

LAPORAN TUGAS AKHIR / *CAPSTONE DESIGN*

Rancang Bangun Motor Brushless DC (*BLDC*) untuk Kendaraan Area Perkotaan



Penyusun:

Rafly Faridhoni (18524066)

Ilham Dimas Fahrizal (18524082)

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Industri

Universitas Islam Indonesia

Yogyakarta

2022

HALAMAN PENGESAHAN

Rancang Bangun Motor Brushless DC (*BLDC*) untuk Kendaraan Area Perkotaan

Penyusun:

Rafly Faridhoni (18524066)

Ilham Dimas Fahrizal (18524082)

Yogyakarta, 01 Agustus 2022

Dosen Pembimbing 1



Husein Mubarak, S.T., M.Eng.

155241305

Dosen Pembimbing 2



Iftitah Imawati, S.T., M.Eng.

215241301

**Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Universitas Islam Indonesia
Yogyakarta**

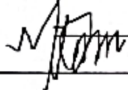

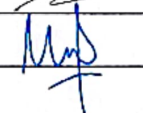
2022

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR


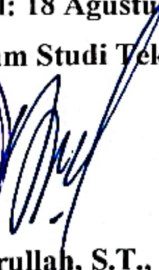
Rancang Bangun Motor Brushless DC (BLDC) untuk Kendaraan Area



الجنة الهندسة
Susunan Dewan Penguji

Ketua Penguji : Husein Mubarok, S.T., M.Eng. 
Anggota Penguji 1 : Sisdarmanto Adinandra S.T., M.Sc., Ph.D. 
Anggota Penguji 2 : Dr. Muhammad Khafidh, S.T., M.Eng. 

Tugas akhir ini telah disahkan sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Tanggal: 18 Agustus 2022
Ketua Program Studi Teknik Elektro


Yusuf Azzam Amrullah, S.T., M.Eng., Ph.D.

045240101

PERNYATAAN

Dengan ini kami menyatakan bahwa:

1. Tugas Akhir ini tidak mengandung karya yang diajukan untuk memperoleh gelar kesarjaan di suatu perguruan tinggi lainnya, dan sepanjang pengetahuan kami juga tidak mengandung karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.
2. Informasi dan materi Tugas Akhir yang terkait hak milik, hak intelektual, paten merupakan milik bersama antaraa tiga pihak, yaitu penulis, dosen pembimbing, dan Universitas Islam Indonesia. Dalam hal ini, penggunaan informasi dan materi Tugas Akhir terkait paten maka akan didiskusikan lebih lanjut untuk mendapatkan persetujuan dari ketiga pihak tersebut di atas.

Yogyakarta, 18 Agustus 2022



Rafly Faridhoni (18524066)



Ilham Dimas Fahrizal (18524082)



DAFTAR ISI

<i>HALAMAN PENGESAHAN</i>	2
<i>LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR</i>	3
<i>PERNYATAAN</i>	4
<i>DAFTAR ISI</i>	5
<i>RINGKASAN TUGAS AKHIR</i>	6
<i>BAB 1 : Definisi Permasalahan</i>	7
<i>BAB 2 : Observasi</i>	10
2.1 Spesifikasi Sistem	11
2.2 Standar Keteknikan	13
<i>BAB 3 : Usulan Perancangan Sistem</i>	14
3.1 Usulan Rancangan Sistem	14
3.4 Metode Uji Coba dan Pengujian Usulan Rancangan Sistem	22
<i>BAB 4 : Usulan Perancangan Sistem</i>	30
4.1 Kesesuaian Usulan dan Hasil Perancangan Sistem	30
4.2 Kesesuaian Perencanaan dalam Manajemen Tim dan Realisasinya	34
4.3 Analisis dan Pembahasan Kesesuaian antara Perencanaan dan Realisasi	35
<i>BAB 5 : Implementasi Sistem dan Analisis</i>	37
5.1 Hasil dan Analisis Implementasi	37
5.2 Pengalaman Pengguna	49
5.3 Dampak Implementasi Sistem	50
5.3.1 Teknologi/Inovasi	50
5.3.2 Ekonomi (Optional 1)	50
5.3.4 Lingkungan (optional 2)	50
5.3.4 Politik (optional 3)	50
<i>BAB 6 : Kesimpulan dan Saran</i>	52
6.1 Kesimpulan	52
6.2 Saran	52

RINGKASAN TUGAS AKHIR

Polusi udara merupakan masalah serius yang sedang menimpa dunia, tak terkecuali Indonesia. Dalam hal ini, kendaraan bermotor merupakan penyumbang polusi udara terbanyak. Selain itu dengan perkembangan teknologi yang semakin meningkat memiliki dampak pada peningkatan kebutuhan energi, terutama pada energi fosil. Bahan bakar melalui energi fosil merupakan energi tidak terbarukan yang semakin lama digunakan akan menipis persediaannya. Motor *BLDC* merupakan salah satu mesin penggerak yang banyak digunakan pada sektor industri, salah satunya industri otomotif. Di Indonesia sendiri, pengembangan *Motor BLDC* masih sangat terbatas, selain itu untuk melakukan proses produksi kendaraan listrik sebagian besar komponen *Motor BLDC* masih mengandalkan komponen dari luar negeri.

Berdasarkan permasalahan yang ditimbulkan, diperlukan upaya untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil serta dampak yang ditimbulkan. Salah satu hal yang dapat dilakukan adalah dengan mengembangkan mesin penggerak listrik dengan tipe *Brushless DC (BLDC)*, sehingga nantinya dapat mengurangi masalah polusi dan juga memenuhi kebutuhan sektor otomotif dalam negeri.

Pada proses perancangan dari Rancang Bangun *Motor Brushless DC (BLDC)* untuk Kendaraan Area Perkotaan harus melewati proses yang sangat panjang pada tahapannya. Dalam hal ini, metode yang digunakan adalah *Design Thinking*. Pada usulan desain digunakan pemodelan dengan konfigurasi *2IS10P* dengan dimensi diameter luar sebesar 150 mm. Material yang digunakan dalam perancangan prototipe menggunakan *Carbon Steel* dan *Neodymium N35*. Pemilihan komponen tersebut dilakukan karena banyak tersedia di pasaran dan juga dari segi harga murah. Sebelum melakukan pemodelan, langkah yang pertama yang harus dilakukan adalah dengan menentukan kebutuhan daya mekanis dari kendaraan. Daya mekanis kendaraan digunakan untuk menentukan spesifikasi perancangan motor *BLDC*.

Pada metode pengujian dan pengukuran, dilakukan pengukuran nilai resistansi, induktansi dan tahanan isolasi. Lalu pada pengujian dilakukan uji *Back EMF* dan Pengujian sinyal keluaran sensor hall, serta pengujian pada kondisi rangkaian tertutup. Pada pengujian *Back EMF*, nilai yang dihasilkan belum mampu memenuhi hasil yang sesuai dengan hasil perancangan. Lalu dengan menggunakan perhitungan nilai K_e , maka didapatkan keluaran torsi sebesar 2,4 Nm. Pada pengujian sensor hall, didapatkan nilai keluaran sinyal yang sudah sinkron dengan gelombang keluaran *Back EMF*, namun terdapat sedikit pergeseran derajat fasa gelombang yang disebabkan oleh putaran rotor yang kurang presisi. Pada pengujian sistem rangkaian tertutup, prototipe belum mampu bekerja atau beroperasi sebagaimana mestinya karena kerusakan pada kumparan.

BAB 1 : Definisi Permasalahan

1.1 Latar belakang dan Identifikasi Masalah

Polusi udara merupakan masalah serius yang sedang menimpa dunia, tak terkecuali Indonesia. Dalam hal ini, kendaraan bermotor merupakan penyumbang polusi udara terbanyak. Hal ini dikarenakan kendaraan bermotor menggunakan bahan bakar fosil yang digunakan untuk pembakaran dan semakin tahun jumlahnya semakin bertambah. Menurut data yang diambil dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, dari total 75% polusi yang disebabkan oleh kendaraan bermotor, 44,53% disebabkan oleh sepeda motor [1]. Polutan yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor antara lain karbon monoksida (*O*), nitrogen oksida (*NO_x*), hidrokarbon (*HC*), sulfur dioksida (*SO₂*), timah hitam (*Pb*) dan karbon dioksida (*CO₂*). Dari beberapa jenis polutan yang dihasilkan, karbon monoksida merupakan senyawa yang paling banyak dihasilkan oleh kendaraan bermotor. Gas monoksida sendiri dapat berperan buruk bagi kesehatan [2]. Gas buang kendaraan bermotor banyak terpapar langsung melalui lingkungan jalan raya yang dekat dengan masyarakat. Hal ini akan memberi dampak buruk pada masyarakat [3].

Selain itu dengan perkembangan teknologi yang semakin meningkat memiliki dampak pada peningkatan kebutuhan energi, terutama pada energi fosil. Bahan bakar melalui energi fosil merupakan energi tidak terbarukan yang semakin lama digunakan akan menipis persediaannya. Peningkatan kebutuhan energi tersebut akan terus bertambah seiring dengan naiknya angka pertumbuhan pada penduduk dunia. Dibutuhkan transisi energi menuju energi alternatif yang dapat diperbarui (*renewable resource*) untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil yang semakin lama akan habis. Menteri Energi dan Sumber Daya menyebutkan bahwa persediaan gas bumi dan batu bara akan habis persediaannya dalam kurun 22 tahun dan 65 tahun mendatang, sehingga transisi energi mutlak harus dilakukan [4].

Motor *BLDC* merupakan salah satu mesin penggerak yang banyak digunakan pada sektor industri, salah satunya industri otomotif. Di Indonesia sendiri, pengembangan *Motor BLDC* masih sangat terbatas, selain itu untuk melakukan proses produksi kendaraan listrik sebagian besar komponen *Motor BLDC* masih mengandalkan komponen dari luar negeri. Sehingga hal tersebut dapat menghambat proses produksi dan mengakibatkan ketergantungan sektor industri otomotif dalam negeri akan kebutuhan komponen *Motor BLDC* .

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang ditimbulkan, diperlukan upaya untuk mengurangi penggunaan bahan bakar fosil serta dampak yang ditimbulkan. Salah satu hal yang dapat dilakukan adalah dengan mengembangkan mesin penggerak listrik dengan tipe *Brushless DC (BLDC)* , yang nantinya dapat diterapkan pada kendaraan listrik area perkotaan. Perkembangan kendaraan dengan

mesin listrik yang sekarang ini sedang masif terjadi menyebabkan permintaan akan mesin listrik jenis *BLDC* ini semakin meningkat di pasaran. Hal ini dikarenakan motor dengan magnet permanen mampu untuk menghasilkan daya keluaran yang lebih besar dan dimensi yang lebih *compact* jika dibandingkan dengan motor induksi [5].

Selain itu, untuk meminimalisir ketergantungan pembelian komponen Motor *BLDC* dari luar negeri dan meningkatkan sektor teknologi otomotif dalam negeri, maka perlu upaya untuk mengembangkan komponen Motor *BLDC* didalam negeri guna memenuhi Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN).

1.3 Batasan Realistis *Engineering Aspects*

Berikut merupakan batasan realistis *engineer* yang digunakan dalam proses desain dan pembuatan prototipe motor *BLDC* .

1. Peraturan Menteri Perhubungan Nomor PM 44 Tahun 2020 tentang Pengujian Tipe Fisik Kendaraan Bermotor dengan Motor Penggerak Menggunakan Mesin Listrik. Salah satu batasan yang kami lakukan berdasarkan peraturan ini pada BAB 1 Pasal 4 Ayat 2 kategori L1 mengenai Kendaraan Bermotor beroda 2 dengan kapasitas silinder mesin 50 cm² atau dengan desain kecepatan paling tinggi 50 km/jam. Selain itu, terdapat Peraturan Menteri perhubungan Nomor PM 45 Tahun 2020 tentang Kendaraan Tertentu dengan Menggunakan Penggerak Motor Listrik [6]. Peraturan tersebut menjadi salah satu acuan kami dalam perancangan *BLDC*. Sehingga kami menentukan batas kecepatan di angka 40 km/jam.
2. Prototipe ini hanya dikhususkan untuk dijadikan mesin penggerak pada kendaraan listrik yang telah ditentukan kebutuhan daya mekanisnya.

1.4 Ruang Lingkup Permasalahan / Batasan Masalah

1. Karena keterbatasan alat dalam pengujian, salah satunya adalah torsi meter, maka Penulis hanya melakukan pengujian *Back EMF* untuk mencari nilai *Ke*.
2. Pada proses perancangan dan manufaktur, Penulis menggunakan material yang tersedia di pasaran Indonesia.
3. Proses manufaktur kumparan dilakukan secara manual.

1.5 Tujuan

Tujuan dilakukanya penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Merancang motor *BLDC* yang digunakan untuk pengembangan sekuter listrik untuk daerah perkotaan menggunakan *software* desain elektromagnetik berbasis *Finite Element Method (FEM)*.
2. Melakukan pengujian prototipe motor *BLDC* dengan mempertimbangkan nilai keluaran *Back EMF*.

1.6 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini agar hasil penelitian Rancang Bangun Motor *BLDC* untuk Area Perkotaan dapat dijadikan referensi oleh Universitas Islam Indonesia dalam upaya mengembangkan teknologi kendaraan listrik, khususnya motor *BLDC* .



BAB 2 : Observasi

Berikut merupakan studi literatur terdahulu yang memiliki kemiripan fungsi dan tujuan yang sama dengan proyek yang sedang atau akan dilakukan. Studi literatur ini sekaligus menjadi salah satu acuan dalam melakukan penelitian di bidang rancang bangun kendaraan listrik, khususnya motor *BLDC*.

Tabel 2.1. Kumpulan Penelitian yang terkait dengan proyek tugas akhir.

Nama Peneliti	Judul Penelitian	Deskripsi Singkat Penelitian
Minh Dinh Bui, Dang Quoc Vuong (2021)	<i>Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for E Bike</i>	Penulisan tentang desain <i>Interior Permanent Magnet</i> (IPM) motor ini ditujukan untuk diterapkan pada E-bike. Penulisan ini tidak hanya melakukan optimasi, namun juga <i>prototyping</i> . Dengan membandingkan motor yang sudah ada dengan tipe <i>Surfaces Permanent Magnet</i> (SPM), Penulisan ini mengusung desain V Shape IPM dengan keluaran 5 KW.
Perbedaan : keluaran daya motor pada Penulisan ini sebesar 5 KW, sedangkan Penulis melakukan Penulisan untuk rancang bangun motor sebesar 2 KW.		
Selman GARIP, Yusuf YASA (2021)	<i>Design of Outer-runner-Type Brushless Permanent Magnet DC Motor for Lightweight E-Vehicles</i>	Penulisan ini membahas tentang perancangan motor <i>BLDC</i> dengan tipe <i>outrunner</i> dengan mengejar keluaran efisiensi dan <i>power density</i> yang tinggi. Untuk mendapatkan hasil tersebut, Penulis sebelumnya melakukan metode, salah satunya dengan melakukan kombinasi slot <i>pole</i> dan melakukan beberapa perbandingan dari segi desain.
Perbedaan : tipe motor yang digunakan pada Penulisan ini adalah <i>out-runner</i> motor, sedangkan Penulis menggunakan tipe <i>inner-runner</i> sebagai Penulisan.		
Y.B. Adyapaka Apatya, Aries Subiantoro and Feri Yusivar (2017)	<i>Design and Prototyping of 3-Phase BLDC Motor</i>	Penulisan ini membahas perancangan motor <i>BLDC</i> 3 <i>phase</i> dengan konfigurasi 12 Slot 8 <i>Pole</i> . Penulis menggunakan tipe IPM rotor karena beberapa alasan seperti

		memiliki torsi yang lebih besar dan memiliki respon yang baik dari segi akselerasi dan deselerasi. Penulis menggunakan <i>software</i> berbasis <i>Finite Element Analysis (FEA)</i> dalam proses perancangan. Desain yang didapatkan lalu dibuat <i>prototype</i> .
Perbedaan : Penulisan ini melakukan pengujian <i>prototype</i> dengan menghitung nilai Konstanta <i>Back EMF (Ke)</i> , sedangkan Penulis melakukan pengujian daya keluaran pada Penulisan ini.		
Vice Roy Halomoan Siregar (2015)	<i>Cogging Torque Reduction on 12 Slot 8 Pole Brushless DC Motor Surface Mounted Magnet With Umbrella Less Stator</i>	Penulisan ini membahas tentang analisa reduksi torsi cogging pada <i>BLDC 12 Slot 8 Pole</i> dengan menggunakan metode Toki dan Notch pada <i>teeth</i> stator.
Perbedaan : Penulisan ini hanya berfokus pada desain dan simulasi untuk mereduksi torsi cogging pada motor <i>BLDC</i> dan tidak melakukan <i>prototyping</i> . Pada Penulisan ini, Penulis melakukan <i>prototyping</i> .		

Berdasarkan informasi yang didapatkan melalui kumpulan penelitian dengan penelusuran beberapa literatur yang ada dan telah dikembangkan, maka dapat ditentukan daftar spesifikasi dari *project* perancangan motor *Brushless Direct Current (BLDC)* sebagai berikut.

2.1 Spesifikasi Sistem

Perhitungan daya mekanis dilakukan sebelum menentukan spesifikasi rancangan motor *BLDC*. Sebelum menentukan kebutuhan daya mekanis, terlebih dahulu harus mengetahui spesifikasi dari kendaraan yang mana dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2 Spesifikasi Kendaraan

No	Spesifikasi	Nilai	Satuan
1	Massa Kendaraan	63,5	kg
2	Kapasitas Beban Maksimal	100	kg
3	Kecepatan Maksimal	40	km/jam

Tabel 2.2 merupakan spesifikasi kendaraan yang akan menjadi acuan dalam perancangan motor *BLDC*. Sehingga dari spesifikasi kendaraan yang telah disebutkan, didapatkan tabel kebutuhan daya mekanis kendaraan pada tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Kebutuhan daya mekanis kendaraan

No	Spesifikasi	Nilai	Satuan
1	Daya	1350	Watt
2	Kecepatan	11,11	m/s
3	Torsi	15	Nm

Pada Tabel 2.3 menunjukkan kebutuhan daya mekanis kendaraan yang nantinya menjadi parameter acuan dalam perancangan motor *BLDC*. Sehingga didapatkan keluaran daya mekanis sebesar 1350 Watt pada kecepatan 835 *RPM* dan torsi yang dibutuhkan sebesar 15 Nm. Untuk mendapatkan torsi yang telah diperhitungkan dalam proses perancangan, maka digunakan rasio kecepatan putar. Hal ini ditujukan agar dimensi motor yang digunakan tetap *compact*.

Tabel 2.4 Spesifikasi Motor *BLDC*

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Daya Masukan	2000	Watt
2	kecepatan	2500	<i>RPM</i>
3	Torsi	5,6	Nm
4	Tegangan	72	V
5	Arus	28	A
6	Efisiensi	74	%

Pada Tabel 2.4 menunjukkan parameter dari spesifikasi hasil perancangan motor *BLDC*, sehingga diperoleh nilai torsi sebesar 5,6 Nm pada *rating* kecepatan sebesar 2500 *RPM*. Data tersebut diperoleh dari hasil simulasi yang dilakukan pada desain usulan.

Tabel 2.5 Spesifikasi material

No	Nama	Jenis
1	Inti Besi	<i>Carbon Steel</i>
2	Magnet	<i>Neodymium N35</i>
3	Tembaga	Enamel (diameter 0,5 mm)

Pada Tabel 2.5 menunjukkan spesifikasi material dalam perancangan Motor *BLDC*. Pada material inti besi menggunakan *Carbon Steel* karena jenis material ini banyak ditemukan di pasaran. Pada material magnet digunakan jenis permanen magnet *Neodymium N35*. Dikarenakan arus yang akan digunakan pada proses perancangan prototipe sebesar 28 A, maka digunakan tembaga dengan diameter 0,5 mm dengan konfigurasi 28 paralel agar dapat memenuhi kuat hantar arus penghantar.

2.2 Standar Keteknikan

Standar keteknikan yang digunakan dalam acuan untuk merancang Motor *BLDC* menggunakan Standar Nasional Indonesia (SNI) Komite Teknik Mesin Listrik yang dikeluarkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia [7].

