan rotasi per menit (rpm). Kecepatan putar motor dapat dihitung dari hasil pengukuran frekuensi luaran *driver* (f), dan jumlah kutub ($2p$). (Chapman, 2012)

$$n_r = 120 \times \frac{f}{2p} \quad (\text{rpm}) \dots \dots \dots (2.2)$$

Berdasarkan nilai kecepatan putar tersebut dapat dihitung nilai kecepatan sinkron sudut dengan satuan r/s, yaitu: (Gieras, 2010)

$$n_s = \frac{2\pi}{60} n_r \quad (\text{r/s}) \dots \dots \dots (2.3)$$

2.11 Persentase Error Kecepatan Putar

Persentase error merupakan nilai absolut dihitung dari selisih hasil pengukuran dengan hasil dari rumus atau teori kemudian dibagi nilai hasil rumus dan dikali 100. (Törnqvist et al, 1985).

Pada penelitian ini perhitungan persentase error dari hasil pengukuran kecepatan putar motor dengan hasil perhitungan rumus kecepatan putar motor.

$$E\% = \left| \frac{\text{Kecepatan Perhitungan} - \text{Kecepatan Pengukuran}}{\text{Kecepatan Perhitungan}} \right| \times 100\% \quad \dots (2.4)$$

2.12 Faktor Distribusi

Faktor distribusi (k_d) dihitung dari nilai jumlah *fasa* motor (m_1), dan jumlah *slot per pole per fasa* (q). Persamaan faktor distribusi sebagai berikut: (Gieras, 2010)

$$k_d = \frac{\sin[\pi/(2m_1)]}{q \sin[\pi/(2m_1q)]} \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

Variabel q merupakan jumlah *slots per pole* per phase dihitung dari rumus $q=s/(2pm)$.

2.13 Faktor *Pitch*

Faktor *pitch* (k_p) motor BLDC rotor ganda 3 fasa dapat dihitung dari persamaan sebagai berikut: (Gieras, 2010)

$$k_p = \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots (2.6)$$

2.14 Faktor Lilitan

Faktor lilitan (k_w) dihitung dari nilai faktor distribusi (k_d) dan faktor *pitch* (k_p). Perhitungan faktor lilitan menggunakan persamaan sebagai berikut: (Gieras, 2010)

$$k_w = k_d k_p \dots\dots\dots (2.7)$$

2.15 Torsi Elektromagnetik

Torsi elektromagnetik merupakan torsi yang dihasilkan oleh induksi *slot* dan *pole*. Torsi elektromagnetik dapat dihitung dari *poles* ($2p$), jumlah fasa (m_1), jumlah lilitan (N_1), *winding factor* (k_w), fluks magnet permanen (Φ_f), dan arus motor (I_a). (Gieras, 2010)

$$T_d = 2 \frac{p}{\pi} m_1 N_1 k_w \Phi_f I_a \quad (\text{Nm}) \dots\dots\dots (2.8)$$

Berdasarkan persamaan tersebut dapat digunakan untuk menghitung nilai yang dibutuhkan untuk mendesain dan merancang motor. Torsi elektromagnetik dapat dihitung juga menggunakan nilai dari daya elektromagnetik dan kecepatan sinkron sudut motor. (Gieras, 2010)

$$T_d = \frac{P_{elm}}{n_s} \quad (\text{Nm}) \dots\dots\dots (2.9)$$

2.16 Rugi Daya Gesek pada *Bearing*

Rugi daya gesek (P_{fr}) merupakan rugi daya yang disebabkan oleh faktor penggunaan bearing, massa rotor (m_r), kecepatan motor (n_r), dan koefisien bearing motor (1 sampai 3). (Gieras, 2010)

$$P_{fr} = k_{fb} m_r n_r \times 10^{-3} \text{W} \quad (\text{Watt}) \dots \dots \dots (2.10)$$

2.17 Rugi Daya Lilitan pada *Armature*

Rugi daya lilitan merupakan rugi yang disebabkan oleh lilitan tembaga pada kumparan. Rugi ini dipengaruhi oleh jumlah fasa motor (m_1), arus motor (I_a), dan resistansi kumparan motor (R_1). (Gieras, 2010)

$$P_a = m_1 I_a^2 R_1 \quad (\text{Watt}) \dots \dots \dots (2.11)$$

2.18 Rugi Daya *Stray*

Rugi daya *stray* masih menjadi permasalahan yang sulit untuk dianalisis menggunakan rumus dengan hasil yang akurat, sehingga untuk sampai sekarang analisis rugi *stray* diasumsikan 1% dari daya mekanis motor (P_m), sehingga: (Gieras, 2010)

$$P_{stray} = 0.01 P_m \quad (\text{Watt}) \dots \dots \dots (2.12)$$

2.19 Daya Elektromagnetik

Daya elektromagnetik merupakan daya dari motor yang dipengaruhi oleh kecepatan sudut (n_s) dan torsi elektromagnetik (T_d). (Gieras, 2010)

$$P_{elm} = 2\pi \frac{n_s}{60} T_d \quad (\text{Watt}) \dots \dots \dots (2.13)$$

2.20 Daya Mekanis Motor

Untuk mengetahui nilai torsi, diperlukan perhitungan mencari nilai daya mekanis. Daya mekanis merupakan daya elektromagnetik (P_{elm}) dikurangi rugi daya gesek pada *bearings* (P_{fr}). Nilai daya mekanis motor dapat dihitung sebagai berikut: (Gieras, 2010)

$$P_m = P_{elm} - P_{fr} \quad (\text{Watt}) \dots \dots \dots (2.14)$$

2.21 Torsi

Torsi motor merupakan torsi yang dihasilkan dari mekanis shaft. Nilai torsi *shaft* motor merupakan torsi yang tidak termasuk rugi-rugi di dalamnya. Nilai torsi motor dapat dihitung dari nilai daya mekanis (P_m) dan kecepatan putar sudut (n_s). (Gieras, 2010)

$$T_{sh} = \frac{P_m}{n_w} \quad (\text{Nm}) \dots \dots \dots (2.15)$$

2.22 Daya Masukan

Untuk mengetahui nilai efisiensi motor, diperlukan perhitungan daya masukan motor. Daya masukan motor merupakan daya elektromagnetik motor (P_{elm}), rugi lilitan (P_a), dan rugi *stray* (P_{stray}). Nilai daya masukan dapat dihitung melalui persamaan berikut: (Gieras, 2010)

$$P_{in} = P_{elm} + P_a + P_{stray} \quad (\text{Watt}) \dots \dots \dots (2.16)$$

2.23 Efisiensi

Efisiensi motor dihitung dari hasil pembagian daya mekanik dengan daya masukan motor. (Zuhal, 2000)

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (2.17)$$

2.24 Persamaan Linier Regresi

Hasil analisis kecepatan putar dan daya masukan motor dapat dikonversi menjadi persamaan linier regresi. Rumus persamaan tersebut sebagai berikut: (Kenney & Keeping, 1962)

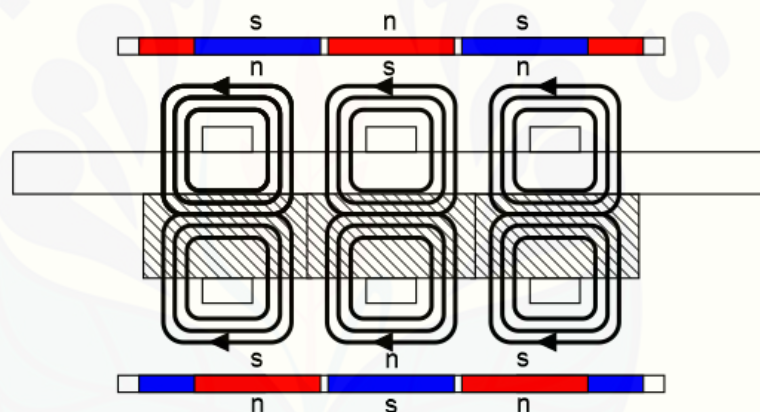
$$y = ax + b \quad \dots \dots \dots (2.18)$$

$$a = \frac{(\Sigma Y)(\Sigma X^2) - (\Sigma X)(\Sigma XY)}{n(\Sigma X^2) - (\Sigma X)^2} \quad \dots \dots \dots (2.19)$$

$$b = \frac{n(\Sigma XY) - (\Sigma X)(\Sigma Y)}{n(\Sigma X^2) - (\Sigma X)^2} \dots\dots\dots (2.20)$$

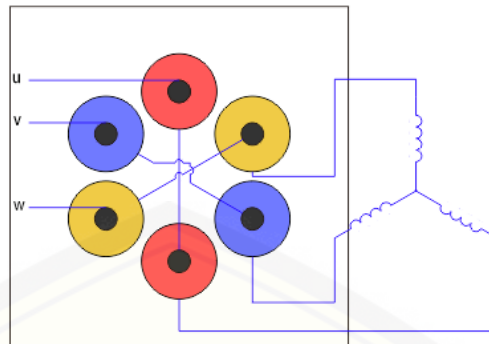
2.25 Konfigurasi Rangkaian Hubung Stator Motor AFPM BLDC rotor ganda

Torsi pada motor berdasarkan *Fleming's left-hand rule*. Apabila pada konduktor dialiri arus listrik, maka gaya akan timbul. (Kenjo & Nagamori, 1985) Berdasarkan Hukum *Fleming Left Hand Rule*, disesuaikan posisi magnet permanen pada rotor agar tercipta medan magnet dan gaya sesuai dengan posisi lilitan. Sehingga dapat terbentuk putaran secara terus menerus akibat dari gaya dan medan magnet yang diciptakan.