Tabel 2.6 Standar keteknikan prototipe

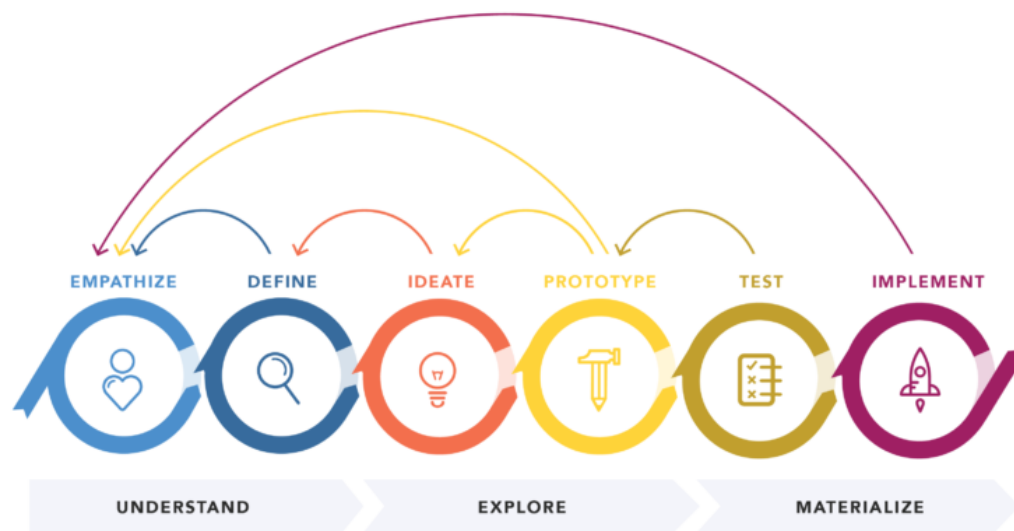
No	Nomor Standar	Judul
1	SNI 04-6189-1999	Pengukuran resistansi kumparan pada mesin listrik selama operasi tegangan bolak-balik
2	SNI 04-1693-1989	Pendingin Mesin Sinkron
3	SNI IEC 60446:2011	Prinsip dasar dan keselamatan untuk antarmuka manusia dan mesin, penandaan dan identifikasi dengan warna atau huruf angka



BAB 3 : Usulan Perancangan Sistem

3.1 Usulan Rancangan Sistem

Proses perancangan Motor *Brushless DC (BLDC)* untuk Kendaraan Area Perkotaan dilakukan dengan tahapan-tahapan yang bertujuan untuk menemukan solusi dari permasalahan. Dalam hal ini, metode tahapan-tahapan tersebut yaitu metode *Design Thinking*. Metode ini merupakan penggabungan dari banyak ide yang berisi berbagai disiplin ilmu demi menghasilkan solusi dan metode yang efektif sebagai pemecah suatu permasalahan kompleks. *Design Thinking* terdiri dari beberapa tahapan berikut.



Gambar 3.1. Siklus perancangan dengan metode *Design Thinking*

1. *Empathize* (Empati)

Tahap *empathize* (empati) yaitu upaya dalam memahami permasalahan yang terjadi. Upaya yang dilakukan yaitu melalui mencari informasi yang didapat melalui berbagai macam sumber informasi, seperti jurnal, *website* maupun observasi langsung. Dalam perancangan ini, pencarian informasi yang telah dilakukan yaitu studi literatur yang bertujuan untuk mendapatkan informasi yang valid melalui referensi yang dijadikan sebagai salah satu acuan dalam penentuan dimensi Motor *BLDC*, penentuan keluaran motor, tipe motor yang digunakan, cara pengujian motor hingga proses pembuatan prototipe.

2. *Define* (Penetapan)

Define (penetapan) merupakan tahapan dalam menganalisa dan memahami hasil pencarian informasi yang dilakukan pada tahap *empathize*. Seluruh informasi yang didapatkan melalui studi literatur yang telah dilakukan akan menjadi acuan spesifikasi dari prototipe yang akan dirancang. Berikut merupakan tahap *define* dalam perancangan ini :

1. Penentuan target keluaran dari Motor *BLDC* dapat memenuhi kebutuhan daya mekanis dari kendaraan.
2. Salah satu tolak ukur dalam penentuan desain geometri mengambil spesifikasi dari motor QS 90H 1000 Watt, namun terdapat perubahan pada diameter luar motor.

3. *Ideate* (Ide)

Ideate (Ide) merupakan tahap transisi antara perumusan masalah menuju penyelesaian masalah. Tahapan ini berfokus pada pemecahan ide dan inovasi yang akan dijadikan landasan dalam proses perancangan prototipe. Berikut merupakan hasil dari tahap *ideate*.

1. Penggunaan desain *Umbrella* pada *teeth* stator. Penggunaan ini akan mengurangi nilai dari perubahan reluktansi fluks induksi magnet pada *teeth* stator.
2. Penggunaan jenis topologi rotor IPM (*Interior Surfaces Mounted*). Hal ini bertujuan agar penggunaan motor dapat lebih fleksibel, karena dapat dengan mudah dilakukan rasio putaran.

4. *Prototype* (Prototipe)

Tahap *Prototype* (Prototipe) merupakan tahap merealisasikan rancangan desain dari proyek yang telah dirancang. Prototipe direalisasikan agar nantinya dapat dilakukan pengujian demi memperoleh *feedback* agar dapat dilakukan validasi dengan hasil perancangan.

5. *Test* (Uji Coba)

Tahap *Test* (Uji Coba) merupakan tahap dilakukannya pengujian pada prototipe yang telah dibuat. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan *feedback* yang akan dijadikan acuan penilaian bahwa prototipe telah memenuhi spesifikasi dari desain yang telah ditentukan. Jika hasil prototipe belum sesuai, maka akan dilakukan peninjauan kembali pada tahapan-tahapan sebelumnya.

6. *Implement* (Implementasi)

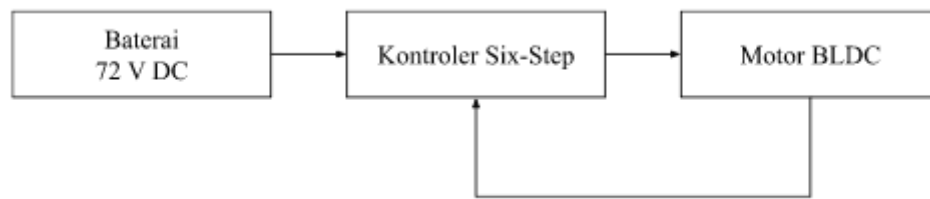
Tahap *Implementasi* merupakan tahap akhir dalam proses *design thinking*. Pada tahap ini, prototipe telah selesai dirancang dan dapat diimplementasikan langsung sesuai fungsi yang telah ditetapkan sebagai pemecah suatu masalah.

Berdasarkan usulan desain dan spesifikasi yang telah ditentukan, dibuat daftar beberapa komponen yang diperlukan beserta deskripsinya. Tabel 3.1 menampilkan daftar komponen yang diperlukan yang sesuai dengan usulan rancangan desain.

Tabel 3.1 Inventarisasi kebutuhan perancangan prototipe

No	Nama Alat	Keterangan
1	Magnet <i>Neodymium N35</i>	Magnet permanen merupakan komponen yang menghasilkan induksi medan magnet yang terdapat pada rotor tanpa menggunakan sumber eksitasi tambahan. Jenis permanen magnet yang sering digunakan untuk Motor <i>BLDC</i> adalah magnet <i>Neodymium (NdFeb)</i> [8]
2	Plat Besi	Material utama untuk pembuatan rotor dan stator.
3	Tembaga 0,5	Konduktor yang berfungsi untuk menghantarkan arus pada <i>teeth</i> stator sehingga fluks magnet dapat di induksikan.
4	Alumunium	Material yang digunakan sebagai material <i>housing</i>
5	Besi Bar	Menjaga poros <i>shaft</i> dari rotor agar tidak bergesekan langsung pada <i>housing</i> .
6	Bearing	Berfungsi sebagai bantalan <i>shaft</i> agar rotor dapat berputar.
7	Baut	Pengunci tumpukan plat inti (<i>core</i>) dan <i>housing</i> .
8	<i>Red Insulation Varnish Class F</i>	Melaminasi inti besi (<i>core</i>) guna meminimalisir rugi-rugi arus <i>eddy</i> .
9	Kertas Nomex	Pelindung kumparan agar tidak bersentuhan secara langsung dengan gigi stator guna meminimalisir resiko kebocoran arus.
10	Kabel AWG	Konduktor arus masukan dari kontroler <i>BLDC</i> .

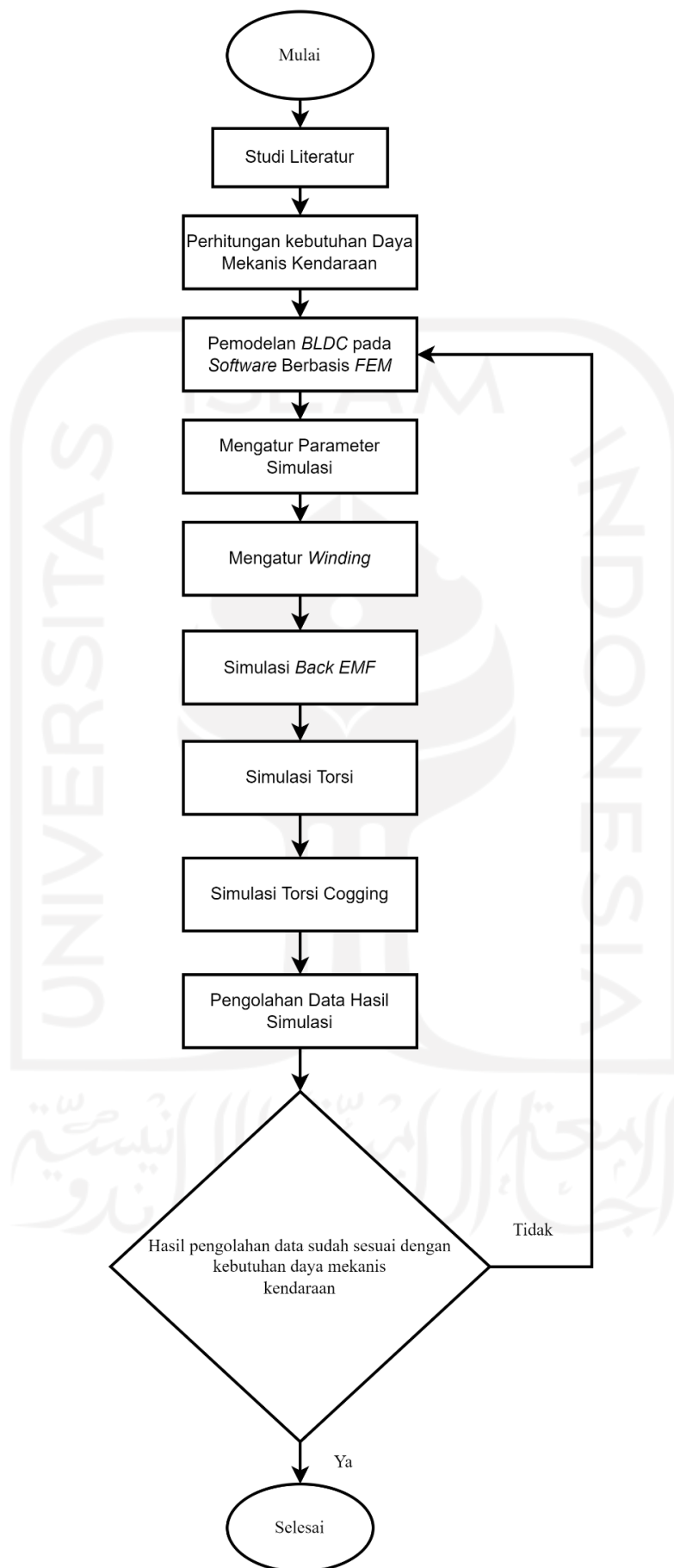
3.2 Cara Kerja Sistem Motor *BLDC*



Gambar 3.2 Diagram alir sistem *BLDC*

Pada Gambar 3.2 menunjukkan cara kerja sistem Motor *BLDC*. Pada proses perancangan alat, digunakan jenis kontroler jenis *six-step* dengan suplai tegangan sebesar 72 V. Kontroler *six-step* digunakan karena kontroler jenis ini mudah ditemukan di pasaran dan secara harga lebih murah jika dibandingkan jenis kontroler *sinusoidal* karena tidak membutuhkan sistem yang kompleks, dimana hanya membutuhkan sensor hall sebagai sistem komutasi.

3.3 Proses Perancangan Motor *BLDC*

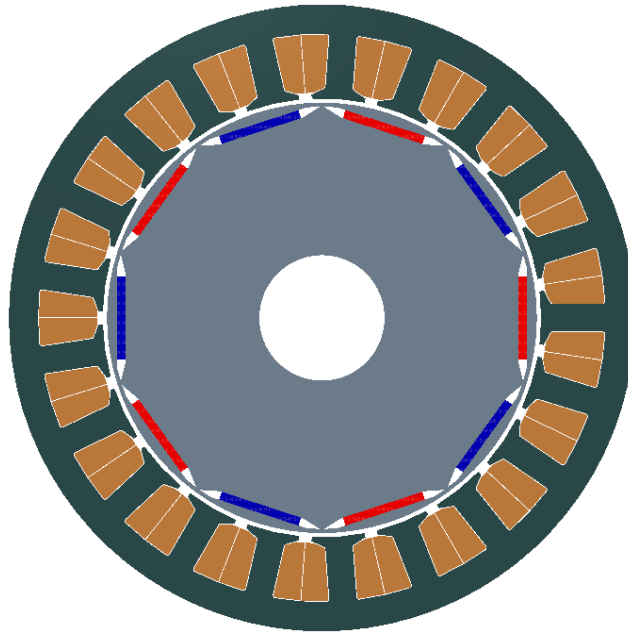


Gambar 3.3 Diagram alir proses perancangan motor *BLDC*

Pada proses perancangan, langkah awal yang dilakukan adalah dengan melakukan studi literatur yang bertujuan untuk mendapatkan informasi yang valid dari referensi yang nantinya dijadikan sebagai salah satu acuan dalam pemodelan motor *BLDC*. Selanjutnya, langkah yang dilakukan adalah dengan melakukan perhitungan daya mekanis kendaraan yang nantinya dijadikan acuan dalam proses penentuan spesifikasi motor *BLDC*. Setelah spesifikasi dari motor telah ditentukan, maka dilakukan pemodelan pada *software* berbasis *Finite Element Method (FEM)*. *Finite Element Method (FEM)* merupakan sebuah metode perhitungan yang digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan dalam dunia *engineering*, salah satunya adalah medan elektromagnetik [9]. Sebelum melakukan simulasi, langkah awal yang harus dilakukan adalah dengan menentukan parameter simulasi, seperti kecepatan yang nantinya digunakan untuk mendapatkan nilai keluaran seperti torsi dan *Back EMF*. Setelah diperoleh dua parameter utama seperti torsi dan *Back EMF*, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah dengan melakukan simulasi torsi *cogging*. *Cogging* merupakan peristiwa dimana terjadi interaksi antara fluks magnet yang terdapat pada rotor dengan variasi permeansi inti pada stator. Permeansi merupakan kemampuan suatu material dalam menghantarkan fluks magnet. Torsi *cogging* dapat mengurangi performa dari motor karena kecenderungan untuk menarik *teeth* stator meskipun dalam kondisi tidak bergerak, sehingga ketika diputar akan terjadi lendutan. Torsi *cogging* merupakan penyebab vibrasi pada motor ketika kondisi putaran rendah.

Pada rancangan usulan digunakan jenis topologi rotor *IPM (Interior Surfaces Mounted)*. Topologi *IPM* merupakan salah satu jenis topologi yang mana penempatan posisi magnetnya diselipkan di dalam permukaan rotor. Dibandingkan dengan topologi *Surfaces Permanent Magnet (SPM)*, Topologi *IPM* memiliki keuntungan pada aspek reluktansi torsi dan resiko magnet terlepas atau lepas (yang dikarenakan gaya sentrifugal akibat putaran rotor) dapat diminimalisir. Topologi *IPM* sendiri memiliki beberapa variasi lagi dalam bentuk penempatan magnetnya, diantaranya adalah *V-shape* dan *Flat-shape*. Dalam proses pembuatannya, topologi *IPM* memiliki kelebihan dalam hal proses produksi karena kemudahan dalam peletakan magnet serta dari segi performa memiliki efisiensinya yang lebih tinggi. Beberapa tipe *IPM* motor yang umum dikenal adalah *V-Shape* dan *Flat-Shape* [10]. Pada penelitian ini menggunakan jenis topologi magnet *Flat-Shape* dikarenakan jenis topologi ini memiliki kelebihan dalam pemasangan magnet karena tidak dibutuhkan tingkat kepresisian sudut seperti yang dimiliki pada magnet *V-Shape*.

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, maka didapatkan dua opsi desain yang akan dijadikan pertimbangan dalam proses pembuatan prototipe motor *BLDC*.



Gambar 3.4 Desain opsi satu

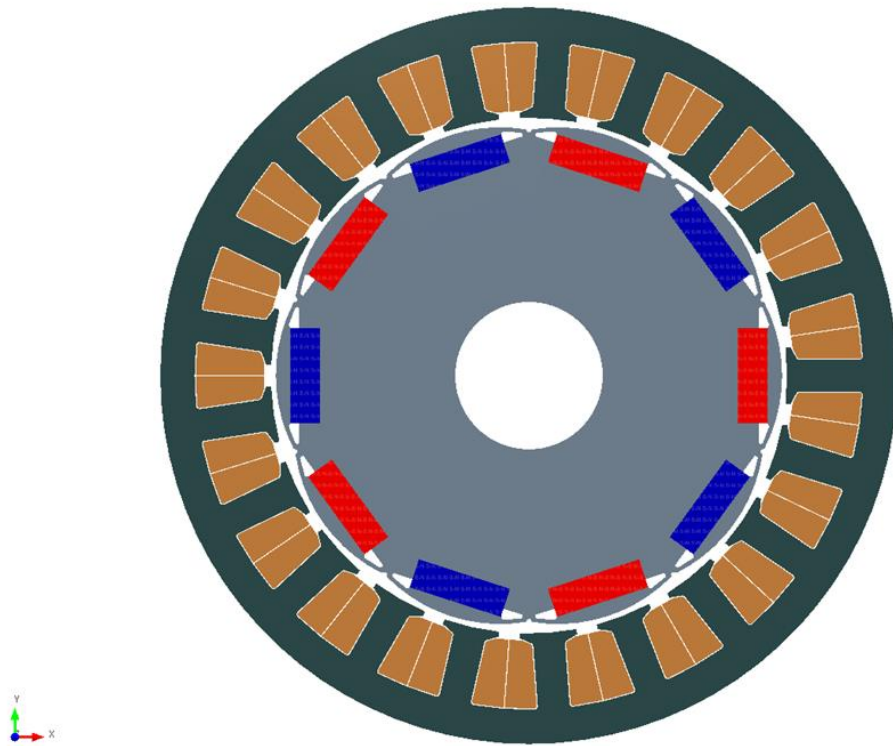
Pada desain opsi satu menggunakan pemodelan dengan konfigurasi *2/1S10P* karena nilai torsi *cogging* yang dihasilkan lebih kecil jika dibandingkan dengan konfigurasi lain yang telah disimulasikan. Dimensi yang digunakan pada usulan ini menggunakan diameter luar sebesar 150 mm dan ketebalan magnet sebesar 2 mm.

Tabel 3.2 Hasil rangkuman simulasi desain opsi satu

Torsi	5,09 Nm
Kecepatan	2500 RPM
Kebutuhan Daya Mekanis	1353,94 Watt
Daya Mekanis yang Dihasilkan	1335 Watt
Daya Listrik	2000 Watt
Efisiensi	0,67

Dari Tabel 3.2 didapatkan hasil simulasi dengan keluaran daya mekanis sebesar 1335 Watt dari kebutuhan daya mekanis kendaraan sebesar 1353,9 Watt. Hasil yang didapatkan belum sesuai dengan target dikarenakan torsi yang diperoleh hanya sebesar 5,09 Nm dari target torsi sebesar

5,15 Nm pada kecepatan 2500 RPM. Dari data tersebut maka didapatkan nilai perhitungan efisiensi sebesar 0,67 atau 67%.



Gambar 3.5 Desain opsi dua

Pada usulan desain opsi dua, Penulis masih menggunakan dimensi luar dan konfigurasi *slot-pole* yang sama dengan rancangan desain opsi satu.

Tabel 3.3 Komparasi desain opsi satu dan desain opsi dua

Parameter	Desain Opsi Satu	Desain Opsi Dua
Ketebalan Magnet	2 mm	6 mm
Slot Opening	3 mm	4,3 mm
Diameter Tembaga	2,4 mm	1 mm
Optimasi Geometri	Tidak	Ya

Pada Tabel 3.3 dapat dilihat perubahan yang telah dilakukan, yaitu pada bagian rotor yang mana dilakukan optimasi geometri dengan mengikis daerah pada tepi magnet yang bertujuan untuk meningkatkan reluktansi fluks magnetik yang menuju *teeth* stator. Reluktansi merupakan

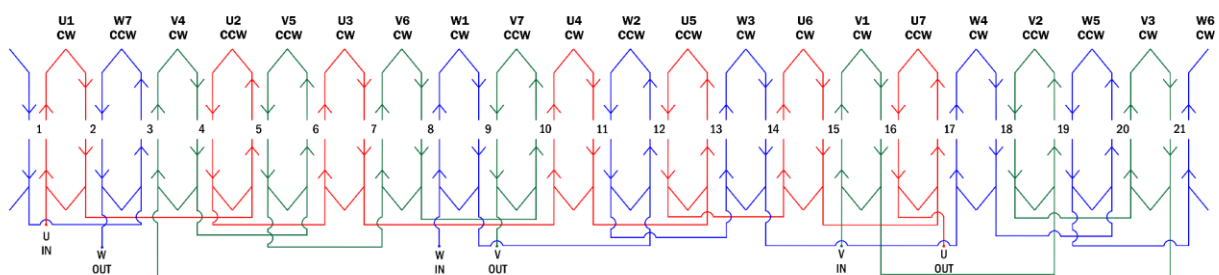
hambatan pada sirkuit elektromagnetik. Selain itu, perubahan pada *slot-opening* stator bertujuan untuk mempermudah proses manufaktur kumparan pada komponen stator.

Tabel 3.4 Rangkuman data simulasi desain opsi dua

Torsi	5,6 N.m
Kecepatan	2500 RPM
Kebutuhan daya mekanis	1353,94 Watt
Daya mekanis yang dihasilkan	1482,94 Watt
Daya Listrik	2000 Watt
Efisiensi	0,74

Pada Tabel 3.4 diperoleh data hasil simulasi yang telah dilakukan, sehingga didapatkan nilai torsi sebesar 5,6 Nm pada kecepatan putar sebesar 2500 RPM. Pada perolehan daya mekanis, didapatkan nilai sebesar 1482 Watt. Hasil ini sudah cukup untuk memenuhi perhitungan dari kebutuhan daya mekanis kendaraan sebesar 1353,94 Watt.

Berdasarkan dua usulan yang diberikan, maka dipilih rancangan desain opsi dua untuk dijadikan usulan pada pembuatan prototipe Motor *BLDC*. Hal ini dikarenakan desain opsi dua memiliki nilai efisiensi yang lebih tinggi serta keluaran daya mekanis yang dihasilkan mampu untuk memenuhi kebutuhan dari perhitungan daya mekanis kendaraan.

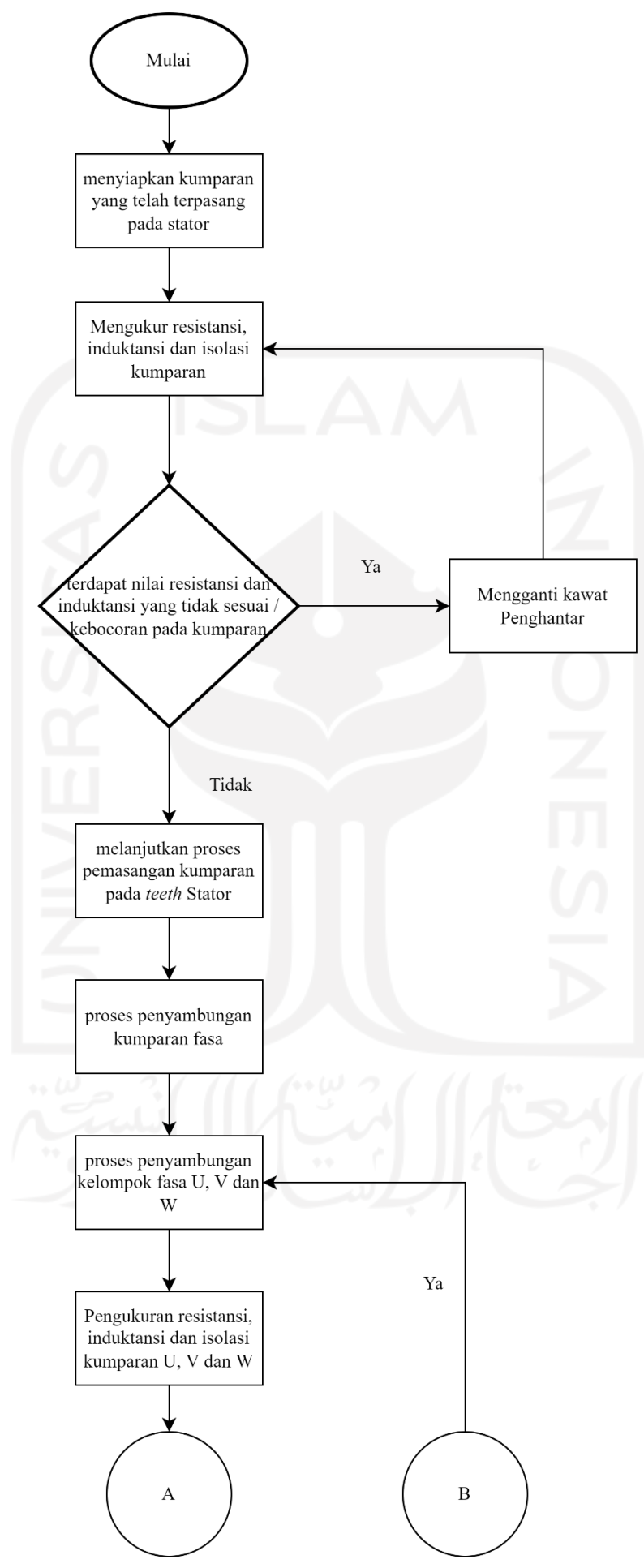


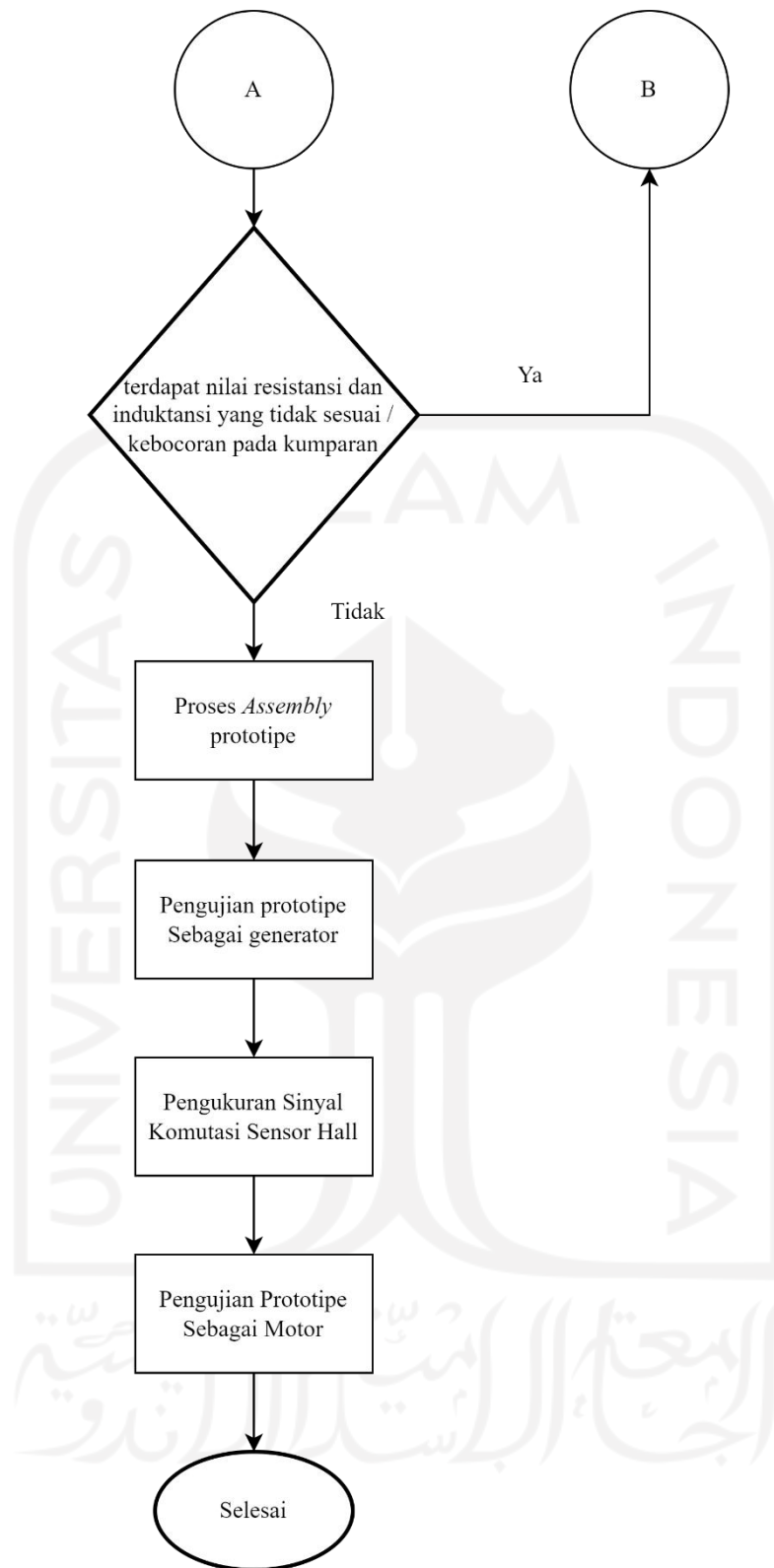
Gambar 3.6 Skema kumparan Motor *BLDC*

Pada Gambar 3.6 merupakan skema kumparan pada rancangan Motor *BLDC* , sehingga skema ini yang nantinya akan dijadikan acuan dalam proses manufaktur kumparan pada stator.

3.4 Metode Uji Coba dan Pengujian Usulan Rancangan Sistem

Dalam pengujian Motor *BLDC* , metode yang kami gunakan adalah sebagai berikut.





Gambar 3.7 Diagram pengukuran dan pengujian prototipe

1. Pengukuran Isolasi Kumparan

Pengukuran isolasi bertujuan untuk memastikan apakah terdapat kebocoran pada kumparan yang telah terpasang pada stator menggunakan alat ukur *megger*. Kebocoran pada kumparan dapat menyebabkan nilai isolasi menjadi rendah sehingga dapat

mengakibatkan kebocoran arus pada inti stator dan *noise* pada gelombang *Back EMF*. Pengukuran ini dilakukan pada dua kondisi, yang pertama adalah setelah dilakukan proses penyambungan fasa dan yang kedua setelah proses penyambungan fasa. Berikut merupakan langkah-langkah yang dilakukan dalam pengukuran isolasi kumparan.

- a) Siapkan kawat penghantar yang telah terpasang pada *teeth* stator.
- b) Siapkan alat ukur *megger* dan atur nilai tegangan suplai sebesar 250 V.
- c) Hubungkan salah satu ujung kawat penghantar dengan *probe ground* dan *probe* positif pada permukaan inti besi.
- d) Tekan tombol *start* saat dilakukan proses pengukuran dan amati nilai yang ditampilkan pada alat ukur selama kurang lebih 15 detik.
- e) Apabila nilai isolasi kawat penghantar bernilai 0 M Ω , maka terdapat kebocoran isolasi sehingga harus dilakukan penggantian kawat penghantar. Namun apabila nilai pengukuran melebihi 0 M Ω , maka dapat dilanjutkan pada proses pemasangan berikutnya hingga semua kawat penghantar terpasang.

Setelah semua kawat penghantar dihubungkan kedalam kelompok fasa U, V dan W dan *housing* sudah terpasang, ukur nilai masing-masing fasa dengan cara yang sama dengan proses pengukuran sebelumnya.



Gambar 3.8 Alat ukur *Megger*

2. Pengukuran Resistansi Kawat Penghantar

Metode yang digunakan dalam pengujian ini adalah dengan melakukan pengukuran pada kawat penghantar saat sebelum dan sesudah pengelompokan fasa dengan menggunakan alat ukur *Micro-Ohm Meter*. Pengukuran ini bertujuan untuk meminimalisir kesalahan dalam proses manufaktur kumparan. Selain itu, pengukuran ini bertujuan untuk membandingkan apakah nilai resistansi kumparan fasa sesuai dengan nilai resistansi pada

hasil simulasi yang diperoleh dari *software*. Pada hasil simulasi yang telah dilakukan, didapatkan nilai resistansi sebesar $0,03 \Omega$. Perbandingan nilai resistansi antara hasil pengukuran dengan hasil simulasi bertujuan untuk memastikan apakah kawat penghantar memiliki kuat hantar arus yang sudah sesuai dengan pemodelan pada *software*. Hasil pengukuran resistansi yang tidak sesuai atau kurang dari nilai yang tertera pada *software* dapat memperbesar resiko kawat penghantar terbakar ketika dialiri arus *rating* sebesar 28 A. Selain itu perbedaan nilai resistansi antar kumparan fasa dapat menyebabkan putaran rotor menjadi tidak optimal. Nilai tembaga yang melebihi angka yang tertera pada *software* juga dapat berpengaruh terhadap nilai efisiensi karena semakin besar nilai resistansi maka rugi-rugi tembaga akan semakin besar. Berikut merupakan langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengukuran resistansi kawat penghantar.

- a) Siapkan kawat penghantar yang sudah terpasang pada *teeth* stator dan juga alat ukur *Micro-Ohm Meter*.
- b) Hubungkan kedua ujung kawat penghantar dengan kedua *probe* alat ukur, lalu tekan tombol *start* untuk melakukan proses pengukuran.
- c) Setelah didapatkan hasil pengukuran pada semua kawat penghantar yang telah terpasang, hitung nilai resistansi total pada fasa U, V, W dan bandingkan nilainya dengan hasil simulasi.

Lakukan langkah-langkah diatas sesaat setelah dilakukanya proses penyambungan kelompok fasa, apabila terdapat nilai resistansi yang tidak sesuai dengan hasil simulasi maka tinjau kembali hasil sambungan pada fasa.



Gambar 3.9 *Micro-Ohm Meter*

3. Pengukuran Induktansi

Pengukuran ini dilakukan dengan mengukur keluaran nilai induktansi kawat penghantar setelah dan sebelum proses penyambungan kumparan fasa dengan menggunakan alat ukur *LCR-Meter*. Sebelum melakukan proses pengukuran, terlebih dahulu dilakukan perhitungan nilai frekuensi pembacaan alat ukur dengan persamaan 3.1.

$$f = \frac{Ns \times Np}{120} \quad (3.1)$$

$$f = \frac{2500 \times 10}{120}$$

$$f = 208 \text{ Hz}$$

Dimana :

f = frekuensi (Hz)

Ns = Kecepatan Putar (RPM)

Np = Jumlah Pole

Sehingga pada persamaan 3.1 didapatkan nilai frekuensi kerja alat ukur sebesar 120 Hz karena nilai ini yang paling mendekati nilai frekuensi kerja motor pada rating kecepatan 2500 RPM. Berikut merupakan langkah-langkah yang dilakukan dalam pengukuran induktansi.

- Siapkan *LCR Meter* dan kawat penghantar yang telah terpasang pada stator.
- Atur *mode* induktansi dan frekuensi kerja pembacaan alat ukur.
- Hubungkan kedua ujung kawat penghantar dengan kedua ujung *probe* dan amati hasil keluaran pembacaan alat ukur. Apabila nilai yang didapatkan tidak seragam dengan kumparan lain, maka dilakukan proses pemasangan ulang kumparan karena terdapat jumlah lilitan yang tidak sama.
- Lakukan proses diatas setelah dilakukan pengelompokan fasa.

Pengukuran induktansi bertujuan untuk meminimalisir kesalahan saat proses manufaktur kumparan. Kesalahan manufaktur kumparan dapat menyebabkan perbedaan nilai *peak* gelombang *Back EMF* yang diakibatkan oleh perbedaan jumlah lilitan pada stator.



Gambar 3.10 *LCR Meter*

Pengujian prototipe Sebagai Generator

Pengujian ini mengacu pada standar *IEEE Trial-Use Guide for Testing Permanent Magnet Machines* [11]. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mendiagnosa kondisi Motor *BLDC* sebelum dapat dioperasikan. Hasil dari pengujian nantinya digunakan untuk mengetahui keseimbangan gelombang *Back EMF*. Pengujian ini dilakukan tanpa memberikan suplai arus pada kumparan.

1. Pengukuran Gelombang *Back EMF*

Pengukuran gelombang *Back EMF* bertujuan untuk mendapatkan nilai *VDC* dan mengamati apakah bentuk gelombang yang dihasilkan berjarak 120° elektrik. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur tegangan antar fasa menggunakan osiloskop, sehingga akan tampak gelombang yang dihasilkan. Metode pengujian ini menggunakan motor yang dihubungkan langsung dengan prototipe sebagai alat uji putar agar didapatkan gelombang *Back EMF* dengan menggunakan variasi kecepatan putar pada rentang *100 RPM* hingga *2500 RPM*. Hasil pengujian *Back EMF* bertujuan untuk menghitung nilai *Ke* yang nantinya dapat dijadikan acuan dalam perhitungan nilai konstanta torsi (*Kt*) [12]. Untuk menentukan frekuensi dari putaran rotor, digunakan persamaan 3.1.

2. Pengukuran Sinyal Komutasi *six-step* Sensor Hall

Pengukuran sinyal komutasi *six-step* bertujuan untuk melihat apakah gelombang sensor hall yang dihasilkan sudah sesuai atau sinkron dengan keluaran gelombang *Back EMF*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan osiloskop. Metode pengujian ini adalah dengan melakukan uji putar menggunakan mesin bor untuk melihat sinyal komutasi keluaran sensor hall dan membandingkannya dengan gelombang keluaran *Back EMF*.

Apabila sinyal komutasi *six-step* dari sensor hall sudah sinkron dengan keluaran gelombang *Back EMF*, maka kontroler *BLDC* dapat memberikan arus *leading* yang mengakibatkan Motor *BLDC* dapat bekerja.

Pengujian prototipe Sebagai Motor

Pada Pengujian ini digunakan komponen baterai dan kontroler dengan menggunakan skema rangkaian seperti pada Gambar 3.2. Pengujian ini bertujuan untuk melihat apakah Motor *BLDC* dapat beroperasi ketika diberi arus pada kumparan. Pengujian ini dilakukan tanpa menggunakan beban, sehingga keluaran yang dihasilkan berupa gelombang *Back EMF* pada kecepatan putar *2500 RPM*, sehingga didapatkan nilai *VDC* untuk menghitung nilai *Ke*.



BAB 4 : Usulan Perancangan Sistem

4.1 Kesesuaian Usulan dan Hasil Perancangan Sistem

Tabel 4.1 Perbandingan usulan dan hasil prototipe sebagai generator

No	Spesifikasi Motor <i>BLDC</i>	Usulan	Realisasi
1	Kecepatan	2500 <i>RPM</i>	2500 <i>RPM</i>
2	Tegangan	60 V	30 V

Pada Tabel 4.1 menunjukkan bahwa hasil realisasi masih belum sesuai dengan usulan, dimana pada rating kecepatan 2500 *RPM* hanya mendapatkan tegangan keluaran sebesar 30 V. Pengujian ini dilakukan tanpa menggunakan beban sehingga menyebabkan beberapa parameter pengujian tidak dapat diperoleh, salah satunya adalah parameter torsi.

Tabel 4.2 Perbandingan usulan dan hasil prototipe sebagai motor

No	Spesifikasi Motor <i>BLDC</i>	Usulan	Realisasi
1	Kecepatan	2500 <i>RPM</i>	-
2	Tegangan	60 V	-

Pada Tabel 4.2 menampilkan perbandingan realisasi dengan usulan ketika prototipe di uji sebagai motor. Hasil yang didapatkan belum dapat diperoleh karena pengujian tidak dapat dilakukan. Hal ini disebabkan karena terjadi kesalahan dalam proses manufaktur kumparan sehingga mengakibatkan kerusakan pada kumparan. Kerusakan kumparan menyebabkan derajat fasa gelombang tidak berjarak 120° elektris.

Tabel 4.3 Perbandingan usulan dan realisasi prototipe

No	Spesifikasi	Usulan	Realisasi
1	<i>Supply Voltage</i>	72 V	-
2	<i>Rated Current</i>	28 A	-
3	<i>Rated Speed</i>	2500 <i>RPM</i>	2500 <i>RPM</i>
4	<i>Outer Diameter</i>	150 mm	149,99 mm

5	<i>Stack Height</i>	57 mm	57 mm
6	<i>Air Gap</i>	1 mm	1 mm
7	<i>Rotor Location</i>	<i>Interior</i>	<i>Interior</i>
8	<i>Number of Poles</i>	10	10
9	<i>Number of Slots</i>	21	21
10	<i>Number of Phases</i>	3	3

Pada Tabel 4.3 menunjukkan hasil perbandingan antara usulan dan realisasi spesifikasi prototipe. Pada pengujian prototipe sebagai motor belum berhasil dilakukan karena terdapat kerusakan pada kumparan. Sehingga pada Tabel 4.3 menunjukkan bahwa prototipe masih belum mampu untuk memenuhi target usulan.