Gambar 2.10 Aliran fluks magnet pada motor

Pada motor BLDC ini, total stator yaitu 6 (*slots*). Per dua *slots* dihubungkan dengan luaran *motor driver*. Masing-masing dua *slots* dihubungkan seri dan luaran akhir *slots* dihubungkan *star*. Motor BLDC ini menggunakan rangkaian inverter, sistem kontrol dari *motor driver*. Masukan sistem kontrol *motor driver* berupa tiga sensor *hall effect* pada motor.



Gambar 2.11 Konfigurasi rangkaian stator pada motor AFPM BLDC rotor ganda

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Jenis dasar penelitian yaitu kuantitatif. Penelitian dilakukan dengan pengukuran nilai tegangan masukan, arus masukan, kecepatan putar motor, tegangan *line-to-line* motor, arus motor, frekuensi motor, dan efisiensi motor. Metode penelitian ini akan menjelaskan tempat, waktu, ruang lingkup, jenis data, sumber data, dan metode penelitian yang dilaksanakan.

3.2 Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Konversi Energi Listrik Fakultas Teknik Universitas Jember beralamat Jalan Slamet Riyadi No. 62 Kecamatan Patrang Kabupaten Jember. Pelaksanaan penelitian direncanakan mulai bulan Desember 2019 sampai Juni 2020.

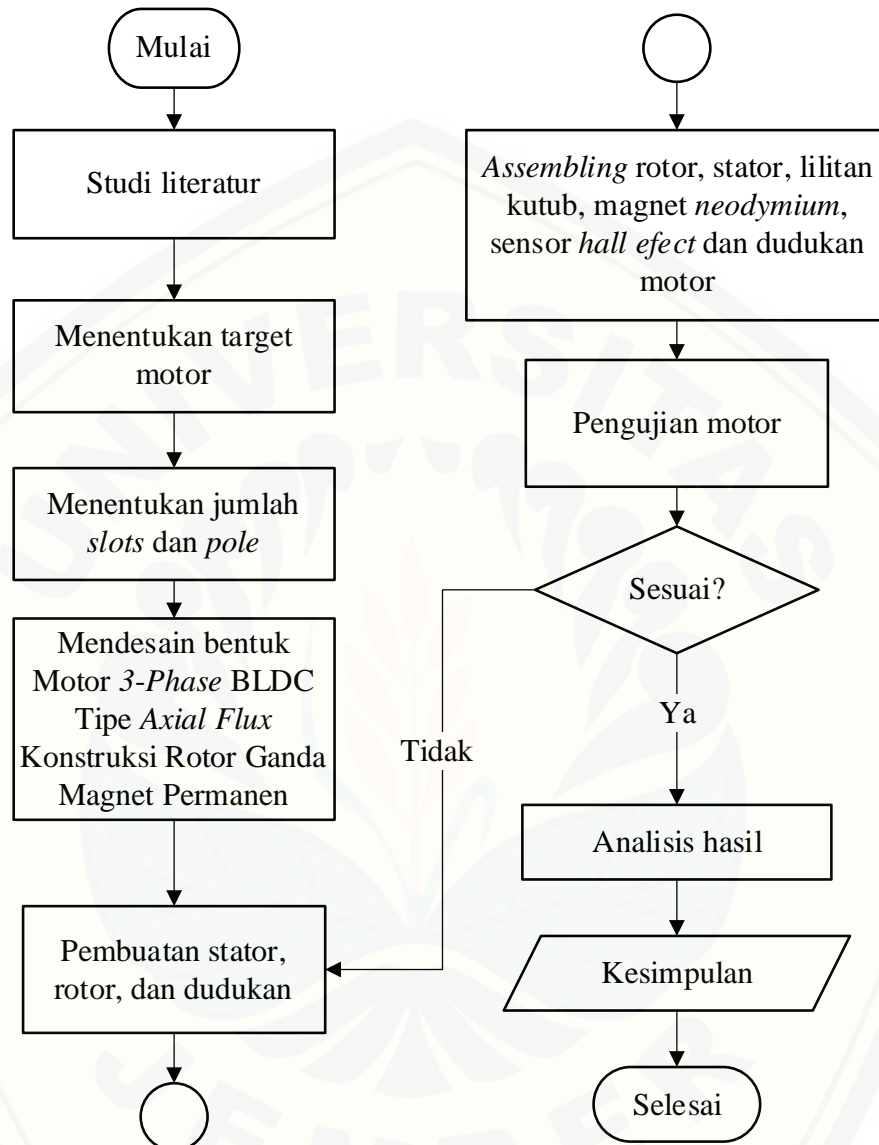
3.3 Waktu Penelitian

Kegiatan	Bulan/Minggu ke-																				
	Desember		Januari				Maret			April				Mei				Juni			
	1	2	1	2	3	4	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Studi literatur	■	■																			
Perancangan dan desain			■	■	■	■	■	■	■												
Penelitian dan pengujian			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Analisis data																		■	■	■	■
Pembahasan dan kesimpulan																				■	■

Keterangan:

■ : Kegiatan dilaksanakan.

3.4 Jenis dan Pengumpulan Data



Gambar 3.1 Flowchart penelitian

Tahapan yang dilakukan pada penelitian rancang bangun motor AFPM BLDC rotor ganda:

1. Studi literatur

Tahap ini bertujuan mencari data dari buku, internet, jurnal internasional, jurnal nasional, dan *electronic book* untuk mengetahui karakteristik komponen, prinsip kerja, teori konsep dasar, dan penelitian terkini mengenai BLDC. Diharapkan dengan literatur yang diperoleh dapat memberikan arahan dalam

penelitian BLDC ini. Data dari sumber tersebut diperlukan untuk menunjang penelitian dan pengembangan alat yang diteliti. Data yang diperoleh dari studi literatur ini merupakan data sekunder, karena berdasarkan data dari berbagai referensi bukan pengambilan data di lapangan.

2. Menentukan target motor

Kecepatan motor ditentukan untuk dijadikan dasar pertimbangan perhitungan menentukan jumlah lilitan yang digunakan pada masing-masing kumparan.

3. Menentukan jumlah *slots* dan *pole*

Slots dan *pole* ditentukan untuk selanjutnya sebagai pertimbangan target torsi dan kecepatan motor. Penentuan *slot* dan *pole* berdasarkan sumber pustaka yang sesuai dengan motor 3 fasa.

4. Mendesain bentuk motor AFPM BLDC rotor ganda

Penelitian dilakukan dengan pengambilan data secara langsung. Tempat penelitian berada di Laboratorium Konversi Energi Listrik Universitas Jember. Proses penelitian dilaksanakan untuk mengukur nilai tegangan, arus, kecepatan putar, dan frekuensi motor BLDC. Data hasil penelitian ini merupakan data primer karena dilaksanakan observasi secara langsung di lapangan.

5. Pembuatan stator, rotor, dan dudukan

Tempat stator, piringan rotor, dan dudukan motor terbuat dari akrilik. Pembuatan dilakukan dengan memotong akrilik menggunakan mesin potong akrilik. Mesin potong akrilik memotong (*cutting*) sesuai dengan desain yang telah dibuat. Desain perlu dikonversi ke *software* CorelDraw untuk konfigurasi mesin potong akrilik.

6. *Assembling* rotor, stator, lilitan kutub, magnet neodimium, sensor *hall effect* dan dudukan motor

Assembling dilakukan untuk menyatukan bagian-bagian motor: rotor, stator, dan dudukan. *Assembling* tiga jenis bahan tersebut menggunakan baut dan mur.

7. Pengujian motor

Pengujian motor BLDC dilakukan untuk tegangan antar fasa luaran *driver*, arus motor, frekuensi luaran *driver*, kecepatan putar motor, torsi motor, rugi daya motor, daya mekanis motor, dan efisiensi motor.

8. Analisis data

Tahap untuk membuat analisis terhadap data yang diperoleh yang dan membuat pembahasan mengenai data hasil pengujian.

9. Kesimpulan

Berdasarkan data dan percobaan dapat diambil kesimpulan serta memberikan saran untuk pengembangan, penyempurnaan alat, dan perbaikan kekurangan.

3.5 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Alat:

1. *Tachometer* nomor pabrik KW0600563 *Non-contact Test Range* 2 rpm sampai 99999 rpm.
2. *Avometer* tipe digital multimeter nomor pabrik 10037774 spesifikasi AC *Voltage* 2 V/20 V/200 V/750 V, AC *Current* 2 mA/20 mA/200 mA/10 A, dan DC *Current* 200 μ A/2 mA/20 mA/200 mA/10 A.
3. *Oscilloscope* tipe digital nomor SKU 10162915.
4. *DC Power Supply* Model GPS-3030 spesifikasi *Input Voltage* (AC) 220 V, *Output Voltage* (DC) 0 V sampai 30 V, dan *Output Current* (DC) 0 A sampai 5 A.
5. *BLDC Motor Driver* tipe JYQD-V7.3E1 spesifikasi tegangan DC 12 V sampai 36 V, arus DC maksimal 15 A, dan daya maksimal 500 W.
6. *Teslameter* Leybold Didactic tipe *bench* konfigurasi batas maksimal 20 mT, 200 mT, dan 2000 mT
7. *ESR Meter* M328 Atmega328 spesifikasi resistansi 0,1 Ω sampai 50M Ω .