Tabel 4.4 Perbandingan kesesuaian standar keteknikan

No	Nomor Standar	Judul	Kesesuaian
1	SNI 04-6189-1999	Pengukuran resistansi kumparan pada mesin listrik selama operasi tegangan bolak-balik.	Belum sesuai dengan standar yang ditetapkan, karena motor belum dapat dioperasikan.
2	SNI 04-1693-1989	Pendingin Mesin Sinkron.	Pendingin motor memanfaatkan desain <i>Housing</i> yang dirancang untuk memiliki disipasi panas pada bagian stator.
3	SNI IEC 60446:2011	Prinsip dasar dan keselamatan untuk antarmuka manusia dan mesin, penandaan dan identifikasi dengan warna atau huruf angka.	Dilakukan pelabelan warna pada masing-masing kumparan fasa U, V dan W dan pemberian pelabelan warna pada sensor hall.

Pada Tabel 4.4 merupakan perbandingan kesesuaian standar keteknikan antara usulan perancangan dengan hasil pada prototipe Motor *BLDC*.

Tabel 4.5 Perbandingan usulan dan realisasi dimensi rotor

No	Spesifikasi Rotor	Usulan	Realisasi
1	<i>Inner Diameter</i>	30 mm	29,80 mm

2	<i>Outer Diameter</i>	103 mm	102,77 mm
3	<i>Bridge Thickness</i>	1 mm	0,96 mm
4	<i>Magnet Inset Depth</i>	2,5 mm	3 mm
5	<i>Magnet Thickness</i>	6 mm	5,96 mm
6	<i>Magnet Width</i>	19,5 mm	19,48 mm

Tabel 4.6 Perbandingan usulan dan realisasi dimensi stator

No	Spesifikasi Stator	Usulan	Realisasi
1	<i>Inner Diameter</i>	105 mm	105 mm
2	<i>Outer Diameter</i>	150 mm	149,99 mm
3	<i>Slot Depth</i>	15,5 mm	15,5 mm
4	<i>Slot Opening Width</i>	4,3 mm	4,29 mm
5	<i>Tooth Tip Thickness</i>	1 mm	1 mm
6	<i>Tooth Width</i>	6,5 mm	6,5 mm

Sehingga pada tabel usulan dan realisasi Tabel 4.5 dan Tabel 4.6 diatas, diperoleh perbandingan dimensi antara usulan pemodelan dan realisasi prototipe sebagai berikut.



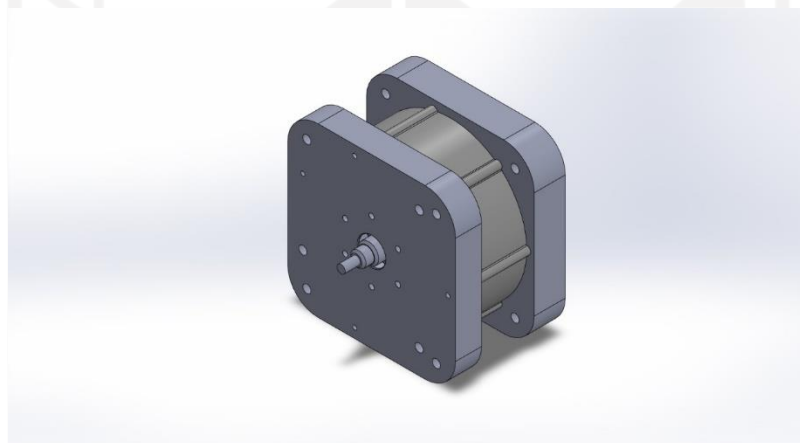
Gambar 4.7 Pengukuran diameter *outer* rotor

Pada hasil pengukuran menggunakan jangka sorong, didapatkan nilai 102,77 mm, sehingga didapatkan nilai *error* sebesar 0,23 mm. Hasil ini sudah cukup menunjukkan tingkat akurasi dari hasil manufaktur inti besi.



Gambar 4.8 Pengukuran diameter *outer* stator

Pada Gambar 4.8 menunjukkan hasil pemotongan inti stator, sehingga didapatkan nilai 149,99 mm dan nilai *error* yang didapatkan bernilai 0,01 mm.



Gambar 4.9 Usulan perancangan prototipe



Gambar 4.10 Realiasi prototipe

Pada gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan kesesuaian antara perancangan dan realisasi prototipe setelah proses pemasangan *housing*. Hasil realisasi yang diperoleh sudah sesuai dengan usulan, baik secara desain dan material yang digunakan.

4.2 Kesesuaian Perencanaan dalam Manajemen Tim dan Realisasinya

Dalam proses perancangan dan pembuatan Motor *BLDC* terjadi kemunduran waktu pengerjaan karena terdapat kesalahan pada proses manufaktur yang dilakukan oleh vendor ketika pemotongan inti besi (*core*). Selain itu terjadi kendala pada proses manufaktur kumparan pada stator yang diakibatkan oleh kebocoran nilai isolasi pada kumparan.

Tabel 4.7 Kesesuaian antara usulan dan realisasi *timeline* pengerjaan prototipe

No	Kegiatan	Usulan waktu	Realisasi Pelaksanaan
1	Pemodelan	Januari - Maret	Januari - Maret
2	Simulasi	Januari - Maret	Januari - Maret
3	Pembelian Bahan	Februari - Maret	Februari - Juni
4	Manufaktur	April - Mei	Mei - Juli
5	<i>Assembly</i>	Mei	Juli
6	Pengukuran	Mei	Juli
7	Pengujian	Juni	Juli
8	Pembuatan Laporan Akhir	Mei - Juli	Mei - Juli

Tabel 4.8 Kesesuaian usulan anggaran dan realisasi pada prototipe

No	Jenis Pengeluaran	Usulan Biaya		Realisasi Biaya	
		Kuantitas	Total Harga	Kuantitas	Total Harga
1	Magnet N42(40x10x2 mm)	40 pcs	600,000.00	100 pcs	6,15,000
2	Lilitan (0.5 mm)	1 pcs	120,000.00	2 pcs	400,000
3	Core Material (Plat Besi)	40 pcs	1,400,000.00	-	-
4	Shaft	1 pcs	180,000.00	1	-
5	<i>Housing</i>	2 pcs	240,000.00	1	-

6	Bearing (30mm)	2 pcs	61,000.00	2	64,000
7	Hall Sensor	3 pcs	105,000.00	6	84,000
8	Laser Cut	1 pcs	1,797,837.10	1	-
9	Bubut	1 pcs	500,000.00	1	-
10	Kertas Nomex (0.2mm)	1 pcs	55,000.00	2	93,000
11	Insulating Varnish	2 pcs	120,000.00	2	-
12	Kabel AWG (8)	3 pcs	15,000.00	3	-
13	1 Set <i>Housing</i> + Bubut	-	-	1	1,500,00
14	Laser cut + material	-	-	1	3,996,000
15	baut baja M4	-	-	25	130,000
16	Snap Ring S30	-	-	6	38,000
17	Timah Solder	-	-	1	146,000
18	Material <i>Housing</i>	-	-	1	800,000
TOTAL			5,193,837.10	TOTAL	7,251,000

4.3 Analisis dan Pembahasan Kesesuaian antara Perencanaan dan Realisasi

- Pada hasil perancangan atau desain Motor *BLDC* , didapatkan nilai daya mekanis yang sudah sesuai dengan perhitungan daya mekanis pada kendaraan. Namun pada hasil realisasi masih belum sesuai karena prototipe belum mampu bekerja ketika dilakukan pengujian motor karena terdapat kesalahan dalam proses manufaktur kumparan.
- Dimensi yang digunakan pada prototipe sudah sesuai dengan hasil pada rancangan usulan, dimana didapatkan nilai diameter luar sebesar 150 mm. Selain itu material inti besi yang digunakan pada proses manufaktur juga sudah sesuai dengan perancangan, yaitu menggunakan material *Carbon Steel*.
- Pada proses manufaktur kumparan, terdapat perubahan pada diameter tembaga. Hal ini bertujuan untuk mempermudah proses manufaktur kumparan. Perubahan lain yang dilakukan terdapat pada konfigurasi kumparan, yang sebelumnya menggunakan

konfigurasi *side-side* menjadi *over-under*. Selain itu karena proses manufaktur kumparan dilakukan secara manual, maka jumlah kumparan yang terpasang pada *teeth* stator belum sesuai dengan perancangan, dimana pada perancangan jumlah kumparan yang digunakan sebanyak 7 lilitan, namun pada proses manufaktur hanya memperoleh 6 lilitan.

- Pada hasil pengukuran alat, didapatkan nilai resistansi yang tidak sesuai, dimana terdapat lonjakan nilai pada salah satu fasanya. Hal ini dikarenakan terdapat beberapa tembaga yang tidak terhubung dengan baik sehingga nilai resistansinya menjadi tidak seimbang.
- Pada pengujian induktansi kumparan, nilai yang diperoleh dapat dikatakan seimbang. Hal ini dibuktikan dengan hasil pengukuran yang dilakukan, didapatkan nilai induktansi pada masing-masing fasa U, V dan W sebesar 71,8 μH , 69,9 μH dan 67,8 μH . Hasil tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat kumparan dengan jumlah lilitan yang kurang atau berlebih. Keseimbangan nilai induktansi pada kumparan sangat penting karena dapat mempengaruhi nilai *peak* gelombang *Back EMF*.
- Pada pengujian isolasi kumparan sebelum dilakukan pemasangan *housing*, didapatkan nilai yang sudah diatas batas aman. Hal ini terbukti pada proses pengukuran yang dilakukan dengan menggunakan *megger*, didapatkan nilai tahanan isolasi sebesar *OL (Overload)* atau melebihi batas pembacaan alat ukur yang mana bernilai 100 $\text{M}\Omega$ pada tegangan 250 V. Namun setelah proses penyambungan kumparan dan pemasangan *housing* dilakukan, didapatkan kebocoran isolasi pada kumparan, sehingga harus dilakukan perbaikan pada kumparan.
- Hasil keluaran tegangan *Back EMF* pada pengujian prototipe sebagai generator masih belum sesuai dengan perolehan pada hasil simulasi, dimana didapatkan nilai *Back EMF* sebesar 60 V, sedangkan pada realisasi hanya mendapatkan nilai sebesar 30 V.
- Pada pengujian sinyal komutasi sensor hall dapat dikatakan sesuai karena sinyal keluaran yang diperoleh sudah sinkron dengan keluaran gelombang *Back EMF*.
- Pada proses pengujian prototipe sebagai motor, hasil yang diperoleh masih belum sesuai karena terdapat kerusakan pada kumparan sehingga menyebabkan prototipe tidak dapat bekerja.

BAB 5 : Implementasi Sistem dan Analisis

5.1 Hasil dan Analisis Implementasi

Hasil pengujian yang telah dilakukan bertujuan untuk melihat kinerja dari alat dengan beberapa indikator pengukuran yang dilakukan meliputi pengukuran resistansi, induktansi dan isolasi kumparan. Nantinya hasil pengukuran ini dapat berpengaruh terhadap nilai rugi-rugi yang dihasilkan tembaga, medan magnet yang dihasilkan serta nilai isolasi pada kumparan. Tujuan utama dari pengukuran ini adalah untuk meminimalisir kesalahan dalam proses manufaktur. Selain itu dilakukan juga pengukuran gelombang *Back EMF* yang bertujuan untuk mendapatkan nilai *VDC* rata-rata dan pengukuran sinyal komutasi *six-step* yang bertujuan untuk melihat sinyal komutasi sensor hall ketika mendeteksi posisi magnet pada rotor.

5.1.1 Pengukuran Resistansi Kumparan

Tujuan dari pengukuran resistansi adalah untuk meminimalisir resiko kesalahan dalam proses manufaktur kumparan dan membandingkan hasil pengukuran dengan hasil simulasi. Pada simulasi yang telah dilakukan, diperoleh nilai resistansi sebesar $0,03 \Omega$. Tujuan dari membandingkan hasil pengukuran dengan hasil simulasi adalah untuk memastikan tembaga memiliki kuat hantar arus yang sesuai dengan perancangan. Selain itu, nilai resistansi kawat penghantar juga berpengaruh terhadap nilai efisiensi yang diakibatkan oleh rugi-rugi tembaga.

Tabel 5.1. Pengukuran resistansi kumparan sebelum proses penyambungan fasa

No	Fasa	Nilai (m Ω)
1	U1	5,12
2	W7	3,41
3	V4	3,05
4	U2	5,2
5	V5	3,1
6	U3	3,7
7	V6	4,6
8	W1	2,95
9	V7	4,05
10	U4	7,3
11	W2	7,85
12	U5	2,54
13	W3	4
14	U6	2,7
15	V1	4,26
16	U7	2,41
17	W4	2,92
18	V2	2,68

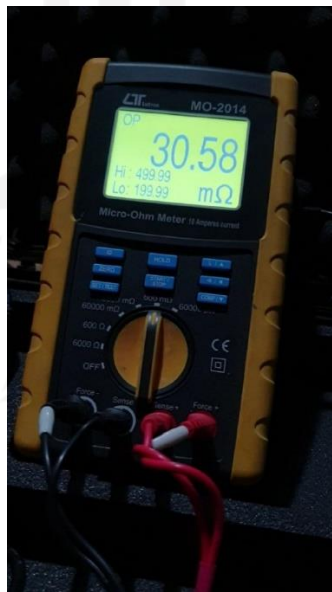
19	W5	3,3
20	V3	3,4
21	W6	5,98

Berdasarkan Tabel 5.1 menunjukkan bahwa masih terdapat tembaga yang belum terhubung dengan baik. Hal tersebut dibuktikan oleh nilai resistansi yang tidak sama pada masing-masing kumparan yang telah terpasang pada *teeth* stator.

Tabel 5.2 Nilai resistansi sebelum dan setelah penyambungan kelompok fasa

Fasa	Sebelum Penyambungan (mΩ)	Setelah Penyambungan (mΩ)
U	28,97	35,7
V	25,14	65,9
W	30,41	30,59

Pada tabel 5.2 menunjukkan nilai resistansi kawat penghantar sebelum dan setelah proses penyambungan kelompok fasa. Hasil tersebut masih belum sesuai karena terdapat perbedaan nilai resistansi pada fasa V setelah dilakukan penyambungan kelompok fasa. Perbedaan nilai resistansi pada fasa V dapat mempengaruhi kinerja dari prototipe, dimana arus yang melewati kawat penghantar menjadi tidak seimbang, sehingga menyebabkan kinerja dari prototipe tidak optimal. Hasil pengukuran resistansi yang dilakukan masih belum sesuai dengan target perancangan sehingga masih diperlukan perbaikan pada sambungan pada fasa V.



Gambar 5.1 Pengukuran resistansi kumparan

5.1.2 Pengukuran Induktansi

Pengukuran induktansi berpengaruh terhadap medan magnet yang dihasilkan kumparan terhadap inti stator, sehingga semakin tinggi nilai induktansi maka nilai medan magnet yang dihasilkan juga semakin besar. Nantinya hasil tersebut berpengaruh terhadap keluaran *peak* gelombang *Back EMF*. Tujuan dari pengukuran ini adalah untuk meminimalisir resiko kesalahan dalam proses manufaktur kumparan dimana proses ini dilakukan secara manual, sehingga dibutuhkan ketelitian. Besar kecilnya nilai induktansi dipengaruhi oleh jumlah lilitan pada *teeth* stator.

Tabel 5.3. Pengukuran nilai induktansi pada kumparan sebelum proses pengelompokan fasa

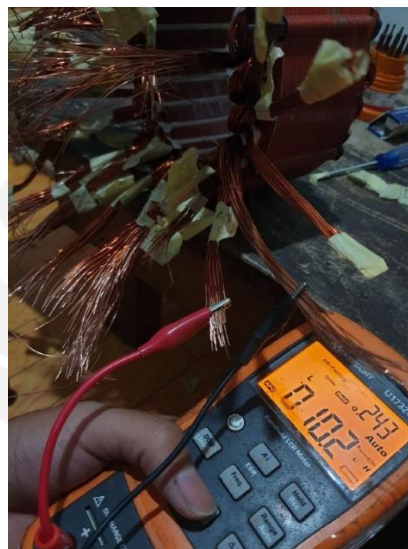
No	Nama	Nilai (μH)
1	U1	10,6
2	W7	9,8
3	V4	10,6
4	U2	10,8
5	V5	9,6
6	U3	10,4
7	V6	9,4
8	W1	9,6
9	V7	10,2
10	U4	10,7
11	W2	9,6
12	U5	9,3
13	W3	10
14	U6	9,6
15	V1	10,1
16	U7	10,4
17	W4	9,3
18	V2	10,5
19	W5	9,8
20	V3	9,5
21	W6	9,7

Pada Tabel 5.3, didapatkan hasil pengukuran induktansi kumparan setelah dipasang pada *teeth* stator menggunakan alat ukur *LCR Meter*, hasil tersebut sudah sesuai dengan target karena tidak terdapat kumparan yang jumlah lilitannya kurang atau berlebih. Pengujian nilai induktansi dapat digunakan untuk melihat keseimbangan jumlah lilitan pada *slot* stator. Perbedaan jumlah lilitan pada *teeth* stator dapat menyebabkan nilai induktansi menjadi tidak seimbang. Berdasarkan data pengukuran pada Tabel 5.3, maka dapat dilakukan kalkulasi nilai induktansi pada fasa U, V dan W sebagai berikut.

Tabel 5.4 Nilai induktansi sebelum dan setelah penyambungan kelompok fasa

Fasa	Sebelum Penyambungan (μH)	Setelah Penyambungan (μH)
U	71,8	69,8
V	69,9	68,9
W	67,8	69,5

Pada tabel 5.4 menunjukkan hasil perbandingan nilai induktansi sebelum dan sesudah proses penyambungan kelompok fasa. Hasil tersebut sudah sesuai karena nilai yang diperoleh menunjukkan bahwa tidak terdapat tembaga dengan jumlah lilitan yang kurang atau berlebih yang ditunjukkan oleh nilai induktansi yang seragam.



Gambar 5.2 Pengukuran induktansi kumparan

5.1.3 Pengukuran Nilai Isolasi Kumparan

Isolasi pada inti besi merupakan pemisah antara daerah bertegangan yang terbuat dari bahan dielektrik, dalam hal ini adalah *core* stator dan kumparan. Fungsi dari isolasi adalah memisahkan dua bagian yang memiliki perbedaan nilai tegangan, sehingga tidak terjadi lompatan tegangan ataupun percikan bunga api. Pada mesin listrik bertegangan tinggi, kegagalan isolasi dapat menyebabkan kerusakan pada alat [13].

Tabel 5.5 Nilai isolasi kumparan sebelum proses pemasangan *housing*

No	Nama	Nilai ($\text{M}\Omega$)
1	U1	OL
2	W7	OL
3	V4	OL
4	U2	OL
5	V5	OL

6	U3	OL
7	V6	OL
8	W1	OL
9	V7	OL
10	U4	OL
11	W2	OL
12	U5	OL
13	W3	OL
14	U6	OL
15	V1	OL
16	U7	OL
17	W4	OL
18	V2	OL
19	W5	OL
20	V3	OL
21	W6	OL

Pada Tabel 5.5 merupakan hasil pengukuran isolasi pada masing-masing kumparan yang telah terpasang pada *teeth* stator. Pada pengukuran ini, kumparan diberikan tegangan suplai sebesar 250 V dengan menggunakan alat ukur *megger*, sehingga didapatkan nilai tahanan isolasi dengan nilai *OL* (*Overload*). Maka dapat dikatakan bahwa tidak terjadi kebocoran isolasi pada kumparan, sehingga dapat dilakukan proses pemasangan *housing*.

Tabel 5.6 Nilai isolasi kumparan setelah proses pemasangan *housing*

U (MΩ)	V (MΩ)	W (MΩ)
0	0	0

Pada proses pengukuran isolasi setelah dilakukan proses pemasangan *housing*, ditemukan kebocoran yang disebabkan oleh sambungan kumparan yang tidak terlindungi dengan sempurna. Hal ini ditunjukkan dengan nilai isolasi kumparan yang bernilai 0 MΩ pada fasa U, V dan W. Hasil pengukuran isolasi menunjukkan bahwa masih harus dilakukan perbaikan ulang pada kumparan agar prototipe dapat bekerja dan mengurangi resiko kerusakan pada alat.



Gambar 5.3 Pengukuran isolasi kumparan

5.1.4 Pengukuran Gelombang *Back EMF*

Pengukuran gelombang *Back EMF* dilakukan untuk melihat kesesuaian antara nilai *VDC* hasil pengukuran dengan hasil simulasi. Nilai *Back EMF* nantinya akan dijadikan parameter dalam perhitungan nilai *VDC* rata-rata untuk mendapatkan nilai *Ke* dan *Kt*. Pengujian ini dilakukan pada variasi kecepatan putar pada rentang 100 *RPM* hingga 2500 *RPM* dengan menggunakan mesin bor, sehingga didapatkan hasil *peak-peak* gelombang *Back EMF* pada Tabel 5.7.

Tabel 5.7 Hasil pengukuran nilai *Back EMF*

No	Frekuensi (Hz)	RPM	Tegangan Antar Fasa		
			U-V (V)	V-W (V)	W-U (V)
1	8	100	1,12	0,72	1,2
2	16	200	2,12	1,4	2,24
3	24	300	3,08	2,24	3,24
4	32	400	4,24	2,22	4,36
5	40	500	5,4	2,74	5,24
6	48	600	6,56	3,06	6,4
7	56	700	7,6	3,36	7,52
8	64	800	8,8	3,86	8,64
9	72	900	9,6	4,2	10,5
10	80	1000	10,6	4,64	10,6
11	88	1100	12,5	5,24	11,7
12	96	1200	14,6	5,36	12,7
13	104	1300	16,2	5,76	14
14	112	1400	16,8	6,28	15,8
15	120	1500	18,2	6,92	16,8

16	128	1600	19,4	7,12	17
17	136	1700	20,8	7,44	18,6
18	144	1800	22	7,68	19,2
19	152	1900	23,2	8,16	20,6
20	160	2000	24,2	8,56	21,4
21	168	2100	25,4	8,88	22,4
22	176	2200	26,6	9,28	23,2
23	184	2300	29	9,76	24,6
24	192	2400	29,6	9,92	25,4
25	200	2500	30,2	10,4	26,2

Pada Tabel 5.7 menunjukkan hasil nilai gelombang *Back EMF* pada variasi kecepatan putar dari rentang 100 RPM hingga 2500 RPM. Pada keluaran V-W, didapatkan nilai keluaran yang tergolong lebih rendah jika dibandingkan dengan tegangan antar fasa U-V dan W-U. Hal ini diakibatkan oleh kesalahan dalam proses manufaktur kumparan, sehingga menyebabkan keluaran gelombang puncak pada fasa V-W tidak optimal. Dari hasil pengukuran nilai *Back EMF*, maka didapatkan perhitungan nilai *VDC* rata-rata pada persamaan 5.1.

$$VDC_{rata - rata} = \frac{30,2 + 10,4 + 26,2}{3} \quad (5.1)$$

$$VDC_{rata - rata} = 22,26 V$$

Sehingga dari persamaan 5.1, diperoleh hasil nilai *VDC* rata-rata sebesar 22,6 V. Pada hasil simulasi didapatkan nilai *VDC* rata-rata sebesar 60 V, sehingga dari hasil tersebut dapat dikatakan bahwa keluaran prototipe masih belum sesuai dengan perancangan. Dari perolehan nilai *VDC* maka dapat dilakukan perhitungan nilai *Ke* pada persamaan 5.2.

$$Ke = \frac{VDC_{rata - rata}}{\omega} \quad (5.2)$$

$$Ke = \frac{22,6}{261,7}$$

$$Ke = 0,086$$

Dari hasil perhitungan nilai *VDC* rata-rata, maka diperoleh nilai *Ke* sebesar 0,086. Nilai *Ke* yang diperoleh dapat dijadikan sebagai parameter untuk menghitung torsi keluaran prototipe, karena nilai *Ke* memiliki nilai yang ekuivalen dengan nilai *Kt* yang mana merupakan nilai konstanta torsi. Hal tersebut dapat dibuktikan dalam persamaan 5.3.

$$K_e = K_t \tag{5.3}$$

$$\frac{VDC \text{ rata - rata}}{\omega} = \frac{Torsi}{Arus}$$

Sehingga didapatkan perhitungan nilai torsi pada persamaan 5.4.

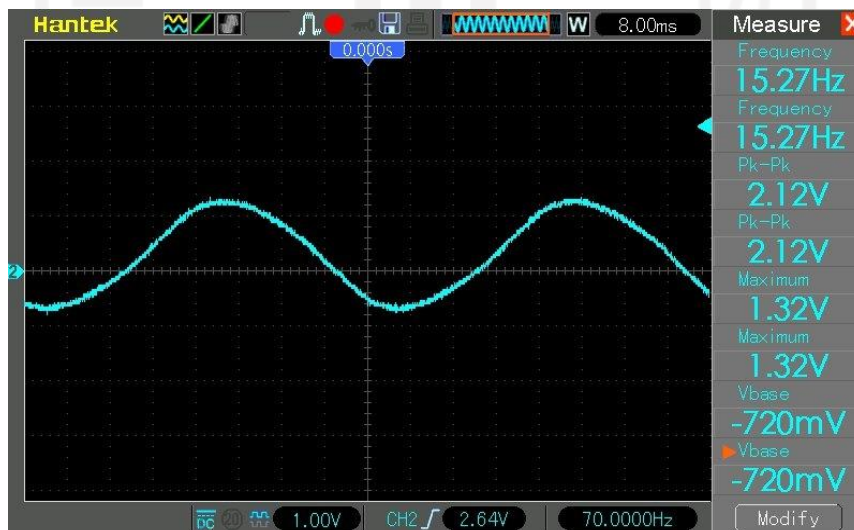
$$Torsi = Arus \times K_e \tag{5.4}$$

$$Torsi = 28 \times 0,086$$

$$Torsi = 2,4 \text{ Nm}$$

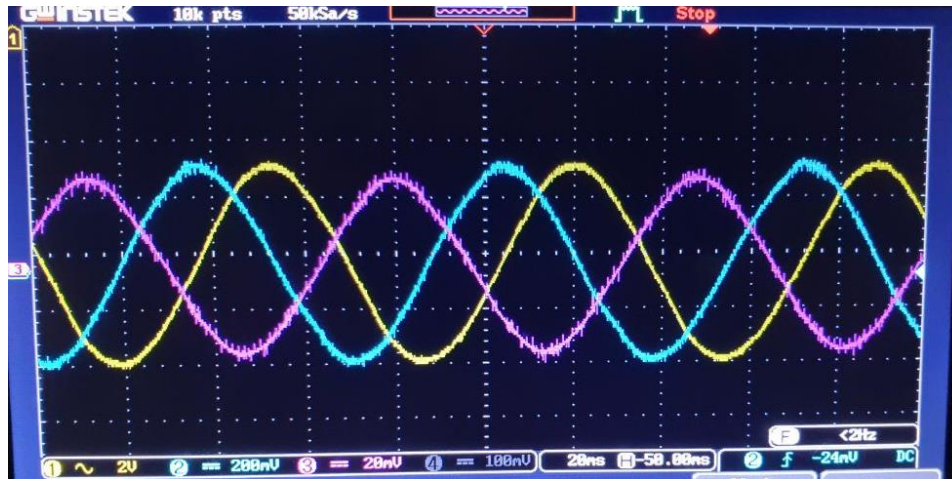
Berdasarkan perhitungan torsi dengan menggunakan nilai K_e , maka didapatkan nilai torsi sebesar 2,4 Nm dengan asumsi nilai arus yang digunakan sesuai pada usulan perancangan sebesar 28 A.

Dari hasil pengukuran gelombang *Back EMF* yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa hasil nilai *VDC* belum memenuhi target yang sesuai dengan hasil simulasi yang bernilai 60 V pada kecepatan 2500 rpm. Hal tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti kesalahan dalam proses manufaktur kumparan pada fasa V-W. selain itu, nilai tegangan antar fasa pada W-U juga mengalami penurunan seiring bertambahnya kecepatan, hal ini dapat terjadi karena panas pada inti stator yang diakibatkan oleh rugi-rugi berupa arus *eddy* dan *hysterisis*.



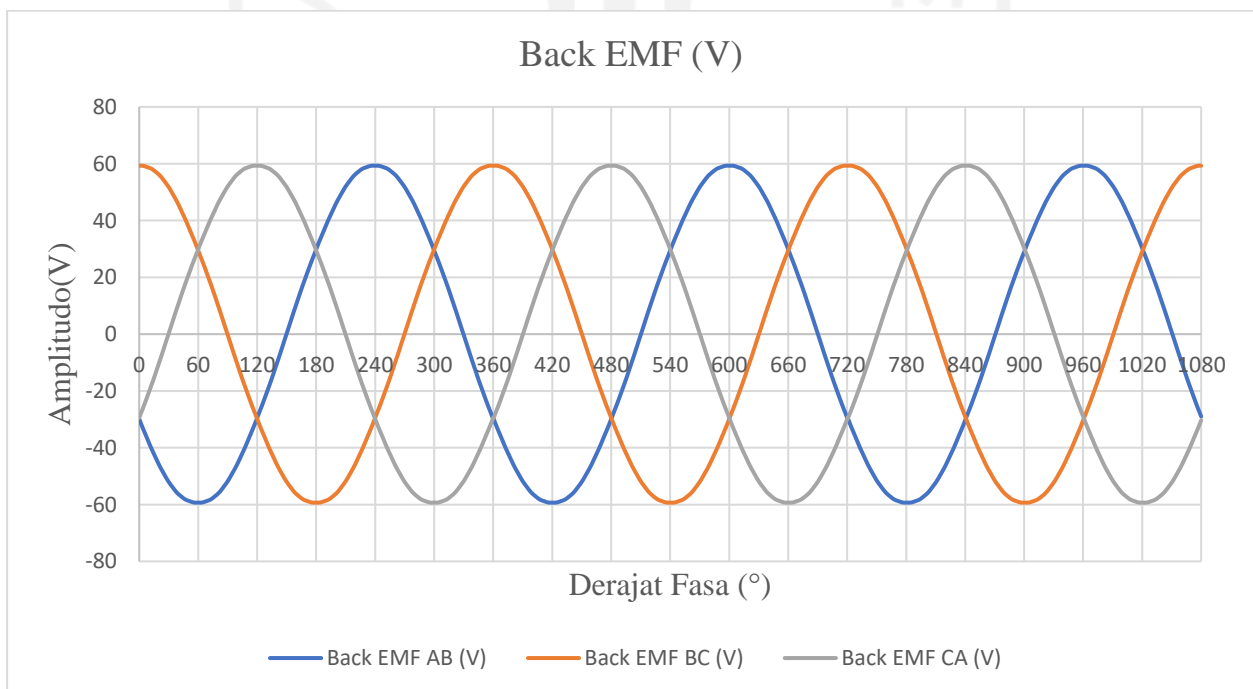
Gambar 5.4 Pengukuran gelombang keluaran *Back EMF* pada Osiloskop

Pada Gambar 5.4 menampilkan keluaran gelombang *Back EMF* pada frekuensi 15 Hz. Berdasarkan gambar tersebut, hasil gelombang keluaran sudah berbentuk sinusoidal.



Gambar 5.5 Pengukuran gelombang *Back EMF* 3 fasa

Gambar 5.5 menunjukkan hasil pengujian prototipe sebagai generator yang bertujuan untuk melihat jarak derajat antar fasa gelombang U, V dan W. Sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil gelombang yang diperoleh belum sesuai dengan hasil simulasi yang dilakukan. Pada simulasi didapatkan keluaran gelombang 3 fasa dengan jarak sebesar 120° elektrik sesuai dengan Gambar 5.6, namun pada hasil pengujian belum menunjukkan kesesuaian jarak fasa. Sehingga dapat disimpulkan bahwa salah satu penyebab prototipe tidak dapat bekerja disebabkan oleh kesalahan dalam proses manufaktur kumparan yang berpengaruh terhadap hasil keluaran gelombang antar fasa tidak berjarak 120° elektrik.



Gambar 5.6 Hasil simulasi gelombang *Back EMF* 3 fasa

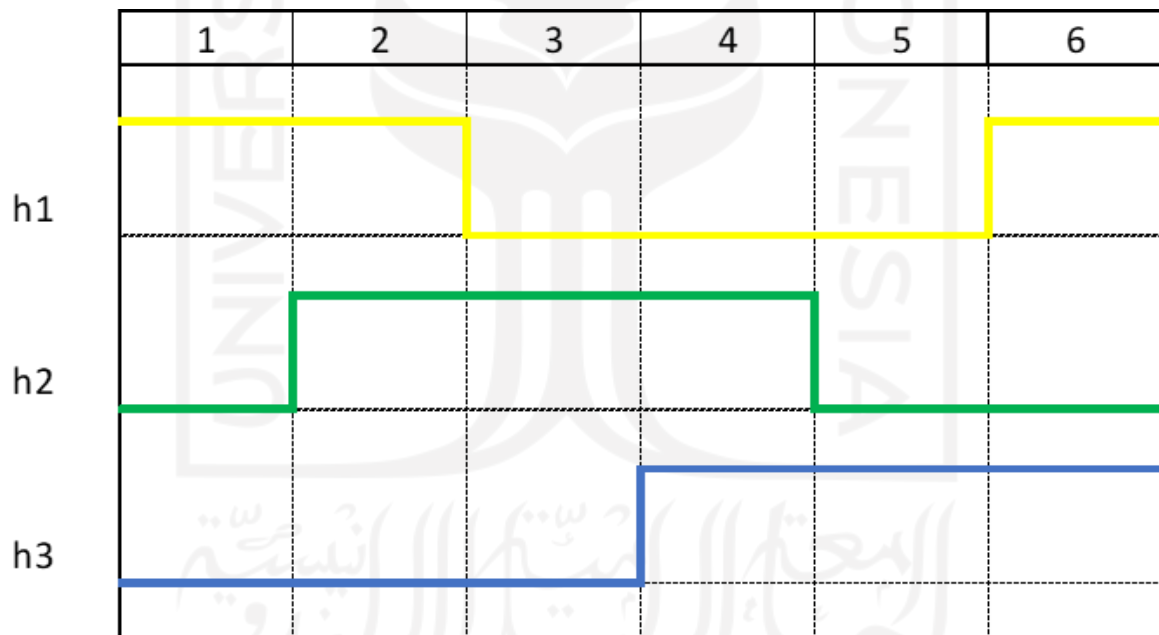
5.1.5 Pengukuran Sinyal Komutasi *Six-Step*

Sensor hall merupakan alat komutasi yang digunakan untuk mengatur sistem *switching* arus pada Motor *BLDC*. Cara kerja dari sensor hall yaitu dengan mendeteksi posisi magnet pada rotor sehingga nantinya kontroler *BLDC* dapat memberikan arus *leading* pada kumparan stator [14]. Pada proses pengukuran sinyal komutasi yang telah dilakukan, didapatkan hasil keluaran sinyal sensor hall sebagai berikut.

Tabel 5.10 Hasil keluaran sinyal komutasi *six-step* sensor hall

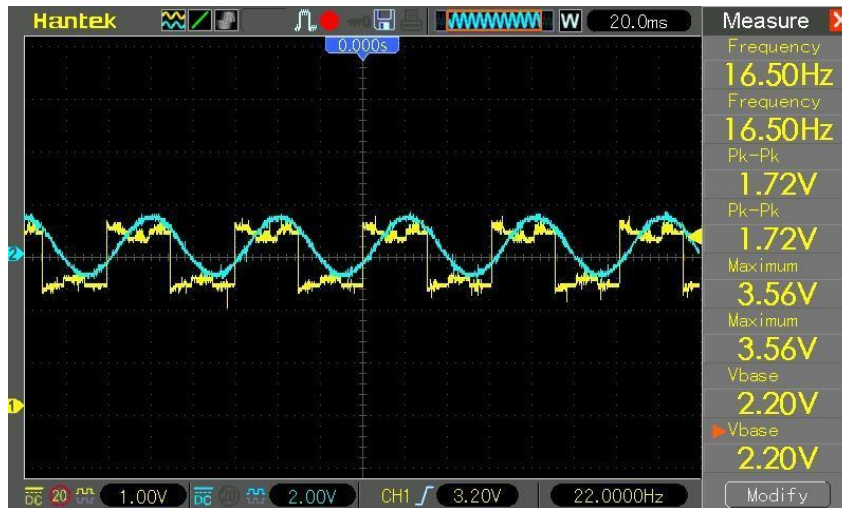
	Step					
	1	2	3	4	5	6
H1	1	1	0	0	0	1
H2	0	1	1	1	0	0
H3	0	0	0	1	1	1

Pada Tabel 5.10 menunjukkan hasil keluaran komutasi dari sensor hall, sehingga pada satu putaran mekanik rotor menghasilkan 6 sekuens sinyal listrik.



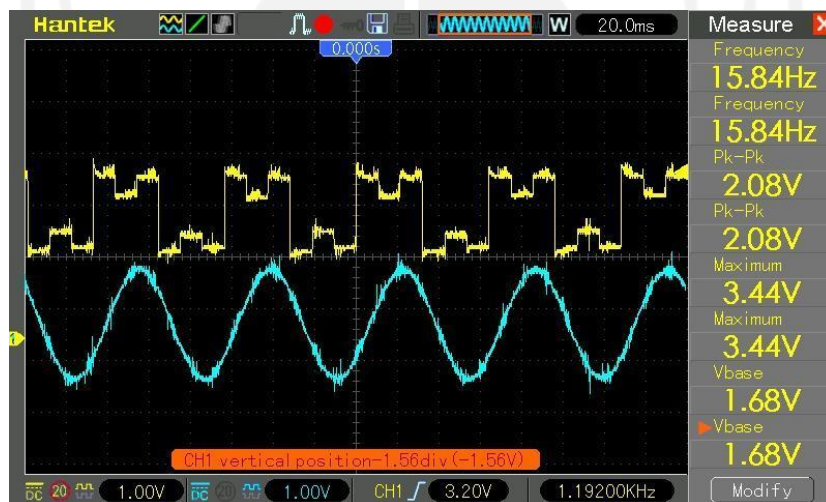
Gambar 5.2 Grafik keluaran sinyal *six-step* sensor hall

Siklus yang terbentuk pada Gambar 5.2 akan mengalami perulangan, sehingga menyebabkan motor berputar secara kontinu selama kumparan stator dialiri oleh arus menggunakan jenis kontroler *six-step*.



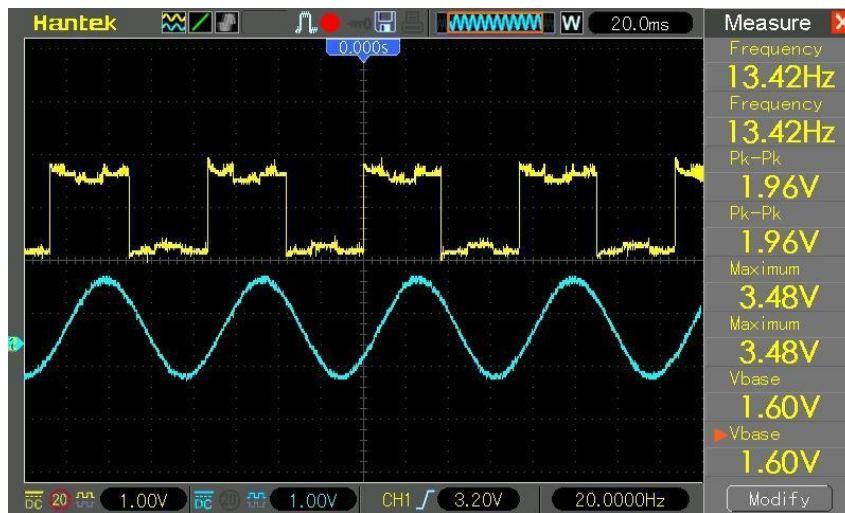
Gambar 5.3 Gelombang keluaran sinyal six-sep H1 terhadap gelombang *Back EMF*

Pada Gambar 5.3 menunjukkan hasil keluaran sinyal H1 terhadap fasa U-V. Gelombang keluaran yang dihasilkan sudah sinkron dengan gelombang *Back EMF* pada fasa U-V.



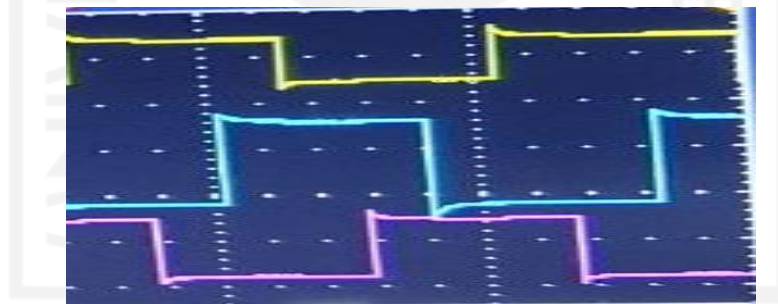
Gambar 5.4 Gelombang keluaran sinyal *six-step* H2 terhadap gelombang *Back EMF*

Pada Gambar 5.4 menunjukkan hasil keluaran sinyal H2 terhadap keluaran tegangan antar fasa V-W.



Gambar 5.5 Gelombang keluaran sinyal *six-step* H3 terhadap gelombang *Back EMF*

Pada Gambar 5.5 menunjukkan gelombang keluaran tegangan antar fasa W-U terhadap sensor H3, namun terdapat sedikit pergeseran derajat fasa yang diakibatkan oleh perputaran rotor yang tidak presisi. Hal ini menyebabkan pembacaan sensor hall terhadap magnet menjadi kurang akurat. Kondisi tersebut juga terjadi pada keluaran gelombang H1 dan H2. Pembacaan sensor hall yang kurang akurat dapat mempengaruhi arus *leading* yang diberikan kontroler *BLDC* terhadap kumparan, sehingga menyebabkan performa dari motor kurang optimal.