Bahan:

1. Magnet permanen neodimium bentuk koin diameter 15 cm dan tebal 2 mm.
2. Sensor *hall effect* 3144.
3. Potensiometer resistansi maksimal 10k Ω .
4. Kawat *email* diameter 0.46 mm.
5. *Bearing* diameter 1.5 cm.
6. Spul logam diameter 2 cm.

7. *Bearing* diameter 1,6 cm.
8. Baut diameter 3,5 mm.
9. Mur segi enam ukuran diameter dalam 3,5 mm.
10. Akrilik ukuran tebal 5 mm dan 2 mm.

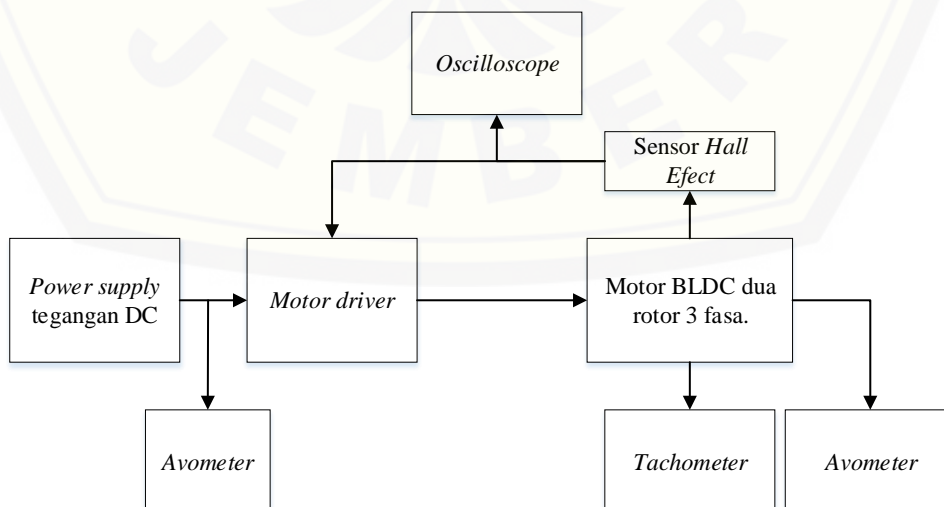
3.6 Rancangan Penelitian

Penelitian ini melakukan rancang bangun motor AFPM BLDC rotor ganda. Rancang bangun dilakukan untuk pembuatan motor BLDC tiga fasa.

Perancangan dilakukan dengan menghitung variabel yang ditargetkan yaitu kecepatan. Kemudian dihitung spesifikasi untuk mencapai target tersebut, sehingga diketahui jumlah lilitan yang diperlukan. Berdasarkan hasil perancangan dapat dilakukan desain motor, menggunakan *software* AutoCad. Berdasarkan hasil desain tersebut dapat dilakukan *cutting* akrilik.

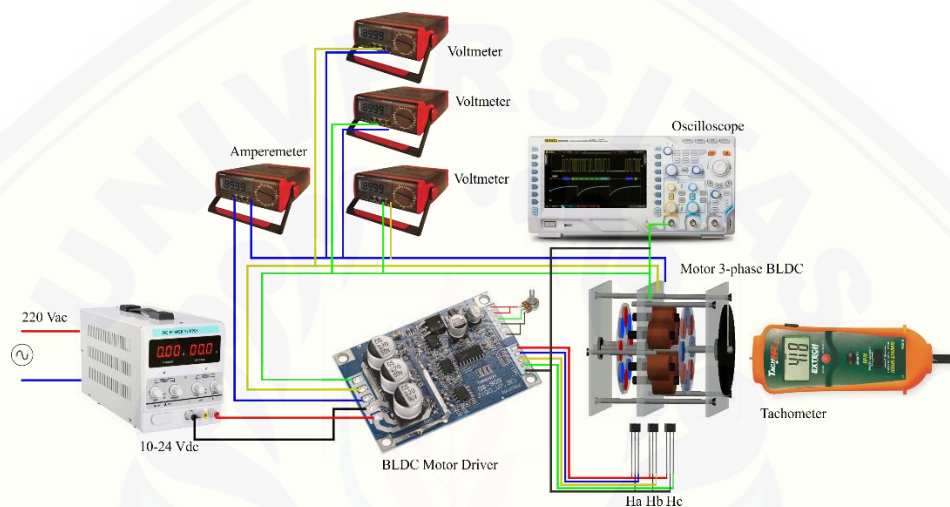
Pengujian dilakukan untuk nilai data kecepatan putar motor, arus motor, tegangan antar fasa motor, dan frekuensi motor. Berdasarkan nilai tersebut dapat dihitung nilai, torsi motor, daya motor, rugi daya motor, daya mekanis motor, dan efisiensi motor.

3.7 Blok Diagram dan Perancangan Sistem



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem

Prinsip kerja dari penelitian ini digambarkan pada blok diagram di atas. Motor menggunakan sumber tegangan DC dari *power supply*. Motor BLDC tipe *axial flux* konstruksi rotor ganda magnet permanen terdiri dari dua rotor di sebelah luar dan satu stator di bagian dalam. Pada stator terdapat delapan kutub dan pada masing-masing rotor terdapat delapan magnet permanen, sehingga total menggunakan 16 magnet permanen. *Avometer* digunakan untuk mengukur tegangan dan arus pada *motor driver*. Pengukuran frekuensi menggunakan *oscilloscope*.



Gambar 3.3 Wiring diagram pengujian motor AFPM BLDC rotor ganda

3.8 Perencanaan Motor

Pada percobaan pengaruh slot terhadap motor BLDC diketahui motor BLDC dengan 6 *slots* diperoleh kecepatan lebih tinggi daripada motor BLDC 12 *slots* yaitu 2831 rpm dan motor BLDC 4 *slots* yaitu 2861 rpm. (Atmaja, 2018)

Jumlah poles pada motor BLDC dengan konstruksi 6 *slots* yaitu 8 *poles*. Konstruksi tersebut menghasilkan *air gap* kecil yaitu 0.75. (Hendershot Jr & Miller, 1994)

Sehingga berdasarkan penelitian dan sumber tersebut, konstruksi motor yang digunakan yaitu 6 *slots* 8 *poles*. Motor ditargetkan sebagai mesin pendingin pada panel kontrol kelistrikan, sehingga diperlukan daya yang kecil dengan kecepatan tinggi. Motor BLDC direncanakan dapat berputar sampai kecepatan 2000 rpm, daya masukan 22 W, daya *driver* motor sebesar 7 W sehingga daya mekanis 15 W. Berdasarkan daya masukan 22 W, dapat dihitung kebutuhan arus masukan yaitu:

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}}$$

$$I_{in} = \frac{22 \text{ W}}{22 \text{ V}}$$

$$I_{in} = 0.92 \text{ A}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut, kebutuhan arus masukan yang diperlukan sekitar 0.92 A.

Tabel 3.1 Parameter perancangan motor AFPM BLDC rotor ganda

Keterangan	Nilai
Daya masukan	22 W
Kecepatan	2000 rpm
<i>Slots</i>	6
<i>Poles</i>	8
Fasa	3 fasa

Magnet permanen yang digunakan pada rotor yaitu jenis neodimium. Berdasarkan target tersebut, dapat dilakukan perhitungan untuk menentukan jumlah lilitan per kumparan/*slots*.

Perlu diasumsikan nilai daya elektromagnetik sama dengan daya mekanis, $P_{elm} \approx P_m$. Hal ini disebabkan belum diketahui rugi daya motor tersebut. Kemudian dapat dihitung nilai torsi elektromagnetik (T_d) sebagai berikut:

$$T_d = \frac{P_{elm}}{n_s}$$

$$T_d = \frac{15 \text{ W}}{2\pi \left(\frac{2000 \text{ rpm}}{60}\right)}$$

$$T_d = 0.072 \text{ Nm}$$

Kemudian dapat dihitung nilai k_w dan Φ_f . Nilai k_w dapat dihitung dari nilai k_d dan k_p . Nilai k_d sebagai berikut:

$$k_d = \frac{\sin\left[\frac{\pi}{2m_1}\right]}{q \sin\left[\frac{\pi}{2m_1q}\right]}$$

$$k_d = \frac{\sin \left[\frac{\pi}{2m_1} \right]}{q \sin \left[\frac{\pi}{2m_1 \left(\frac{2}{2pm_1} \right)} \right]}$$

$$k_d = \frac{\sin \left[\frac{\pi}{2 \times 3} \right]}{q \sin \left[\frac{\pi}{2 \times 3 \times \left(\frac{2}{8 \times 3} \right)} \right]}$$

$$k_d = 2.31$$

Kemudian dihitung nilai faktor *pitch*, sebagai berikut:

$$k_p = \sin \left(\frac{\pi}{2} \right)$$

$$k_p = \sin \left(\frac{\pi}{2} \right)$$

$$k_p = \sin \left(\frac{\pi}{2} \right)$$

$$k_p = 1$$

Berdasarkan nilai k_d dan k_p dapat dihitung nilai faktor lilitan (k_w), sebagai berikut:

$$k_w = k_d k_p$$

$$k_w = 2.31 \times 1$$

$$k_w = 2.31$$



Gambar 3.4 Pengukuran magnet permanen neodimium

Kemudian dapat dihitung nilai fluks magnet berdasarkan hasil pengukuran densitas fluks magnet, sebagai berikut:

$$L_i = 0.5(D_{ext} - D_{in})$$

$$L_i = 0.5(0,03 \text{ m} - 0.015 \text{ m})$$

$$L_i = 0.0075 \text{ m}$$

$$\tau = \frac{\pi(D_{av})}{2p}$$

$$\tau = \frac{\pi(0.5(0.03 \text{ m} + 0.015 \text{ m}))}{8}$$

$$\tau = 0.0088 \text{ m}$$

$$\Phi_f = B_r L_i \tau \times 2$$

$$\Phi_f = 0.089 \text{ T} \times (0.0075 \text{ m} \times 0.0088 \text{ m}) \times 2$$

$$\Phi_f = 0.000012 \text{ Wb}$$

Kemudian dapat dihitung lilitan yang dibutuhkan, sebagai berikut:

$$N_1 = \frac{T_d \pi}{2p m_1 k_w \Phi_f I_a}$$

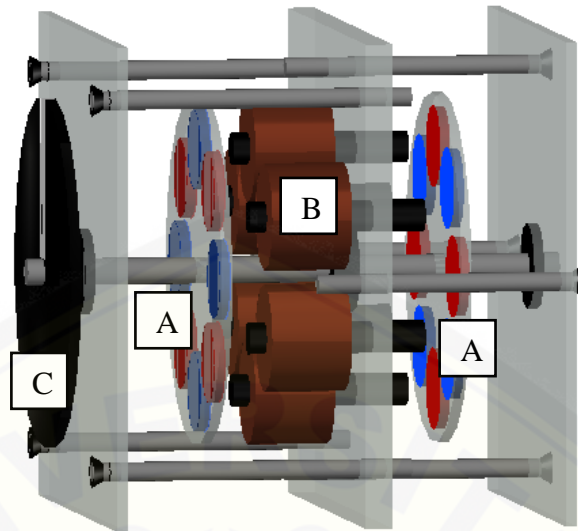
$$N_1 = \frac{0.072 \text{ Nm} \times \pi}{8 \times 3 \times 0.000012 \text{ Wb} \times 2 \text{ A}}$$

$$N_1 = 175.5$$

Sehingga dapat diketahui jumlah lilitan yang diperlukan 175.5 lilitan.

3.9 Desain Alat

Motor BLDC tersusun dari 6 *slots* 8 *poles*: terdiri dari 6 *slots* masing-masing terbuat dari lilitan kawat tembaga dan 8 kutub terdiri dari magnet permanen bentuk koin. Di bawah ini merupakan desain tiga dimensi dari motor BLDC:



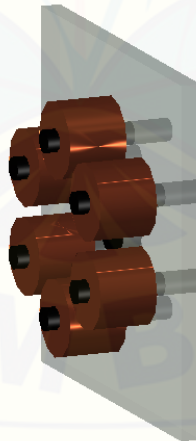
Gambar 3.5 Desain 3 dimensi motor AFPM BLDC rotor ganda

Keterangan:

A: rotor motor

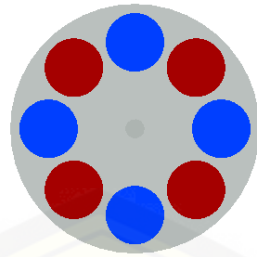
B: stator motor

C: piringan untuk pengukuran kecepatan putar motor (rpm).



Gambar 3.6 Desain stator

Motor BLDC tersusun dari stator dengan 6 *slots*. *Slots* terbuat dari spul logam. Masing-masing *slots* terdiri dari lilitan kawat tembaga. *Slots* dipasang pada dudukan stator menggunakan baut sebagai konduktor.



Gambar 3.7 Desain rotor tampak depan

Rotor motor BLDC terbuat dari piringan akrilik yang tersusun dari 8 kutub (*pole*) magnet permanen jenis neodimium. Magnet disusun secara U-S-U-S. Warna merah dan biru digambarkan sebagai kutub magnet: merah untuk kutub utara dan biru untuk kutub selatan.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian motor *three-phase brushless direct current* tipe *axial flux* konstruksi rotor ganda magnet permanen diketahui beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, untuk merancang motor AFPM BLDC rotor ganda perlu menentukan target daya dan kecepatan motor. Kemudian mengukur nilai densitas fluks magnet dari magnet yang digunakan. Sehingga dari target dan nilai densitas magnet tersebut dapat dihitung lilitan yang diperlukan untuk motor BLDC.
2. Berdasarkan pengujian motor AFPM BLDC rotor ganda diperoleh bahwa kecepatan tertinggi terukur 2365 rpm, lebih tinggi 365 rpm dari target perancangan yaitu 2000 rpm. Torsi motor dari torsi *shaft* tertinggi terhitung 0.057 Nm. Daya mekanis tertinggi terhitung 14.06 W. Efisiensi tertinggi diperoleh 71.30%.
3. Hasil perbandingan motor AFPM BLDC rotor ganda dengan motor AFPM BLDC rotor tunggal diperoleh bahwa performa kecepatan, torsi *shaft*, daya mekanis, dan efisiensi motor AFPM BLDC rotor ganda lebih tinggi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian motor *three-phase brushless direct current* tipe *axial flux* konstruksi rotor ganda magnet permanen terdapat beberapa yang perlu diperbaiki, yaitu:

1. Memperbaiki konstruksi motor sehingga diperoleh rugi daya total yang rendah. Apabila rugi daya total rendah maka akan diperoleh efisiensi motor yang tinggi. Penelitian pada rugi daya dari rugi tembaga perlu dilakukan untuk mengetahui kawat email yang paling rendah rugi tembaga sehingga mengurangi rugi daya total motor.

2. Melakukan perancangan motor AFPM BLDC *multi-rotor* dan *multi-stator* untuk mengetahui performa motor tersebut yang kemudian dapat dibandingkan dengan motor AFPM BLDC rotor ganda dan motor AFPM BLDC rotor tunggal.
3. Motor yang telah diteliti ini tidak disarankan untuk dijadikan sebagai mesin penggerak seperti transportasi. Hal ini disebabkan torsi motor yang dihasilkan sangat kecil.
4. Menambahkan mekanisme pendingin pada motor AFPM BLDC sehingga motor tidak dipengaruhi panas. Selanjutnya dapat dilakukan pengujian perbedaan motor BLDC dengan pendingin dan motor BLDC tanpa pendingin.

DAFTAR PUSTAKA

- Afif, R. (2018). *Analisis Driver Terhadap Kecepatan Motor Brushless Direct Current Satu Fasa Konstruksi Axial Flux Celah Udara Tunggal*. Jember: Universitas Jember.
- Alberti, L., & Berardi, G. (2018). Design of a Low Power Synchronous Motor for High Efficiency Applications. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Alexandroupoli: IEEE.
- Allegro MicroSystems, Inc. (2005). *A3141, A3142, A3143, and A3144: Sensitive Hall Effect Switches for High-Temperature Operation*. Massachusetts: Allegro MicroSystems, Inc.
- Atmaja, S. D. (2018). *Rancang Bangun Motor Searah Tanpa Sikat Satu Fasa (BLDC) Konstruksi Axial Flux (Pancake) dengan Celah Udara Tunggal*. Jember: Universitas Jember.
- Awari, P., Sawarkar, P., Agarwal, R., Khergade, A., & Bodkhe, S. (2017). Speed Control and Electrical Braking of Axial Flux BLDC Motor. *2017 6th International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances (CERA)* (hal. 297-302). Roorkee: IEEE.
- Aydin, M. (2008). Magnet Skew In Cogging Torque Minimization of Axial Gap Permanent Magnet Motors. *2008 18th International Conference on Electrical Machines*. Vilamoura: IEEE.
- Bintire Metal Products Inc. (2020). *Copper wire – General-Purpose, Low Temperature Thermocouple, Soft, Solid*. Dipetik November 19, 2019, dari Bintire: <https://www.bindingwire.org/binding/copper-wire.html>
- Chapman, S. J. (2012). *Electric Machinery Fundamentals, 5th Edition*. Melbourne: McGraw-Hill.
- Clemens, K. (2018, Mei 23). *A New Generation of Axial Flux EV Motors*. Dipetik November 28, 2019, dari Magnax: <https://www.magnax.com/magnax->

blog/a-new-generation-of-axial-flux-ev-motors#:~:targetText=An%20axial%20flux%20motor%20places,gap%20between%20rotor%20and%20stator.

Components101. (2018, Januari 3). *A3144 Hall Effect Sensor*. Diambil kembali dari Components 101: <https://components101.com/a3144-hall-effect-sensor>

Deng, A. (2020). *12V-36V, 15A 500W BLDC Motor Driver*. Diambil kembali dari OWO International Trading: <http://indonesian.brushless-dcmotor.com/sale-10154869-12v-36v-15a-500w-brushless-dc-motor-driver-hall-sensor-brushless-dc-motor-speed-controller.html>

Echle, A., Neubauer, A., & Parspour, N. (2018). Design and Comparison of Radial Flux and Axial Flux Brushless DC Motors for Power Tool Applications. *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)* (hal. 125-130). Alexandroupoli: IEEE.