Gambar 5.6 Sinyal komutasi *six-step* H1, H2 dan H3

Gambar 5.6 merupakan hasil keluaran sinyal komutasi *six-step* sensor H1, H2 dan H3. Sehingga dapat disimpulkan bahwa keluaran komutasi *six-step* sudah menunjukkan bahwa bentuk sinyal yang dihasilkan sudah sesuai dengan sinyal komutasi *six-step* pada gambar 5.2.

Pengujian Prototipe Sebagai Motor

Pada pengujian sistem rangkaian tertutup, digunakan komponen kontroler dan baterai yang bertujuan untuk menguji apakah alat dapat berputar atau bekerja dengan baik. Pada pengujian yang telah dilakukan, alat belum dapat bekerja dengan baik karena masih terdapat kerusakan pada kumparan dan masih memerlukan perbaikan.

5.2 Pengalaman Pengguna

Tabel 5.11 Pengalaman pengguna

No	Fitur/Komponen	Capaian	Aksi/Perbaikan
1	Uji <i>Back EMF</i>	Telah dilakukan pengujian gelombang <i>Back EMF</i> dengan variasi kecepatan putar 100-2500 <i>RPM</i> . dari hasil yang telah didapatkan, keluaran dari nilai <i>Back EMF</i> belum sesuai dengan hasil simulasi yang telah dilakukan.	Meninjau kembali konfigurasi kumparan pada stator
.2	Uji Hall Sensor	Hasil gelombang <i>Back EMF</i> sudah linear dengan gelombang sinyal sensor hall.	Dipertahankan.
3	Pengukuran Resistansi	Hasil Resistansi sebelum proses soldering pada masing-masing kumparan sudah seimbang, namun setelah proses soldering kumparan terdapat ketidakseimbangan nilai resistansi pada fasa V.	Melakukan peninjauan kembali sambungan pada kumparan fasa V.
4	Pengukuran Induktansi	Hasil dari pengukuran Induktansi pada masing-masing kumparan sudah seimbang.	Dipertahankan.
5	Pengukuran Isolasi Tahanan	Hasil pengukuran isolasi tahanan sudah mengindikasikan tidak ada kebocoran pada kumparan. Namun setelah dilakukan pemasangan <i>housing</i> , nilai isolasi kumparan mengalami penurunan atau terjadi kebocoran	Mengganti kumparan atau melakukan laminasi pada kumparan yang mengalami kebocoran.
6	Pengujian Rangkaian tertutup Sistem	Sudah dilakukan pengujian, namun alat masih belum bekerja	Meninjau kembali prototipe, terutama pada bagian kumparan.

5.3 Dampak Implementasi Sistem

5.3.1 Teknologi/Inovasi

Menggunakan jenis topologi rotor *inner-runner*, sehingga lebih fleksibel dalam pengaplikasiannya. Hal ini dikarenakan jenis topologi ini memiliki karakter putaran yang tinggi, sehingga dapat dengan mudah dilakukan rasio kecepatan. Selain itu, jenis topologi *inner-runner* memiliki dimensi yang lebih *compact* daripada jenis topologi *outer-runner*. Saat ini jenis topologi *inner-runner* tidak hanya diaplikasikan pada teknologi kendaraan saja, tapi juga bisa digunakan untuk kebutuhan pompa air, industri *machining* seperti *CNC*, dan mesin automasi pada industri.

5.3.2 Ekonomi (Optional 1)

Motor *BLDC* merupakan salah satu *core technology* yang berkembang karena jenis mesin listrik ini banyak digunakan pada beberapa sektor industri, salah satunya adalah sektor otomotif. Kelebihan yang dimiliki Motor *BLDC* adalah memiliki efisiensi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan jenis motor yang lain seperti motor induksi. Selain itu dengan dimensi yang sama, Motor *BLDC* mampu menghasilkan densitas daya yang lebih besar. Oleh karena itu pengembangan Motor *BLDC* dapat menopang sektor industri di masa depan. Apabila kita bisa menguasai teknologi dan kebutuhan pasar, maka bukan tidak mungkin pengembangan motor *BLDC* dapat meningkatkan perekonomian masyarakat.

5.3.4 Lingkungan (optional 2)

Penggunaan Motor *BLDC* pada kendaraan roda dua di perkotaan dapat meminimalisir polusi udara yang terjadi dunia. Hal ini terjadi karena Motor *BLDC* pada kendaraan tidak mengeluarkan asap hasil pembakaran seperti mesin kendaraan konvensional. Diketahui menurut data berdasar dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, bahwa 75% penyumbang polusi udara adalah kendaraan bermotor dan 44.53% dari penyumbang polusi udara terbanyak adalah sepeda motor. Maka dalam hal ini, dampak penggunaan Motor *BLDC* pada kendaraan dapat menjadi alternatif untuk mengurangi polusi udara.

5.3.4 Politik (optional 3)

Dengan maraknya perkembangan kendaraan listrik di sektor otomotif, Motor *BLDC* merupakan jenis motor listrik yang umum digunakan. Sehingga kedepannya dengan masifnya perkembangan kendaraan listrik dapat mendorong pemerintah untuk membuat rancangan

perundang undangan terkait penggunaan kendaraan listrik di Indonesia. Sehingga nantinya pengembangan teknologi kendaraan listrik di Indonesia dapat semakin maju.



BAB 6 : Kesimpulan dan Saran

6.1 Kesimpulan

Pada hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Hasil keluaran gelombang *Back EMF* pada proses pengujian prototipe sebagai generator masih belum sesuai dengan hasil keluaran pada simulasi. Hal ini dapat disebabkan karena beberapa faktor seperti proses manufaktur kumparan pada stator yang dikerjakan secara manual. Hal ini dapat memperbesar resiko tembaga mengalami kebocoran dan *fill-factor* pada *teeth* stator tidak dapat maksimal. Selain itu terdapat kesalahan dalam penyambungan kumparan pada fasa V, sehingga menyebabkan keluaran gelombang *Back EMF* menjadi tidak optimal atau terjadi *voltage unbalance*. Pada pengujian sebagai motor, prototipe belum dapat bekerja karena terjadi kerusakan pada kumparan stator.
2. Hasil pengujian sensor hall sudah menunjukkan bahwa gelombang *Back EMF* sudah sesuai atau sinkron dengan sinyal keluaran sensor hall, namun masih terdapat sedikit pergeseran derajat fasa pada gelombang yang disebabkan oleh putaran mekanis rotor yang kurang presisi.

6.2 Saran

Pada hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian kedepan, diantaranya sebagai berikut.

1. Pada material magnet permanen yang digunakan untuk penelitian kedepan disarankan menggunakan kualitas atau *grade* yang lebih tinggi. Hal tersebut bertujuan agar didapatkan hasil yang lebih maksimal.
2. Kesalahan pada manufaktur kumparan dapat menyebabkan Motor *BLDC* tidak dapat bekerja atau berfungsi sebagaimana mestinya. Untuk mencegah hal tersebut terjadi, maka perlu lebih diperhatikan pada proses manufaktur kumparan dan pemasangan *housing* agar tidak terjadi kerusakan pada kumparan stator.

Daftar Pustaka

- [1] E. D. Dimitri, "Desain Sepeda Motor Listrik untuk Mobilitas Masyarakat di Perkotaan," p. 6, 2020.
- [2] S. L. Sengkey and F. Jansen, "Tingkat Pencemaran Udara CO Akibat Lalu Lintas Dengan Model Prediksi Polusi Udara Skala Mikro," vol. 1, no. 2, p. 8, 2011.
- [3] Haruna, Lahming, Amir, F., & Asrib, A. R. (2019). Pencemaran Udara Akibat Gas Buang Kendaraan Bermotor Dan Dampaknya Terhadap Kesehatan. UNM Environmental Journals, Vol. 2, No. 2, 57-61.
- [4] Setiawan, V. N. (2020, October 21). Bahan Bakar Fosil Menipis, ESDM Dorong Transisi Energi.
- [5] T. Kenjo, "Permanent Magnet and Brushless DC Motor", Oxford,1985.T. Kenjo, "Permanent Magnet and Brushless DC Motor", Oxford,1985.
- [6] A. EL-Refaie, P. Reddy, K.-K. Huh, J. Tangudu, and T. Jahns, "Comparison of Interior and Surface PM Machines Equipped with Fractional-Slot Concentrated-Windings for Hybrid Traction Applications," p. 8.
- [7] "Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Standar Nasional Indonesia Komite Teknis Mesin Listrik"
- [8] E. S. Hamdi, Design of Small Electrical Machines, Hoboken: Wiley, 1994.
- [9] "IEEE Trial-Use Guide for Testing Permanent Magnet Machines," IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7047988.
- [10] T. A. Burrell et al., "Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System," ORNL/TM-2010/253, 1007833, Mar. 2011. doi: 10.2172/1007833.
- [11] "IEEE Trial-Use Guide for Testing Permanent Magnet Machines," IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2015.7047988.
- [12] Hendershot, J. R., & Eastham, M. T. J. (2010). *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. Motor Design Books.

- [13] R. Ondrialdi, U. Situmeang, and Zufahri, “Analisis Pengujian Kualitas Isolasi Transformator Daya di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Perawang,” *SainETIn*, vol. 4, no. 2, pp. 72–81, Jun. 2020, doi: 10.31849/sainetin.v4i2.6288.
- [14] Q. Fitriyah, R. Aritha, H. Toar, and M. P. E. Wahyudi, “Alat Kendali Kecepatan Motor Pada Penggerak Depan Sepeda Listrik Di Politeknik Negeri Batam,” *J. Integrasi*, vol. 12, no. 2, pp. 116–121, Oct. 2020, doi: 10.30871/ji.v12i2.2417.



LAMPIRAN – LAMPIRAN

Dokumen TA201 dan TA202

Capst
one
Design
2021 –
2022

TECHNICAL REPORT

IDENTITAS

Dokumentasi Proses	TA201
Topik / Judul Capstone Design	Rancang Bangun Motor Brushless DC (BLDC) untuk Kendaraan Area Perkotaan
Nama Lengkap	Rafly Faridhoni Ilham Dimas Fahrizal
No. Induk Mahasiswa (NIM)	18524066 18524082
Dosen Pembimbing 1	Iftah Imawati, S.T., M.Eng.
Dosen Pembimbing 2	Husein Mubarak, S.T., M.Eng.

Spesifikasi Sistem
 Spesifikasi Kendaraan
 Perhitungan daya mekanis dilakukan sebelum proses desain, daya mekanis merupakan salah acuan dalam penentuan spesifikasi desain motor BLDC. sebelum menentukan kebutuhan gaya mekanis, terlebih dahulu harus menentukan spesifikasi dari kendaraan yang mana dapat dilihat pada tabel 1 berikut,

no	Spesifikasi	Nilai
1	massa kendaraan	63.5 kg
2	kapasitas beban maksimal	100 kg
3	kecepatan maksimal	40 km/jam

Tabel 1. Spesifikasi Kendaraan

 Berikut gaya yang digunakan dalam proses perhitungan kebutuhan daya mekanis kendaraan,

$$F_{tot} = F_{rr} + F_{hc} + F_{ad} + F_a \quad (1.1)$$
 Dimana :
 F_{tot} = Gaya total yang dibutuhkan
 F_{rr} = Gaya Rolling Resistance
 F_{hc} = Gaya Gradient Resistance
 F_{ad} = Gaya Aerodynamic Drag

Capst
one
Design
2021 –
2022

F_a = Gaya Akselerasi
1. Gaya Rolling Resistance
 Gaya Rolling Resistance merupakan gaya hambat yang diakibatkan dari interaksi roda dengan daerah penampang, gaya rolling resistance dirumuskan sebagai berikut

$$F_{rr} = C_{rr} \times m \times g \quad (1.2)$$

$$F_{rr} = 0.08 \times 163.5 \times 9.81$$

$$F_{rr} = 12.831 \text{ N}$$
 Dimana :
 C_{rr} = Koefisien Rolling Resistance
 m = massa (kg)
 g = gaya gravitasi bumi (ms⁻²)

2. Gaya Gradient Resistance
 Gaya Gradient Resistance merupakan gaya yang dibutuhkan sebuah benda untuk mendaki pada bidang miring. Gaya Gradient Resistance dirumuskan sebagai berikut,

$$F_{hc} = M \times g \times \sin\theta \quad (1.3)$$

$$F_{hc} = 163.5 \times 9.81 \times 0.02$$

$$F_{hc} = 32.07 \text{ N}$$
 Dimana :
 M = Masa benda (163.5 kg)
 g = gravitasi bumi (9.81 m/s²)
 $\sin\theta$ = kemiringan permukaan (2%)

3. Gaya Aerodynamic Drag
 Gaya Aerodynamic Drag merupakan gaya hambat udara Ketika kendaraan bergerak, dirumuskan sebagai berikut,

$$F_{ad} = 0.5 \times C_d \times A_f \times \rho \times v^2 \quad (1.4)$$

$$F_{ad} = 0.5 \times 0.7 \times 0.9 \times 1.2 \times 11.11^2$$

$$F_{ad} = 46.67 \text{ N}$$
 Dimana :
 C_d = Koefisien Drag (0.7)
 A_f = Frontal Area (0.9)
 ρ = massa jenis udara (1.2 kg/m³)
 V = Kecepatan (11.11 m/s)

Capst
one
Design
2021 –
2022

4. Gaya Akselerasi
 Gaya akselerasi merupakan gaya yang dapat merubah percepatan suatu benda dalam satuan waktu tertentu. Gaya akselerasi (Fa) dirumuskan pada persamaan (1.5) berikut,

$$F_a = m \times a \quad (1.5)$$

$$F_a = 163.5 \times 0.185$$

$$F_a = 30.27 \text{ N}$$
 dimana :
 F = Gaya akselerasi
 m = massa benda (163.5 kg)
 a = percepatan (0.185 m/s²)

5. Gaya yang dibutuhkan agar kendaraan bergerak

$$F_{tot} = F_{rr} + F_{hc} + F_{ad} + F_a \quad (1.6)$$

$$F_{tot} = 12.831 \text{ N} + 32.07 \text{ N} + 46.67 \text{ N} + 30.27 \text{ N}$$

$$F_{tot} = 121.85 \text{ N}$$

6. Daya Mekanik Kendaraan

$$P = F_{tot} \times V \quad (1.7)$$

$$P = 121.85 \times 11.11$$

$$P = 1353.9 \text{ Watt}$$
 Dimana :
 P = Daya (Watt)
 F_{tot} = Gaya Total (121.85 N)
 V = Kecepatan (11.11 m/s)

7. Menghitung Torsi

$$\tau = F \times r \quad (1.8)$$

$$\tau = 121.85 \times 0.127$$

$$\tau = 15 \text{ Nm}$$
 Dimana :
 τ = Torsi (Nm)
 F = Gaya Total (121.83 N)
 r = Jari-jari roda (0.127 m)

8. Menghitung Kecepatan
 a. Km/jam ke m/s

$$V = 40 \text{ km/jam} \times \frac{1000}{3600} = 11.11 \text{ m/s}$$

Capst
one
Design
2021 –
2022

b. m/s ke rad/s

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (1.9)$$

$$\omega = \frac{11.11}{0.127}$$

$$\omega = 87.5 \text{ rad/s}$$
 Dimana :
 ω = Kecepatan Putar (87.5 rad/s)
 r = jari-jari roda (0.127 m)
 v = Kecepatan (11.11 m/s)

c. rad/s ke RPM

$$RPM = \text{rad/s} \times \frac{60}{2\pi} \quad (2.0)$$

$$RPM = 87.5 \times \frac{60}{2\pi}$$

$$RPM = 835$$

no	spesifikasi	Nilai
1	daya	1350 Watt
2	Kecepatan	11.11 m/s
2	torsi	15 Nm

Tabel 2.

 Pada tabel 2 menunjukan kebutuhan daya mekanis kendaraan yang nantinya menjadi salah satu acuan kami dalam perancangan motor BLDC. Pada daya didapatkan nilai 1350 watt, kecepatan pada nilai 40 km/jam atau 835 rpm dan torsi dengan nilai 15 Nm.

Spesifikasi Motor BLDC

no	Parameter	Nilai	Watt
1	Daya	2000	
2	kecepatan	2500	RPM
3	Torsi	5.5	Nm
4	Tegangan	72	V
5	Arus	28	A
6	Efisiensi	74	%

Tabel 3. Spesifikasi Motor BLDC

 Pada tabel 3 menunjukan parameter dari spesifikasi motor BLDC hasil perancangan. Pada daya didapatkan 2000 Watt, kecepatan pada 2500 RPM, torsi sebesar 5 Nm, tegangan sebesar 72V, arus sebesar 28A dan Efisiensi sebesar 74%.

Spesifikasi Material

no	Nama	Jenis

1	Inti Besi	Carbon Steel
2	Magnet	Neodymium N35
3	Lilitan	Tembaga

Tabel 4. Spesifikasi Material

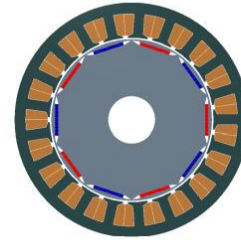
Pada tabel 4 menunjukkan parameter dari spesifikasi material dalam perancangan BLDC kami. Material yang pertama yaitu inti besi dengan jenis carbon steel. Magnet yang kami gunakan berjenis Neodymium N35 dan pada lilitan kami menggunakan jenis tembaga.

Desain rancangan awal

Spesifikasi	
Supply Voltage	72 V
Rated Current	28 A
Rated Speed	2500 RPM
Outer Diameter	150 mm
Stack Height	60 mm
Air Gap	1 mm
Rotor Location	Interior
Number of Poles	10
Number of Slot	21
Number of Phase	3
Rotor	
Inner Diameter	30 mm
Outer Diameter	103 mm
Bridge Thickness	1 mm
Magnet Inset Depth	2.5 mm
Magnet Thickness	2 mm
Magnet Width	20 mm

Stator	
Inner Diameter	105 mm
Outer Diameter	150 mm
Slot Depth	15,5 mm
Slot Opening Width	3 mm
Tooth Tip Thickness	1 mm
Tooth Width	6,5 mm

Tabel 5. menjelaskan spesifikasi desain rancangan awal yang meliputi spesifikasi desain, rotor dan stator.



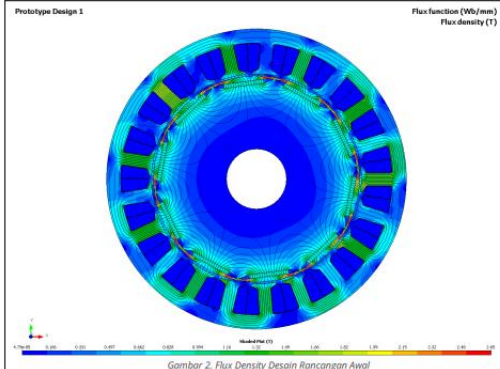
Gambar 1. Model Rancangan Awal

Pada pembuatan desain rancangan awal, langkah-langkah awal yang dilakukan adalah dengan melakukan studi literatur, yang mana bertujuan untuk mendapatkan informasi yang valid dari referensi yang mana nantinya dijadikan sebagai acuan dalam desain motor BLDC.

Selanjutnya, langkah yang dilakukan adalah dengan melakukan simulasi cogging dari beberapa variasi pemodelan yang mana bertujuan untuk mendapatkan variasi slot pole mana yang memiliki nilai cogging paling kecil. Fenomena Cogging merupakan kejadian dimana terjadi interaksi antara flux magnet yang terdapat pada rotor dengan variasi permeansi yang mana merupakan kemampuan suatu material dalam menghantarkan flux magnet. Torsi cogging dapat mengurangi performa dari motor karena kecenderungan untuk menarik teeth stator meskipun dalam kondisi tidak bergerak, sehingga ketika diputar akan terjadi lendutan [1]. Torsi cogging merupakan penyebab torsi ripple dan noise akustik ketika motor dalam keadaan berputar.

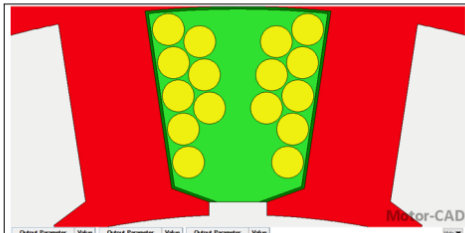
Penggunaan umbrella pada stator akan mengurangi nilai dari perubahan reluctance yang dimiliki oleh motor. Hal ini disebabkan karena celah udara antara rotor dan stator akan berkurang dan distribusi flux dapat lebih merata. Desain slot menggunakan umbrella membuat perubahan permeansi akan semakin kecil, sehingga nilai dari torsi rrgging juga semakin kecil. Salah satu pertimbangan dalam mendesain umbrella adalah untuk menghindari terjadinya saturasi pada bahan stator. Agar dihasilkan kinerja motor yang optimal, maka harus diperhatikan agar flux magnet dapat mengalir lancar tanpa adanya titik dimana terjadi saturasi. Jika terjadi saturasi pada ujung umbrella pada teeth stator, maka flux pada celah udara akan tidak merata tersebar di sekitar ujung permukaan umbrella. Hal ini dikarenakan bahan yang mengalami saturasi tidak dapat lagi meneruskan flux, sehingga flux yang bocor akan semakin melebar, reluctance dari motor semakin meningkat karena inti stator tidak dapat dilewati oleh flux dan menurunkan torsi total yang dapat dihasilkan oleh motor[2].

Pada rancangan awal, penulis menggunakan jenis topologi rotor IPM (Interior Surfaces Mounted). IPM Motor merupakan salah satu jenis rotor yang mana peletakan posisi magnet nya diselipkan di dalam rotor. Dibandingkan dengan Surfaces Permanent Magnet (SPM), IPM motor memiliki keuntungan pada aspek reluctance torsi dan resiko magnet terlepas atau lepas yang dikarenakan gaya centrifugal akibat putaran rotor) dapat diminimalisir. Topologi IPM sendiri pun memiliki beberapa variasi lagi dalam bentuk peletakan magnetnya. Dalam proses pembuatan nya, IPM memiliki kelebihan dalam hal proses produksi karena kemudahan dalam peletakan magnet serta dari segi performa memiliki efisiensinya yang lebih tinggi. beberapa tipe IPM motor yang umum dikenal adalah V Shape dan Flat Shape IPM. [3]. Pada kesempatan kali ini, peneliti menggunakan jenis topologi magnet Flat Shape dikarenakan jenis topologi ini memiliki kelebihan dalam pemasangan magnet karena tidak dibutuhkan tingkat kepresisian sudut seperti yang dimiliki pada v shape dan juga cost yang digunakan terbatas karena pada flat shape hanya menggunakan minimal 1 magnet pada setiap pole nya, berbeda dengan v shape yang menggunakan minimal 2 magnet pada penggunaannya.



Gambar 2. Flux Density Desain Rancangan Awal

Pada gambar 2 dapat dilihat distribusi flux yang dihasilkan, kerapatan flux pada stator memiliki tingkat kerapatan tertinggi pada teeth stator dengan nilai 1.68 T yang mana masih berada pada nilai aman. Pada bagian rotor tingkat kerapatan flux tertinggi yang dihasilkan berada pada bridge yang mana merupakan jembatan penghantar flux dari rotor menuju stator dengan nilai 2.24 T, kondisi ini tidak baik karena tingkat kerapatan yang terlalu tinggi menyebabkan saturasi atau titik jenuh sehingga menyebabkan flux tidak dapat mengalir dengan baik yang mana menyebabkan kebocoran pada pendistribusian flux menuju teeth stator.



Output Parameter	Value	Output Parameter	Value	Output Parameter	Value
Conductors Per Pole	12	Stk Area	188.4	Copper Wire Area	21.28
Wire Slot Full Area	1.475	Winding Area (L1)	188.4	Copper Area	21.28
Wire Slot Full Area	1.475	Winding Area	187.1	Winding Area	187.1
Copper Slot Full Area	1.475	Winding Depth	13.254	Winding Area	21
Winding Full Slot	1.5588				

Gambar 3. Pola Lilitan Desain Rancangan Awal

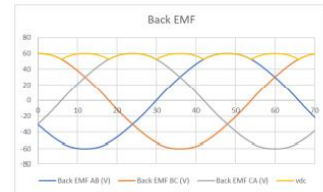
Pada gambar 3 menunjukan pola lilitan dan juga ukuran penghantar tembaga yang digunakan dalam tahap perancangan. ukuran tembaga sangat penting dalam menentukan kuat arus yang menghantar pada lilitan. Pada tabel 5 menunjukan daftar ukuran tembaga berdasarkan Kuat Hantar Arus (KHA) yang penulis jadikan acuan dalam menentukan diameter kawat tembaga yang digunakan.

TABEL KEKUATAN KAWAT (EMSL TRAFU (by dari Hasan Bandung))

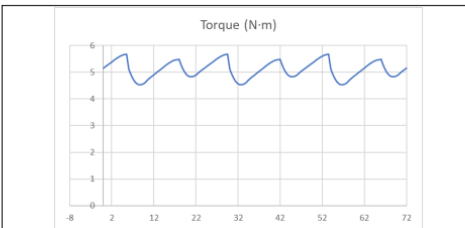
Diameter (mm)	Luas penampang (mm ²)	Arus (A)
0,1	0,0077	0,25
0,2	0,031	0,45
0,3	0,0707	0,6
0,4	0,1256	0,8
0,45	0,159	1,25
0,5	0,1963	1,5
0,6	0,2827	1,8
0,65	0,3318	2,1
0,7	0,3847	2,45
0,75	0,4414	2,8
0,8	0,5	3,2
0,85	0,567	3,6
0,9	0,633	4
1	0,785	5
1,1	0,95	6
1,2	1,13	7,2
1,3	1,32	8,45
1,4	1,53	9,8
1,5	1,76	11,2
1,6	2	12,8
1,7	2,26	14,45
1,8	2,54	16
1,9	2,84	18
2	3,14	20
2,1	3,46	22,45
2,2	3,8	24
2,3	4,15	26,45
2,4	4,52	28,8
2,5	4,9	31,2
2,6	5,3	33,8
2,7	5,7	36,45
2,8	6,15	39
2,9	6,6	42
3	7	45

Tabel 6. Tabel kekuatan kawat email trafo

Pada proses perancangan, penulis menggunakan arus masukan sebesar 28 A, sehingga dapat ditentukan bahwa ukuran tembaga yang nantinya akan digunakan adalah 2,4 mm atau luas penampang sebesar 4,52 mm².

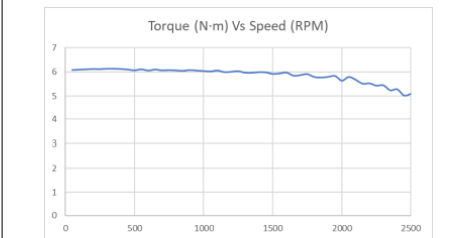


Grafik 1. Hasil Back EMF Desain Rancangan Awal



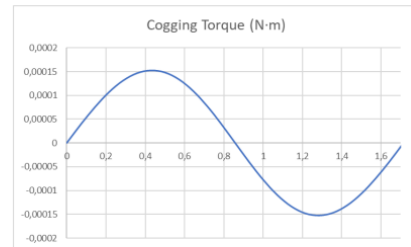
Grafik 3. Torsi Rata-rata Desain Rancangan awal

Pada grafik 3 menunjukkan torsi keluaran hasil simulasi motor BLDC ketika diputar pada 2550 RPM dengan arus masukan sebesar 28 A, sehingga didapatkan torsi rata-rata sebesar 5.09 Nm dengan torsi maksimum dan minimum masing-masing bernilai 5.8 dan 4.3 Nm. Dari parameter yang telah didapatkan sebelumnya, maka dapat diperoleh nilai torsi ripple sebesar 1.5 Nm atau sebesar 30 %.



Grafik 4. Torque vs Speed Rancangan Awal

Pada grafik 4 menunjukkan perubahan torsi terhadap kecepatan dalam RPM. Grafik torsi vs kecepatan menunjukan bahwa semakin tinggi kecepatan, maka torsinya semakin kecil. Pada hasil simulasi yang dilakukan, pada kecepatan awal 50 RPM, didapatkan nilai torsi sebesar 6.07 Nm dan nilai torsi paling kecil didapatkan pada 2500 RPM yang mana bernilai 5.09 Nm. Grafik torsi vs kecepatan ini dapat didapatkan dari hasil simulasi variasi kecepatan per 50 RPM dengan rentang kecepatan 50 RPM sampai 2500 RPM.



Grafik 5. Cogging Torque Rancangan Awal

Dari grafik 5 dapat dilihat gelombang keluaran dari torsi cogging yang dihasilkan, sehingga didapatkan besaran nilai torsi cogging sebesar 0.0003 Nm yang mana didapatkan dari nilai peak to peak gelombang. Nilai puncak maksimum yang dihasilkan sebesar 0.00015 Nm dan nilai puncak minimum sebesar -0.00015 Nm. hasil tersebut sudah cukup ideal mengingat torsi cogging yang dihasilkan sudah cukup kecil.

Dari data hasil simulasi yang telah dilakukan, dapatkan rincian data pada tabel berikut :

Torsi	5,09 Nm
Kepcepatan	2500 RPM
Kebutuhan Daya Mekanis	1353,94 Watt
Daya Mekanis yang Dihasilkan	1335 Watt
Daya Elektrik	7000 Watt

Efisiensi	0.67
-----------	------

Tabel 7. Hasil Rangkuman Simulasi Desain Rancangan Awal

Dari tabel 7, didapatkan hasil daya mekanis dengan nilai 1335 Watt dari kebutuhan daya mekanis sebesar 1353.9 Watt. Hasil yang didapatkan belum sesuai dengan target dikarenakan torsi yang didapatkan hanya sebesar 5.09 Nm dari target torsi sebesar 5.15 Nm di kecepatan 2500 RPM dengan tegangan masukan sebesar 72 V dan arus 28 A. sehingga didapatkan nilai daya elektris sebesar 2000 Watt. Dari data tersebut maka didapatkan nilai perhitungan efisiensi sebesar 0.67 atau sebesar 67%.

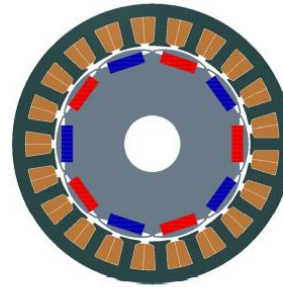
Desain rancangan akhir

Spesifikasi

Supply Voltage	72 V
Rated Current	28 A
Rated Speed	2500 RPM
Outer Diameter	150 mm
Stack Height	57 mm
Air Gap	1 mm
Rotor Location	Interior
Number of Poles	10
Number of Slot	219
Number of Phase	3
Rotor	
Inner Diameter	30 mm
Outer Diameter	103 mm
Bridge Thickness	1 mm
Magnet Inset Depth	3 mm

Magnet Thickness	6 mm
Magnet Width	19 mm
Stator	
Inner Diameter	105 mm
Outer Diameter	150 mm
Slot Depth	15.5 mm
Slot Opening Width	4.3 mm
Tooth Tip Thickness	1 mm
Tooth Width	6.5 mm

Tabel 8. Menjelaskan spesifikasi desain rancangan akhir yang meliputi spesifikasi desain, rotor dan stator.



Gambar 4. Model Rancangan Awal

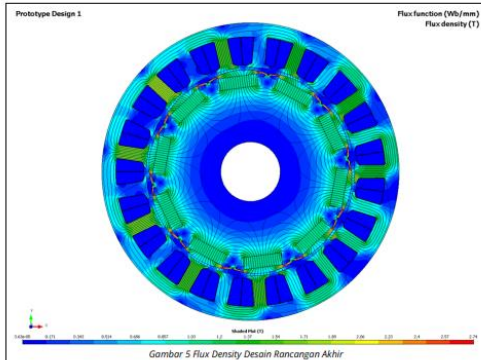
Pada rancangan akhir, penulis masih menggunakan dimensi luar yang sama dengan dimensi pada rancangan awal yang mana bernilai 150 mm. Perubahan mayor yang dilakukan pada

rancangan akhir adalah terletak pada bagian rotor dan dimensi magnet dan sedikit perubahan pada bagian stator.

Parameter	Rancangan Awal	Rancangan Akhir
Ketebalan Magnet	2 mm	6 mm
Slot Opening	3 mm	4.3 mm
Diameter Tembaga	2.4 mm	1 mm
Optimasi Geometri	Tidak	Ya

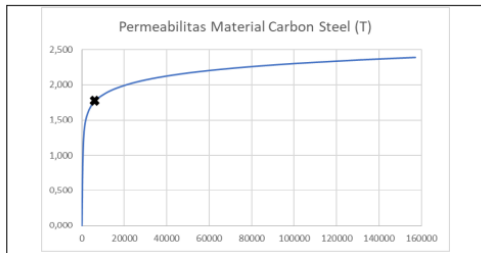
Tabel 9. Komparasi Perubahan Desain Rancangan Awal dan Rancangan Akhir

Pada desain rancangan akhir, penulis melakukan perubahan dimensi pada magnet, melakukan optimasi pada geometri rotor, melakukan perubahan pada slot opening teeth stator dan melakukan perubahan pada ukuran kawat tembaga. Perubahan pada dimensi magnet dikarenakan magnet yang awalnya dipilih sebagai material yang digunakan pada perancangan ternyata tidak memenuhi standar secara kualitas dan dimensi. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir penurunan performa pada purwarupa motor. Namun kekurangan dari penambahan ketebalan magnet ini adalah terletak pada penambahan cost dan torsi cogging. Pada stator, perubahan slot opening dan ukuran tembaga dilakukan untuk mempermudah proses manufaktur yang mana terletak pada proses pelilitan nantinya.



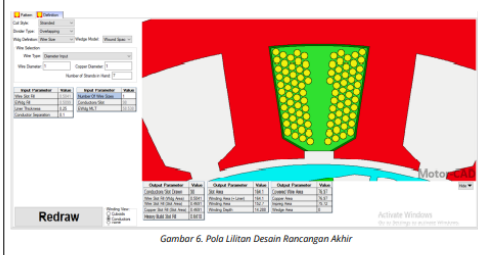
Gambar 5 Flux Density Desain Rancangan Akhir

Pada gambar 5 menunjukkan persebaran flux dari magnet yang terdapat pada rotor menuju stator. dari simulasi yang dilakukan dapat dilihat bahwa nilai kerapatan flux tertinggi pada stator terdapat pada teeth dengan nilai 1.7 Tesla, yang mana masih dalam batas aman karena nilai kerapatan fluksnya masih dibawah nilai saturasi yang mana bernilai 1.75 T yang dapat dilihat pada grafik 6.



Grafik 6. Permeabilitas Material Carbon

Pada grafik 6 menunjukkan perbandingan nilai rapat flux (T) terhadap nilai medan magnet (H) pada material Carbon Steel. Semakin tinggi nilai $flux$, maka intensitas medan magnet semakin tinggi sehingga pada titik tertentu nilai kerapatan $flux$ akan mencapai nilai saturasi. Titik saturasi merupakan titik dimana kenaikan kerapatan sudah mencapai nilai jenuh sehingga kenaikannya tidak signifikan lagi.



Gambar 6. Pola Lilitan Desain Rancangan Akhir

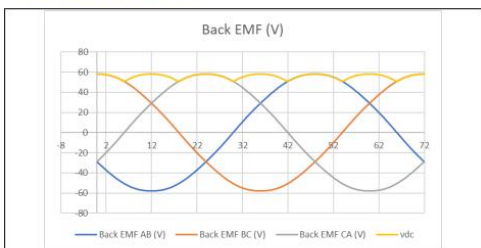
pada gambar 6 menunjukkan pola lilitan yang nantinya digunakan pada perancangan, pada proses perancangan sangat penting untuk memperhatikan ukuran penghantar tembaga karena bagian ini berfungsi sebagai penghantar arus pada stator, kemampuan tembaga dalam menghantarkan arus (conductor ampacity) memiliki ketentuan dalam pemilihannya. Pada penentuan ukuran tembaga, penulis menggunakan tabel 10 [4] yang nantinya digunakan sebagai acuan pada proses simulasi pemodelan dan assembly pada purwarupa motor BLDC.

AMPACITY AND RESISTANCE OF THE STANDARD COPPER WIRES USED.

AWG	Diameter mm	Area mm ²	Resistance Ω /km	Current A
28	0.32	0.32	212.9	1.4
26	0.4	0.50	133.9	2.2
24	0.51	0.82	84.22	3.5
22	0.64	1.29	52.95	7
20	0.81	2.06	33.3	11
18	1.02	3.27	20.95	16
16	1.29	5.23	13.18	22
14	1.63	8.34	8.284	32
12	2.05	13.20	5.21	41
10	2.59	21.06	3.985	55

Tabel 10 Daftar Ampacity Conductor dan Ukurannya

Dari tabel 10, didapatkan luas area 0.785 mm^2 atau tembaga dengan diameter 1 mm yang mana memiliki kekuatan hantar arus (ampacity) sebesar 4.36 A , untuk dapat menghantarkan arus sebesar 28 A , maka digunakan konfigurasi lilitan 7 paralel, sehingga didapatkan kekuatan hantar arus sebesar 30.5 A .



Grafik 7. Hasil Simulasi Back EMF Desain Rancangan Akhir

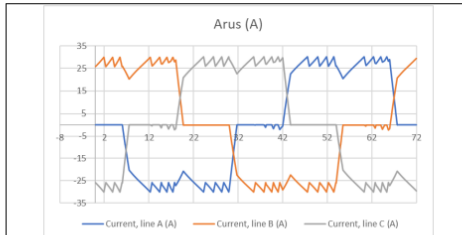
Berdasarkan grafik 7 didapatkan nilai puncak gelombang Back EMF sebesar 57.9 V dengan nilai rata-rata VDC sebesar 55.6 V dengan simulasi di 2500 RPM . Hasil dari pengolahan data yang telah dilakukan lalu dijadikan sebagai parameter untuk perhitungan nilai konstanta Back EMF (K_e) sebagai berikut

$$K_e = \frac{V_{DC} \cdot \omega_{rpm}}{n \cdot \omega_{rad}}$$

$$K_e = \frac{55.6}{282}$$

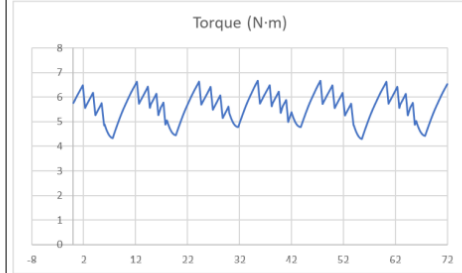
$$K_e = 0.20$$

Sehingga didapatkan nilai konstanta Back EMF sebesar 0.20



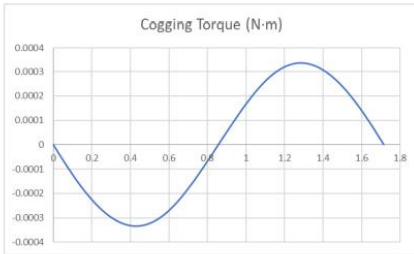
Grafik 8. Hasil Simulasi Arus Desain Rancangan Akhir

Pada grafik 8 menunjukkan gelombang arus berupa gelombang six-step dengan simulasi arus masuk sebesar 28 A di 2500 RPM . Gelombang puncak yang dihasilkan sebesar 30 A . Noise yang dihasilkan terhadap gelombang merupakan akibat dari kondisi switching yang dilakukan oleh controller.



Grafik 9. Hasil Simulasi Torque Pada Desain Rancangan Akhir

Pada grafik 9 menunjukkan gelombang torsi yang dihasilkan pada simulasi kecepatan putar atau *roted speed* sebesar 2500 RPM. Sehingga didapatkan torsi rata-rata sebesar 5.6 Nm dengan gelombang puncak dan bawah masing-masing sebesar 6.6 Nm dan 4.2 Nm. dari hasil pengolahan data yang telah dilakukan, maka didapatkan nilai torsi ripple sebesar 2.3 Nm atau 40% dari torsi rata-rata yang dihasilkan. *Torque ripple* yang tinggi dapat menyebabkan getaran (*vibration*) dan juga suara bising (*noise acoustic*) sehingga mempengaruhi performa dari motor. *Torque Ripple* dapat diminimalisir dengan beberapa metode seperti optimasi pada geometri dan juga penggunaan *controller* yang sudah dirancang untuk dapat meminimalisir *torque ripple*, namun pengurangan *torque ripple* dapat berpengaruh terhadap torsi maksimum yang dihasilkan dan juga penambahan biaya produksi [5].