Findel Education. (2020). *Bare Copper Wire*. Dipetik November 28, 2019, dari Findel Education International Division: https://skrzynia-skarbow.com/en_US/p/Copper-wire-0.5-mm-5-kilos/374

Gieras, J. F. (2010). *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications*. Boca Raton: CRC Press.

Hendershot Jr, J. R., & Miller, T. (1994). *Design of Brushless Permanent-Magnet Motor*. Oxford: Oxford University Press.

Hill, A. (2019, Oktober 29). *What are Neodymium Magnets?* (B. Harris, Editor) Dipetik November 28, 2019, dari Wisegeek: <https://www.wisegeek.com/what-are-neodymium-magnets.htm>

Imagnet. (2018). *Permanent Magnets: Sintered NdFeb Magnet*. Diambil kembali dari Dailymag: <http://www.magnet-ndfeb.com/sintered-ndfeb-magnet.html>

Kementerian ESDM. (2019, Mei 25). *Produksi Minyak Indonesia Terancam Habis 12 Tahun Lagi, Pemerintah Genjot Eksplorasi*. Dipetik November 28, 2019, dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia: <https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/direktorat-jenderal-minyak-dan-gas-bumi/produksi-minyak-indonesia-terancam-habis-12-tahun-lagi-pemerintah-genjot-eksplorasi>

- Kenjo, T., & Nagamori, S. (1985). *Permanent-Magnet and Brushless DC Motors*. Oxford: Oxford University Press.
- Kenney, J. F., & Keeping, E. S. (1962). *Linear Regression and Correlation*. Princeton: Van Nostrand.
- Kim International Inc. (2019). *Technical Standard Data of Litz Wire Products*. Diambil kembali dari hflitzwire: <https://www.hflitzwire.com/standard-of-litz-wire/>
- Krstic, M. (2011, Desember 21). *Axial Flux Motor*. Dipetik November 28, 2019, dari Flyingv: http://flyingv.ucsd.edu/nima/Axial_Flux/Axial_Flux.html
- Lee, Y. K., & Kim, J. K. (2019). Power Efficiency Analysis of a Three-phase Inverter for a BLDC Motor Drive with Varying Speeds and Load Torques. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*. Macao: IEEE.
- Moreels, D., & Leijnen, P. (2019, September 30). *This Inside-Out Motor for EVs Is Power Dense and (Finally) Practical*. Dipetik November 28, 2019, dari IEEE Spectrum: <https://spectrum.ieee.org/transportation/alternative-transportation/this-insideout-motor-for-evs-is-power-dense-and-finally-practical>
- Nama, T., Gogoi, A. K., & Tripathy, P. (2017). Application of a Smart Hall Effect Sensor System for 3-phase BLDC Drives. *2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)* (hal. 208-212). Ottawa: IEEE.
- Nidec. (2019). *Brushless DC motors exhibit reduced energy use, long life, low noise, compact size and light weight characteristics*. Dipetik November 2019, 28, dari Nidec Corporation: <https://www.nidec.com/en/technology/capability/brushless>
- Pradana, D. (2017). *Analisis Driver H Bridge pada Motor BLDC Konstruksi Axial flux Celah Ganda*. Jember: Universitas Jember.
- Purnomo, E. (2015, Mei 30). *Potensiometer: Pengertian, Fungsi Dan Cara Kerjanya*. Dipetik November 20, 2019, dari Nulis Ilmu: <https://nulis-ilmu.com/potensiometer/>

- Qu, R., Aydin, M., & Lipo, T. (2003). *Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines*. Madison: IEEE.
- Ramsden, E. (2006). *Hall-Effect Sensors: Theory and Applications*. Elsevier Inc.
- Reqzy, M. (2019). *Motor Brushless Direct Current 3 Phase Fluks Axial*. Jember: Universitas Jember.
- Rizky, A. (2012). *Rancang Bangun Motor Searah Tanpa Sikat Satu Fasa*. Jember: Universitas Jember.
- Saxena, A. (2014). Performance and Cost Comparison of PM BLDC motors for Ceiling Fan. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. Mumbai.
- Shenov, Latha, K., Kumar, & Satyendra, M. (2016). Design Topology and Electromagnetic Field Analysis of Permanent Magnet Brushless DC Motor for Electric Scooter Application. *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*. Chennai: IEEE.
- Sim, Y. N. (2014). Coupled Analysis of Brushless DC Motor Using Finite Elements Method & Back Electromotive Force Detecting Electrical Circuits. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. Berlin: IEEE.
- Simsir, N. B., & Ertan, H. B. (1999). A Comparison Of Torque Capabilities Of Axial Flux And Radial Flux Type Of Brushless DC (BLDC) Drives For Wide Speed Range Applications. *1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. Hongkong: IEEE.
- Wu, H., Wen, M., & Wong, C. (2016). Speed Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors Based on DSP. *2016 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)*. Taiwan: IEEE.
- Yedamale, P. (2003). *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals*. Diambil kembali dari Microchip Technology Inc: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00885a.pdf>
- Zhao, J., & Yu, Y. (2014, Juli 5). *Brushless DC Motor Fundamentals Application Note*. Diambil kembali dari Monolithic Power:

https://www.monolithicpower.com/pub/media/document/Brushless_DC_Motor_Fundamentals.pdf

Zuhal. (2000). *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.



LAMPIRAN

Lampiran 1 Analisis Perhitungan

Tegangan masukan 10.6 V

a. Kecepatan motor

$$n_r = 120 \frac{f}{2p}$$

$$n_r = 120 \frac{68}{8}$$

$$n_r = 1031 \text{ rpm}$$

b. Persentase eror kecepatan

$$E\% = \left| \frac{\text{Kecepatan Perhitungan} - \text{Kecepatan Pengukuran}}{\text{Kecepatan Perhitungan}} \right| \times 100\%$$

$$E\% = \left| \frac{1031 \text{ rpm} - 1020 \text{ rpm}}{1031 \text{ rpm}} \right| \times 100\%$$

$$E\% = 1.08\%$$

c. Torsi elektromagnetik

$$T_d = 2 \frac{p}{\pi} m_1 N_1 k_w \Phi_f I_a$$

$$T_d = 2 \frac{4}{\pi} 3 \times 175.5 \times 2 \times 0.000012 \text{ Wb} \times 0.97 \text{ A}$$

$$T_d = 0.035 \text{ Nm}$$

d. Daya elektromagnetik

$$P_{elm} = 2\pi \frac{n_r}{60} T_d$$

$$P_{elm} = 2\pi \frac{(1031 \text{ rpm})}{60} 0.04 \text{ Nm}$$

$$P_{elm} = 4.25 \text{ W}$$

e. Rugi daya gesekan *bearing*

$$P_{fr} = k_{fb} m_r n_r \times 10^{-3} W$$

$$P_{fr} = 3 \times 0.1 \text{ kg} \times 1031 \text{ rpm} \times 10^{-3} W$$

$$P_{fr} = 0.31 W$$

f. Daya mekanis motor

$$P_m = P_{elm} - P_{fr}$$

$$P_m = 4.25 W - 0.31 W$$

$$P_m = 3.94 W$$

g. Torsi *shaft* motor

$$T_{sh} = \frac{P_m}{2\pi \left(\frac{n_r}{60}\right)}$$

$$T_{sh} = \frac{3.94 W}{2\pi \left(\frac{1031 \text{ rpm}}{60}\right)}$$

$$T_{sh} = 0.04 \text{ Nm}$$

h. Rugi daya lilitan *armature*

$$P_a = m_1 I_a^2 R_1$$

$$P_a = 3 \times 0.97^2 A \times 0.75 \Omega$$

$$P_a = 2.12 W$$

i. Rugi daya *stray*

$$P_{stray} = 0.01 P_m$$

$$P_{stray} = 0.01 \times 3.94 W$$

$$P_{stray} = 0.039 W$$

j. Daya masukan motor

$$P_{in} = P_{elm} + P_a + P_{stray}$$

$$P_{in} = 4.25 W + 2.12 W + 0.039 W$$

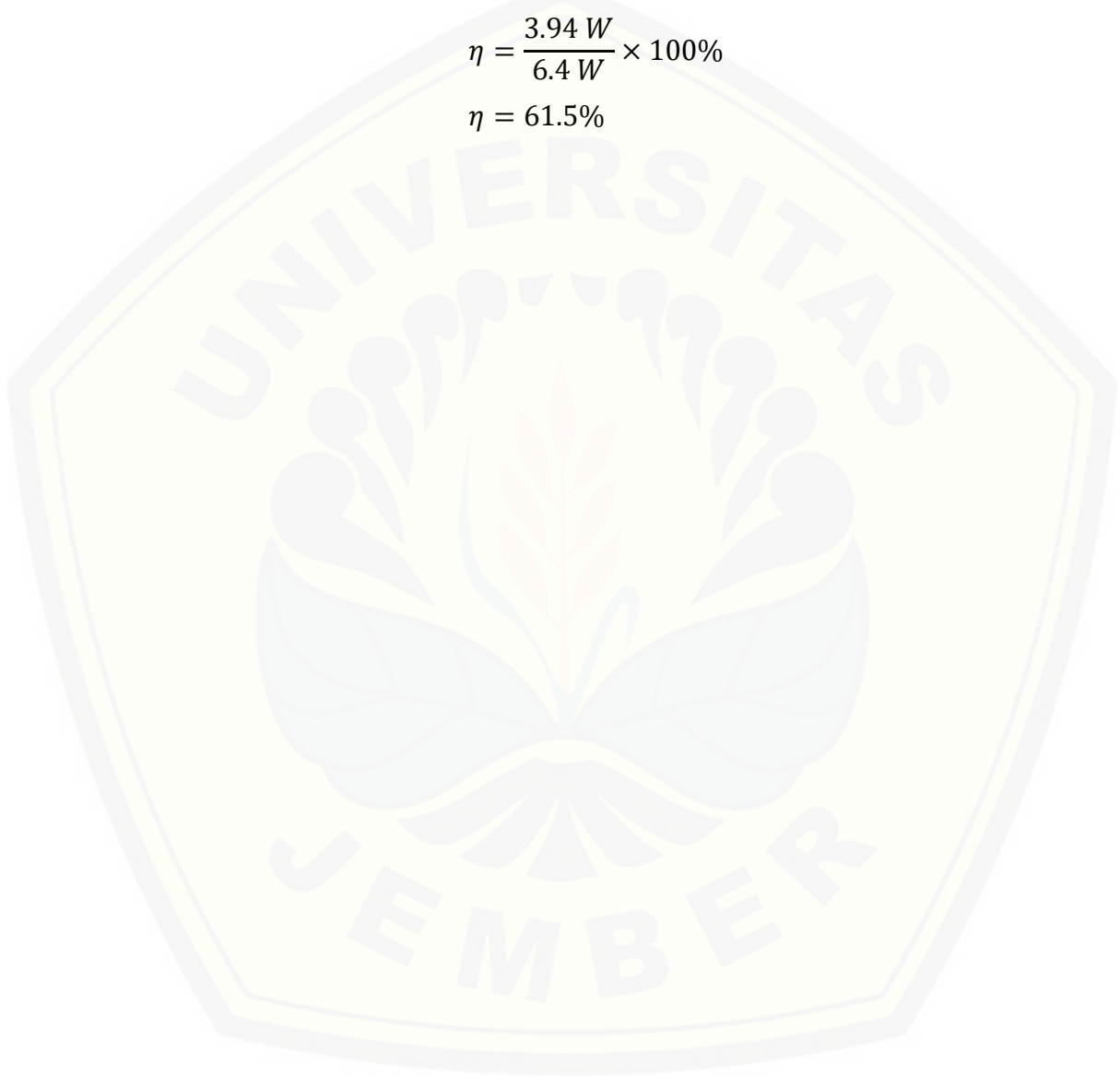
$$P_{in} = 6.4 W$$

k. Efisiensi motor

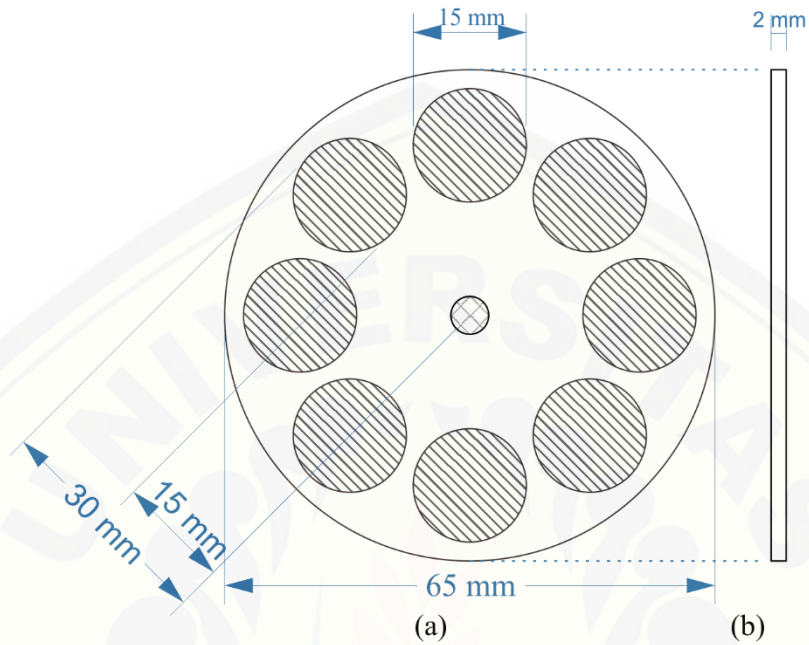
$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{3.94 W}{6.4 W} \times 100\%$$

$$\eta = 61.5\%$$

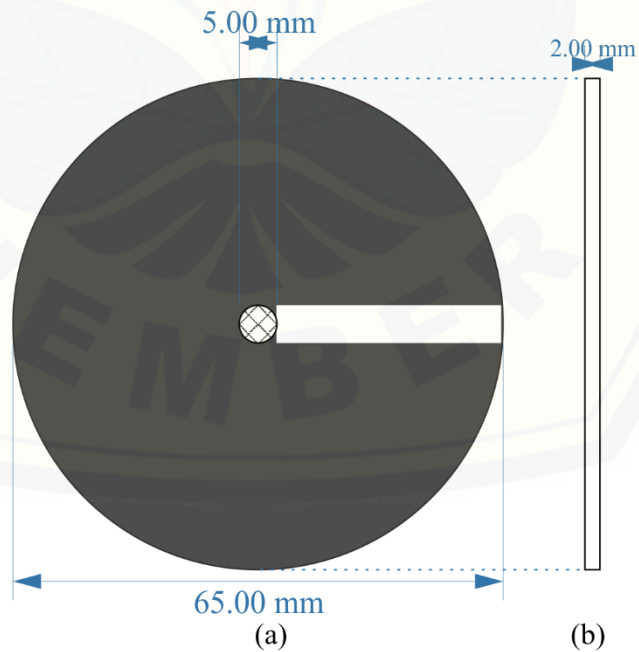


Lampiran 2 Desain Motor AFPM BLDC Rotor Ganda



(a) Tampak Depan; (b) Tampak Samping.

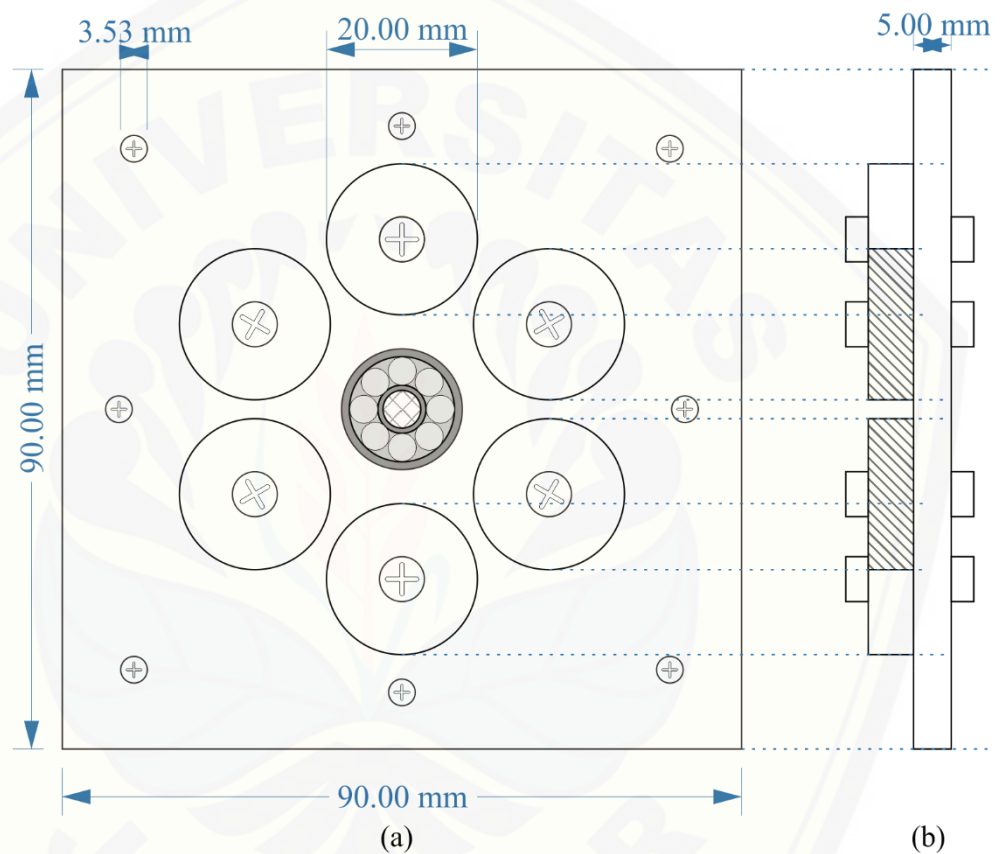
Gambar 1. Desain rotor



(a) tampak depan; (b) tampak samping

Gambar 2. Desain *encoder* untuk pengukuran kecepatan putar motor (rpm)

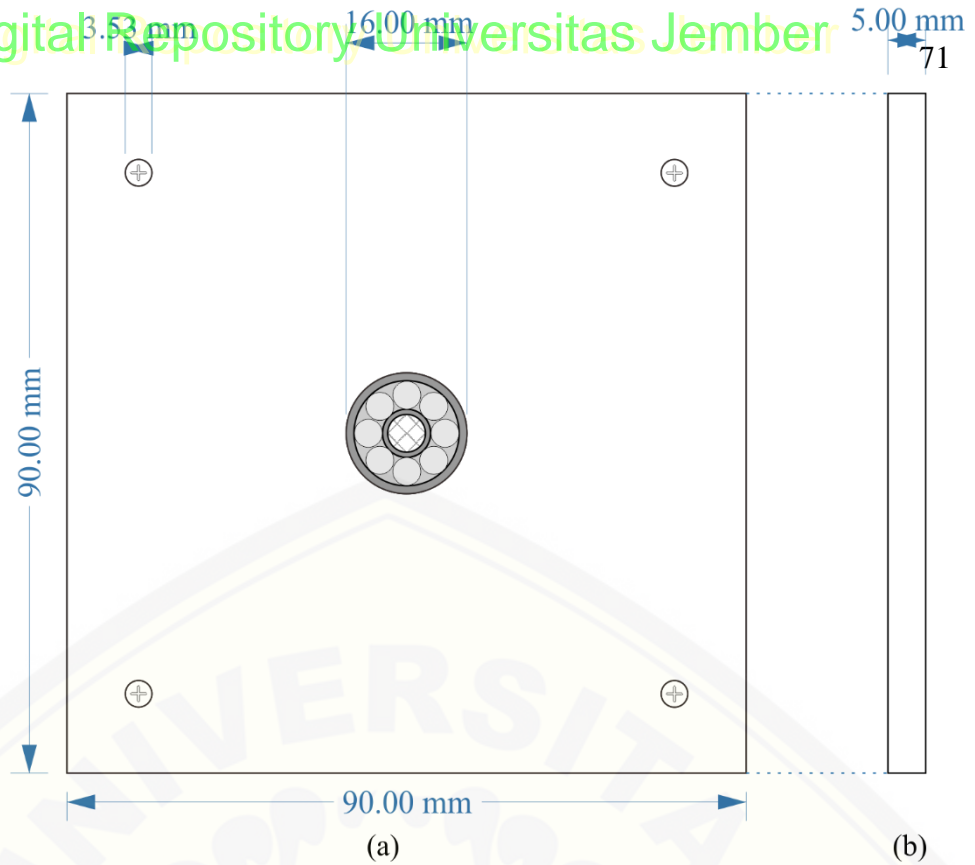
	Skala	: 1:1	Digambar	: Bagas Abib Sastiko	Keterangan:
	Satuan Ukuran	: -	NIM	: 161910201013	
	Tanggal	: 17-11-19	Proyek	: Tugas Akhir	
UNIVERSITAS JEMBER			MOTOR AFPM BLDC ROTOR GANDA		No. 1 A4



(a) tampak depan; (b) tampak samping.

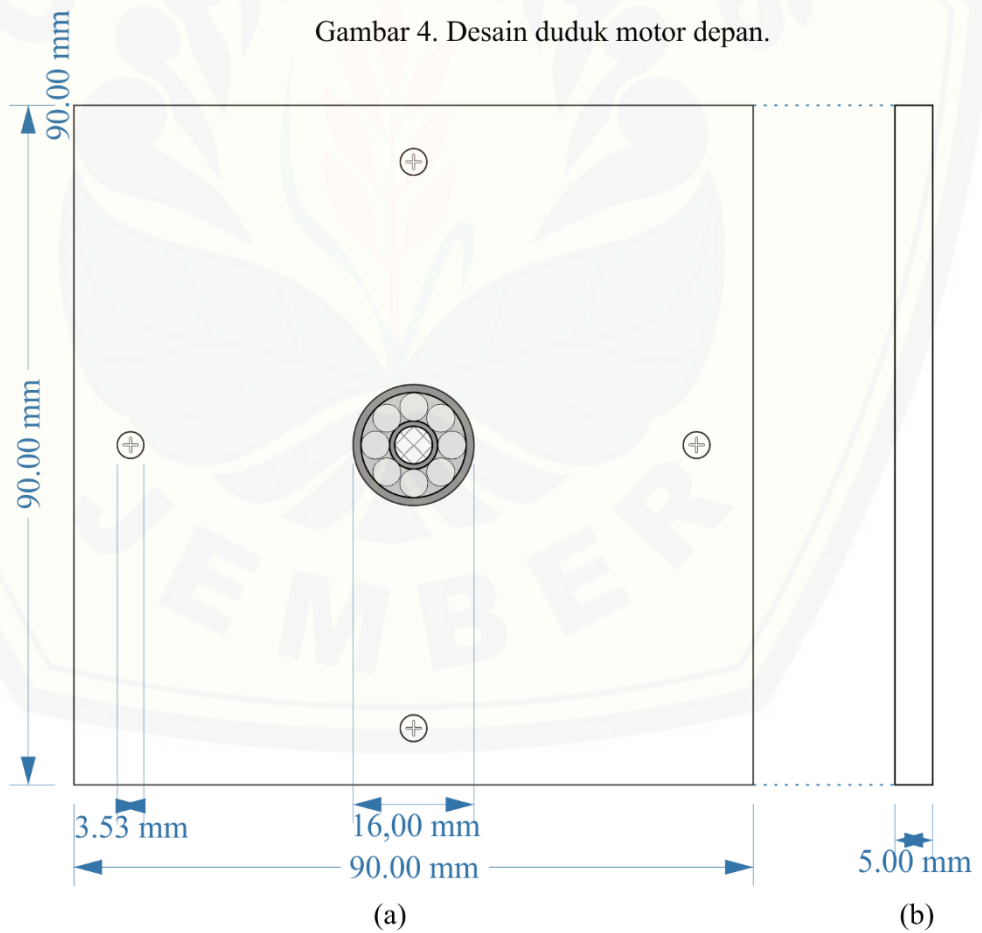
Gambar 3. Desain stator dengan susunan slot dudukan lilitan dari spul.

	Skala	: 1:1	Digambar	: Bagas Abib Sastiko	Keterangan:
	Satuan Ukuran	: -	NIM	: 161910201013	
	Tanggal	: 17-11-19	Proyek	: Tugas Akhir	
	UNIVERSITAS JEMBER		MOTOR AFPM BLDC ROTOR GANDA		No. 2 A4



(a) tampak depan; (b) tampak samping.

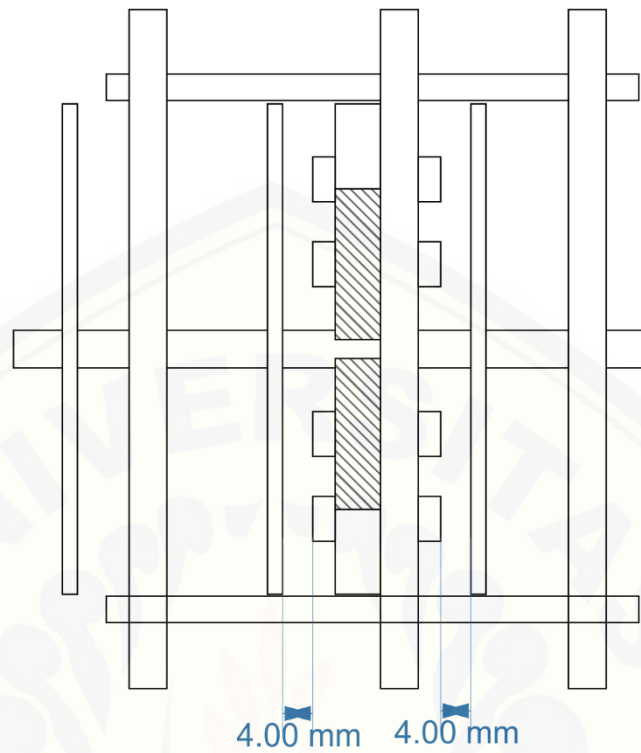
Gambar 4. Desain duduk motor depan.



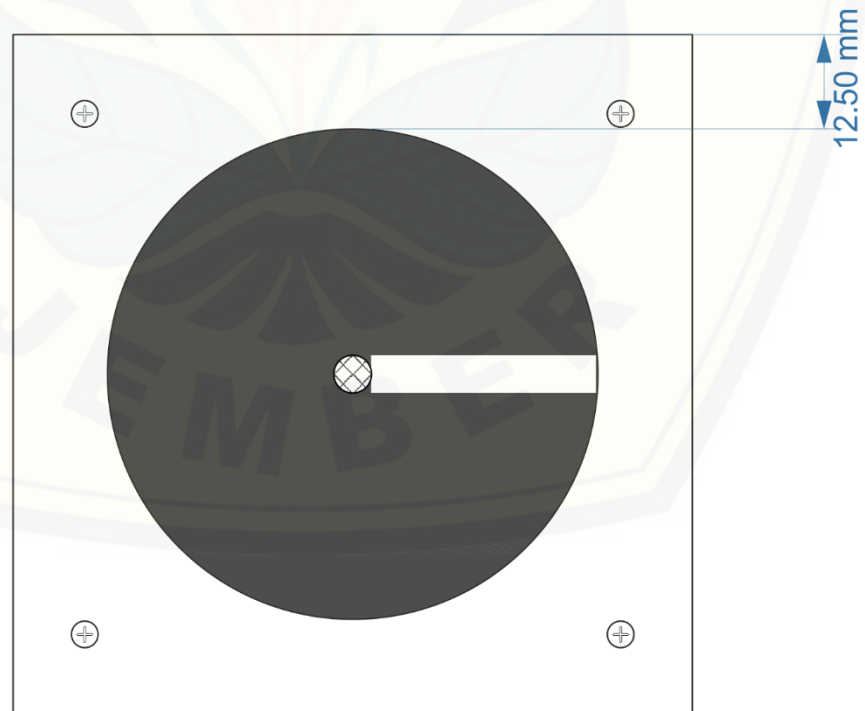
(a) tampak depan; (b) tampak samping.

Gambar 4. Desain duduk motor belakang.

	Skala	: 1:1	Digambar	: Bagas Abib Sastiko	Keterangan:
	Satuan Ukuran	: -	NIM	: 161910201013	
	Tanggal	: 17-11-19	Proyek	: Tugas Akhir	
UNIVERSITAS JEMBER			MOTOR AFPM BLDC ROTOR GANDA		No. 3 A4

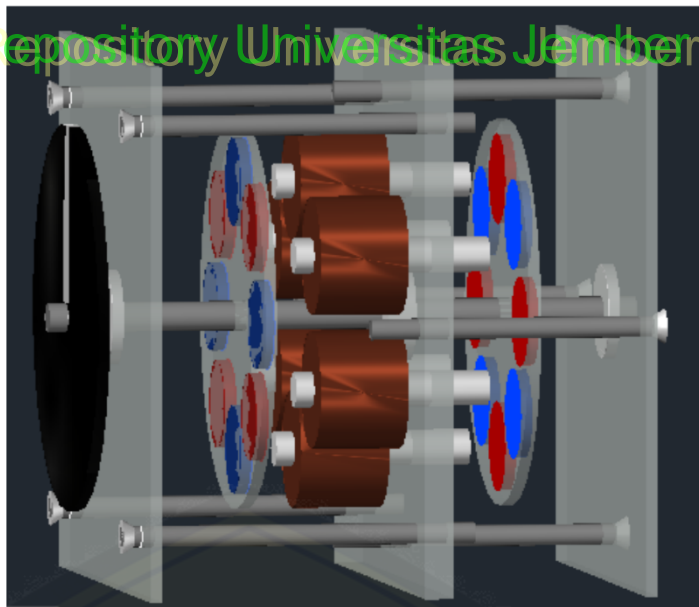


Gambar 6. Desain motor tampak samping.



Gambar 7. Desain motor tampak depan.

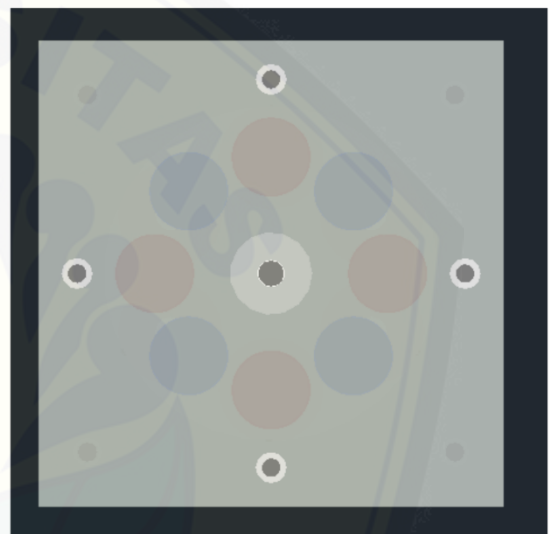
	Skala	: 1:1	Digambar	: Bagas Abib Sastiko	Keterangan:
	Satuan Ukuran	: -	NIM	: 161910201013	
	Tanggal	: 17-11-19	Proyek	: Tugas Akhir	
	UNIVERSITAS JEMBER		MOTOR AFPM BLDC ROTOR GANDA		No. 4 A4



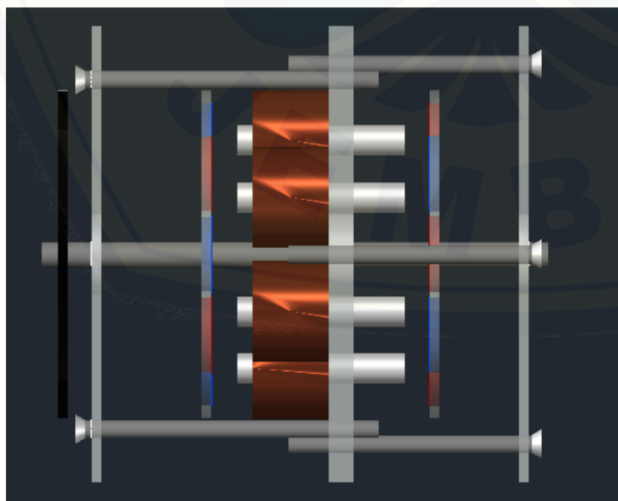
Gambar 7. Bentuk 3 dimensi



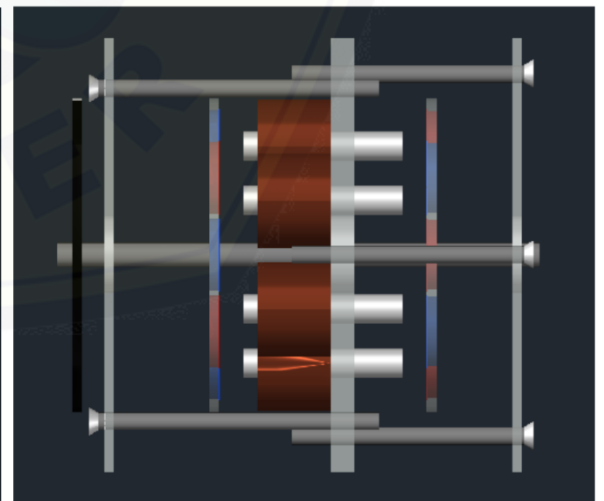
Gambar 8. Tampak depan



Gambar 9. Tampak belakang



Gambar 10. Tampak atas



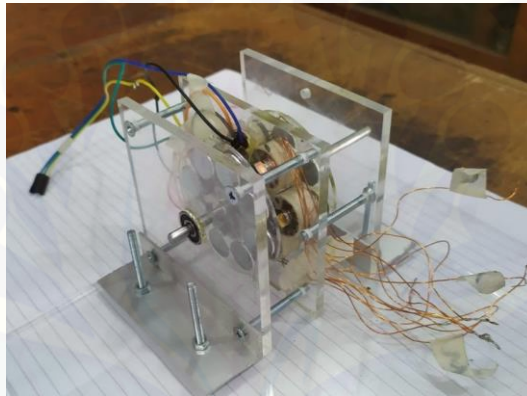
Gambar 11. Tampak samping

	Skala	: NTS	Digambar	: Bagas Abib Sastiko	Keterangan:
	Satuan Ukuran	: -	NIM	: 161910201013	
	Tanggal	: 17-11-19	Proyek	: Tugas Akhir	
UNIVERSITAS JEMBER			MOTOR AFPM BLDC ROTOR GANDA		No. 5 A4

Lampiran 3 Dokumentasi Pengujian Motor AFPM BLDC Rotor Ganda



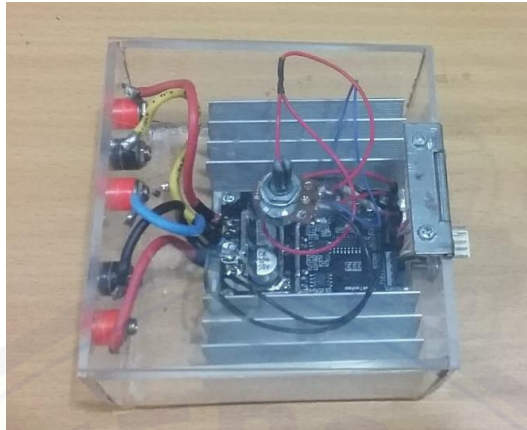
Gambar 1 Rangkaian pengujian motor



Gambar 2 Hasil perancangan motor



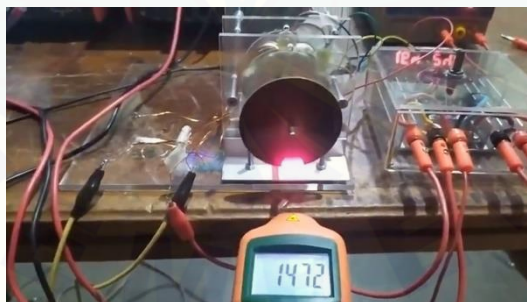
Gambar 3 Pengukuran resistansi motor



Gambar 4 *Driver* motor



Gambar 5 Kegiatan pengujian motor



Gambar 6 Pengukuran kecepatan putar motor menggunakan *tachometer*



Gambar 7 Hasil pengukuran frekuensi luaran *driver* motor



Gambar 8 Pengukuran tegangan AC antar fasa luaran *driver* menggunakan avometer



Gambar 9 Hasil pengukuran tegangan AC antar fasa luaran *driver* menggunakan avometer



Gambar 10 Alat ukur teslameter