Grafik 8. Hasil Simulasi Cogging Torque Desain Rancangan Akhir

Pada grafik 8 menunjukkan gelombang torsi yang dihasilkan pada simulasi kecepatan putar atau *roted speed* sebesar 2500 RPM. Sehingga didapatkan torsi rata-rata sebesar 5.6 Nm dengan gelombang puncak dan bawah masing-masing sebesar 6.6 Nm dan 4.2 Nm. dari hasil pengolahan data yang telah dilakukan, maka didapatkan nilai torsi ripple sebesar 2.3 Nm atau 40% dari torsi rata-rata yang dihasilkan. *Torque ripple* yang tinggi dapat menyebabkan getaran (*vibration*) dan juga suara bising (*noise acoustic*) sehingga mempengaruhi performa dari motor. *Torque Ripple* dapat diminimalisir dengan beberapa metode seperti optimasi pada geometri dan juga penggunaan *controller* yang sudah dirancang untuk dapat meminimalisir *torque ripple*, namun pengurangan *torque ripple* dapat berpengaruh terhadap torsi maksimum yang dihasilkan dan juga penambahan biaya produksi [5].

$$\theta_{cogging} = \frac{360}{n_{kpk}}$$

Dimana,

n_{kpk} : Nilai KPK dari Kombinasi Slot-Pole (210)

Sehingga didapatkan perhitungan sebagai berikut.

$$\theta_{cogging} = \frac{360}{210}$$

$$\theta_{cogging} = 1.71^\circ$$

Maka didapatkan nilai derajat torsi cogging sebesar mekanik untuk mendapatkan satu gelombang cogging. dari hasil simulasi yang telah dilakukan, maka jika dibandingkan dengan desain rancangan awal, maka desain rancangan akhir memiliki nilai cogging yang lebih besar dengan nilai 0.00067 Nm. Hal ini disebabkan oleh perubahan dimensi pada magnet yang mana menyebabkan perbedaan permeansi dari magnet dan material semakin bertambah.

Torsi	5.6 N.m
Kecepatan	2500 RPM
Kebutuhan daya mekanis	1353.94 Watt
Daya mekanis yang dihasilkan	1482.94 Watt
Daya Elektris	2000 Watt
Efisiensi	0.74

Tabel 10. Rangkuman Data Simulasi Desain Rancangan Akhir

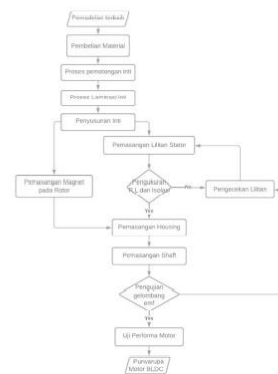
Sehingga pada tabel 10 didapatkan data dari hasil simulasi yang telah dilakukan dengan perolehan total daya mekanis sebesar 1482.94 Watt dengan torsi sebesar 5.6 Nm pada putaran rotor sebesar 2500 RPM. Hasil ini sudah cukup untuk memenuhi perhitungan dari kebutuhan daya mekanis sebesar 1353.94 Nm. Lalu dari data yang telah diolah, maka diperoleh nilai efisiensi sebesar 0.74 atau 74% dengan nilai daya elektrik sebesar 2000 Watt.

Production Costs

No	Nama	Harga (Rp)	Jumlah	Total (Rp)
1	Magnet N35(20x20x2 mm)	6.150.00	100	615.000,00
2	Lilitan (0.5 mm)	120.000.00	1	120.000,00
3	Shaft	200.000.00	1	200.000,00
4	Housing	300.000,00	1	300.000,00
5	Bearing (30mm)	30.500	2	61.000,00
6	Hall Sensor	35.000	3	105.000,00
7	Laser Cut + Material	3.996.000	1	3.996.000,00
8	Bubut	500.000	1	500.000,00
9	Kertas Nomex (0.2mm)	55.000	1	55.000,00
10	Insulating Varnish	60.000	2	120.000,00
11	Kabel AWG (8)	5.000	3	15.000,00
12	Baut dan Mur M4 (100mm)	2000,00	20	40.000,00
13	Ring M4	200,00	20	4000,00
TOTAL				5.965.000

Tabel 11. Production Cost pelaksanaan Capstone Project Desain dan Simulasi Motor Listrik BLDC untuk Kendaraan Listrik Area Perkotaan

Logs / Catatan Aktivitas (meliputi perencanaan, aktivitas/tugas, dan capaiannya)



Flowchart 1. tahapan pelaksanaan

Flowchart 1 merupakan rangkaiian tahapan pelaksanaan kedepannya dari Capstone Project Desain dan Simulasi Motor Listrik BLDC untuk Kendaraan Listrik Area Perkotaan setelah didapatkan pemodelan desain terbaik.

Perencanaan

Pada proses perencanaan, langkah awal yang dilakukan adalah dengan melakukan studi literatur yang bertujuan untuk optimasi desain. Setelah didapatkan desain paling optimal kemudian dilanjutkan ke tahap proses manufaktur. Kami melakukan proses optimasi bentuk geometri agar distribusi flux lebih optimal. Kemudian dilakukan beberapa simulasi untuk mendapatkan nilai BEMF untuk mendapatkan tegangan dan *Advance Angle* untuk mendapatkan nilai torsi. Kemudian masuk pada tahap manufaktur, yang akanda melalui beberapa tahap seperti

pemotongan plat besi dan bubut. Setelah tahap manufaktur maka akan dilakukan proses assembly yang mana melalui beberapa tahap seperti *stacking core*, *laminasi core*, pemasangan lilitan, pemasangan magnet pada rotor dan pemasangan shaft dan *housing*. Sebelum melakukan proses pemasangan *housing*, dilakukan proses pengukuran agar didapatkan nilai *resistansi* dan *induktansi* yang sesuai.

Aktivitas/tugas

Berikut merupakan detail aktivitas/tugas setiap anggota kelompok selama pelaksanaan *project capstone design* berlangsung :

No	Anggota	Tugas dan Tanggung Jawab	Target
1	Rafly Faridhoni	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan pembelian Material Mencari Referensi optimasi desain Membuat <i>designing</i> pemodelan terbaik 	<ul style="list-style-type: none"> Mendapatkan material yang sesuai dengan spesifikasi dan harga terbaik. Mendapatkan referensi optimasi desain yang mendukung project. Mendapatkan desain pemodelan terbaik
2	Ilham Dimas Fahrizal	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan pembelian Material Mencari Referensi optimasi desain Membuat <i>designing</i> pemodelan terbaik 	<ul style="list-style-type: none"> Mendapatkan material yang sesuai dengan spesifikasi dan harga terbaik. Mendapatkan referensi optimasi desain yang mendukung project. Mendapatkan desain pemodelan terbaik

Tabel 12. Aktivitas anggota dalam kelompok

Capaian

No	Proses yang telah dilakukan	Capaian
1	Melakukan Pembelian Material	Beberapa material utama telah terbeli.
2	Mencari Referensi Optimasi	Didapatkan referensi untuk mereduksi torsi ripple dengan optimasi geometri rotor.
3	Membuat <i>designing</i> pemodelan terbaik	Didapatkan desain terbaik dengan hasil yang sudah memenuhi target.

Tabel 13. Proses dan Capaian pada TA201

Catatan tambahan

- [1] A. EL-Refaei, P. Reddy, K-K. Huh, J. Tangudu, and T. Jahns, "Comparison of Interior and Surface PM Machines Equipped with Fractional-Slot Concentrated-Windings for Hybrid Traction Applications," p. 8.
- [2] D. C. Hanselman, *Brushless permanent magnet motor design*, 2. ed., [Nachdr.]. Lebanon, Ohio: Magna Physics Publishing, 2006.
- [3] T. A. Burress *et al.*, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System," ORNL/TM-2010/253, 1007833, Mar. 2011. doi: 10.2172/1007833.
- [4] M. D. Tehrani, M. O. Kim, and J. Yoon, "A Novel Electromagnetic Actuation System for Magnetic Nanoparticle Guidance in Blood Vessels," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 7, pp. 1-12, Jul. 2014, doi: 10.1109/TMAG.2014.2307271.
- [5] G. Velmurugan, S. Bozhko, and T. Yang, "A Review of Torque Ripple Minimization Techniques in Switched Reluctance Machine," in 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Nottingham, Nov. 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/ESARS-ITEC.2018.8607614.

LAMPIRAN-LAMPIRAN

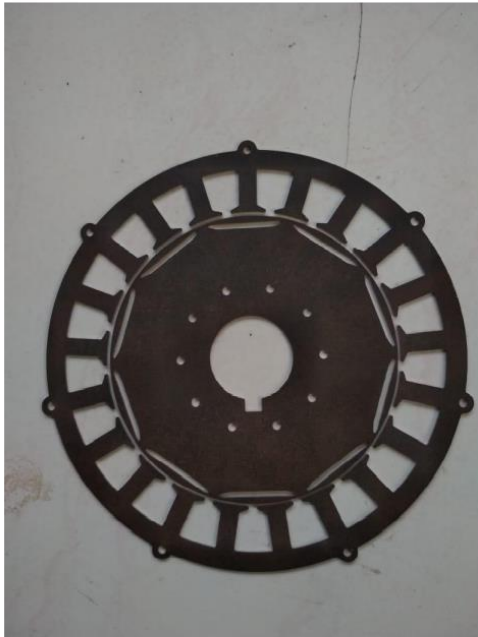
Sertakan dokumen/bukti-bukti pendukung dari deskripsi/penjelasan laporan ini (jika ada)



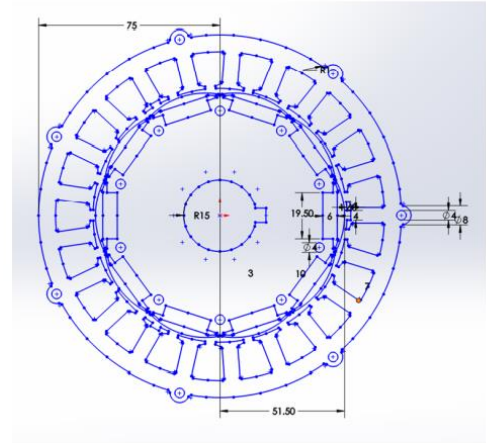
Gambar 8. Pengukuran Sampel Plat Setelah proses Pematangan

Gambar 7. Permanent Magnet





Gambar 9. Hasil Sampel Pemotongan Inti Plat Stator dan Rotor

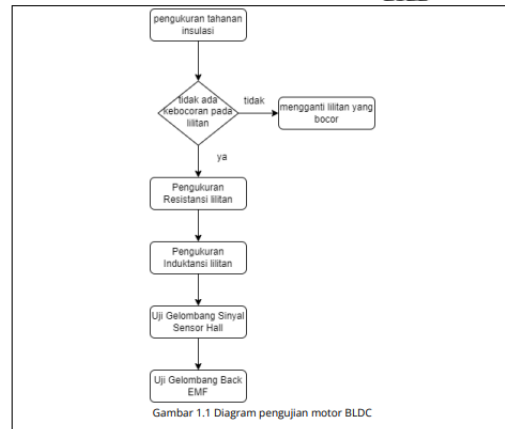


Gambar 10. Proses Pembuatan Desain 2D

TECHNICAL REPORT

IDENTITAS	
Dokumentasi Proses	TA202
Topik / Judul Capstone Design	Rancang Bangun Motor Brushless DC (BLDC) untuk Kendaraan Area Perkotaan
Nama Lengkap	Rafly Faridhoni Ilham Dimas Fahrizal
No. Induk Mahasiswa (NIM)	18524066 18524082
Dosen Pembimbing 1	Iftitah Imawati, S.T., M.Eng.
Dosen Pembimbing 2	Husein Mubarak, S.T., M.Eng.

Metode / Rancangan Pengujian Sistem
Berikut merupakan alur pengukuran dan pengujian yang dilakukan.



Gambar 1.1 Diagram pengujian motor BLDC

Metode Pengukuran untuk pengujian Sistem
Dalam pengujian motor BLDC, metode yang kami gunakan adalah sebagai berikut
1. Pengukuran Tahanan Insulasi
pengujian tahanan insulasi ditujukan untuk mengecek apakah ada kebocoran pada lilitan. kebocoran pada lilitan dapat menyebabkan nilai tahanan insulasi antar lilitan menjadi tidak seimbang dan menyebabkan noise pada gelombang back emf. selain itu kebocoran pada lilitan dapat menyebabkan kebocoran arus pada core. Pengukuran ini menggunakan Magger dengan memberikan suplai tegangan sebesar 250 V.



Gambar 1.2 Megger Insulation Tester

2. Pengukuran Resistansi

Pengukuran resistansi ditujukan untuk melihat keseimbangan nilai resistansi kawat penghantar, perbedaan nilai resistansi atau nilai resistansi yang tidak seimbang dapat menunjukkan panjang kawat penghantar apakah sama atau tidak, pengukuran ini menggunakan alat Micro-Ohm Meter.



Gambar 1.3 Micro-Ohm Meter

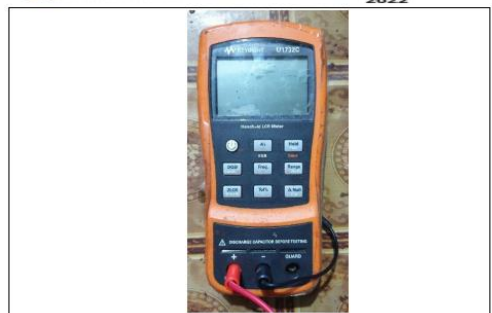
3. Pengukuran Induktansi

Pada pengukuran induktansi ditujukan untuk mengecek keseimbangan jumlah lilitan, apabila terdapat jumlah lilitan yang tidak seimbang akan menyebabkan ketidakseimbangan pada peak gelombang pengukuran ini menggunakan alat ukur LCR Meter pada frekuensi 120 Hz (karena paling mendekati 212 Hz) dengan menggunakan persamaan berikut

$$f = \frac{N_s \times RPM}{120}$$

$$f = \frac{10 \times 2556}{120}$$

$$f = 212 \text{ Hz}$$



Gambar 1.4 LCR Meter

4. Pengujian Gelombang Back EMF

Pengujian gelombang Back EMF bertujuan untuk melihat hasil dari gelombang ketika rotor diputar, pengujian ini dilakukan dengan mengukur tegangan antar fasa menggunakan osiloskop, sehingga akan nampak gelombang yang dihasilkan.

5. Pengujian Gelombang Hall Sensor

Pengujian Gelombang Hall bertujuan untuk melihat apakah gelombang Back EMF yang dihasilkan sudah sesuai dengan posisi rotor, pengujian ini dilakukan dengan menggunakan osiloskop.

Hasil Pengujian Sistem

Pengukuran Resistansi

sebelum penyambungan soldering lilitan

No	Fasa	Nilai (mΩ)
1	U1	5.12
2	W7	3.41
3	V4	3.05
4	U2	5.2
5	V5	3.1
6	U3	3.7
7	V6	4.6
8	W1	2.95
9	V7	4.05
10	U4	7.3
11	W2	7.85
12	U5	2.54
13	W3	4
14	U6	2.7
15	V1	4.26
16	U7	2.41
17	W4	2.92
18	V2	2.68
19	W5	3.3
20	V3	3.4
21	W6	5.98

Tabel 1.1 Nilai resistansi sebelum penyambungan lilitan dengan solder. Melalui Tabel 1.1, maka diperoleh nilai resistansi pada masing-masing kelompok fasa sebagai berikut.

U (mΩ)	V (mΩ)	W (mΩ)
28.97	25.14	30.41

Tabel 1.2 Nilai resistansi berdasarkan kelompok fasa

Pada pengukuran nilai resistansi menggunakan alat ukur Mikro-Ohm Meter, didapatkan hasil data pada Tabel 1.2 pengujian resistansi dilakukan untuk melihat keseimbangan luas penampang dari masing-masing slot kumparan dan juga untuk melihat apakah ada short antar tembaga lilitan. Hasil yang didapatkan memiliki nilai resistansi yang seimbang, pada fasa U, V dan W masing-masing didapatkan nilai 28.97 (mΩ), 25.14 (mΩ) dan 30.41 (mΩ).

U (mΩ)	V (mΩ)	W (mΩ)
35.7	65.9	30.59

Tabel 1.3 Nilai resistansi sesudah proses menyolder pada lilitan

Melalui tabel 1.3 didapatkan data pengukuran lilitan yang telah dikelompokkan fasanya. pada fasa U, V dan W masing-masing didapatkan nilai 35.7 mΩ, 65.9 mΩ dan 30.59 mΩ. pada lilitan fasa V terdapat ketidakseimbangan pada nilai resistansi sebesar 65.9 mΩ, namun untuk fasa U dan W nilai resistansinya seimbang. Ketidakseimbangan nilai resistansi pada fasa V bisa disebabkan karena proses soldering yang belum maksimal karena ada tembaga yang belum terhubung dengan sempurna. perbedaan nilai resistansi ini dapat menyebabkan pengaruh ketidakseimbangan arus pada fasa V terhadap fasa U dan W.

2. Pengukuran Induktansi

no	Nama	Nilai (μH)
1	U1	10.6
2	W7	9.8
3	V4	10.6
4	U2	10.8
5	V5	9.6
6	U3	10.4
7	V6	9.4
8	W1	9.6
9	V7	10.2
10	U4	10.7
11	W2	9.6
12	U5	9.3
13	W3	10
14	U6	9.6
15	V1	10.1
16	U7	10.4
17	W4	9.3
18	V2	10.5
19	W5	9.8
20	V3	9.5
21	W6	9.7

Tabel 1.4. Pengukuran nilai induktansi sebelum proses soldering

Pada pengukuran nilai induktansi menggunakan alat ukur LCR Meter, sehingga didapatkan nilai induktansi antar lilitan pada tabel 1.4. Pengujian nilai induktansi bertujuan untuk

melihat keseimbangan jumlah lilitan pada setiap slotnya. dari data yang telah diambil memiliki nilai induktansi yang seimbang sehingga dapat dikatakan seimbang.

U (μH)	V (μH)	W (μH)
71.8	69.9	67.8

Tabel 1.5. hasil pengukuran nilai induktansi setelah proses soldering.

Pada tabel 1.5 merupakan nilai induktansi pada masing-masing kelompok fasa U, V dan W dengan nilai 71.8 μH, 69.9 μH dan 67.8 μH. hasil pengukuran induktansi dapat dikatakan seimbang karena nilai pada masing-masing fasanya seimbang. keseimbangan nilai induktansi berpengaruh terhadap nilai peak gelombang back emf.

3. Pengukuran Tahanan Isolasi

Insulasi pada core merupakan pemisah daerah bertegangan yang terbuat dari bahan dielektrik, dalam hal ini adalah core stator dengan lilitan. fungsi dari insulasi adalah memisahkan dua bagian yang memiliki nilai tegangan berbeda agar tidak terjadi lompatan tegangan ataupun percikan. pada mesin listrik bertegangan tinggi, kegagalan insulasi dapat menyebabkan kerusakan alat [1].

no	Nama	Nilai (MΩ)
1	U1	OL
2	W7	OL
3	V4	OL
4	U2	OL
5	V5	OL
6	U3	OL
7	V6	OL
8	W1	OL
9	V7	OL
10	U4	OL
11	W2	OL
12	U5	OL
13	W3	OL
14	U6	OL
15	V1	OL
16	U7	OL
17	W4	OL
18	V2	OL
19	W5	OL
20	V3	OL
21	W6	OL

Tabel 1.6 Hasil pengukuran tahanan isolasi lilitan

Pada tabel 1.6 merupakan hasil pengukuran tahanan isolasi pada masing-masing lilitan yang telah terpasang pada stator. nilai tahanan isolasi pada masing-masing lilitan stator memiliki nilai OL dimana nilai tahanan isolasi memiliki nilai diatas batasan pembacaan alat ukur dengan suplai tegangan 250 V atau nilai tahanan isolasi memiliki nilai lebih dari 100 MΩ. Maka dapat dikatakan bahwa tidak terjadi kebocoran pada lilitan.

4. Pengujian Gelombang Back EMF

Pengujian gelombang Back EMF dilakukan untuk melihat kesesuaian gelombang keluaran antar fasa dengan hasil simulasi yang dilakukan. Pengujian ini dilakukan pada variasi kecepatan putar pada rentang 100 hingga 2500 rpm, sehingga didapatkan hasil gelombang peak-to-peak sebagai berikut.

No	Frekuensi (Hz)	RPM	Tegangan Antar Fasa		
			U-V (V)	V-W (V)	W-U (V)
1	8	100	1.12	0.72	1.2
2	16	200	2.12	1.4	2.24
3	24	300	3.08	2.24	3.24
4	32	400	4.24	2.22	4.36
5	40	500	5.4	2.74	5.24
6	48	600	6.56	3.06	6.4
7	56	700	7.6	3.36	7.52
8	64	800	8.8	3.86	8.64
9	72	900	9.6	4.2	10.5
10	80	1000	10.6	4.64	10.6
11	88	1100	12.5	5.24	11.7
12	96	1200	14.6	5.36	12.7
13	104	1300	16.2	5.76	14
14	112	1400	16.8	6.28	15.8
15	120	1500	18.2	6.92	16.8
16	128	1600	19.4	7.12	17
17	136	1700	20.8	7.44	18.6
18	144	1800	22	7.68	19.2
19	152	1900	23.2	8.16	20.6
20	160	2000	24.2	8.56	21.4
21	168	2100	25.4	8.88	22.4
22	176	2200	26.6	9.28	23.2
23	184	2300	29	9.76	24.6

24	192	2400	29.6	9.92	25.4
25	200	2500	30.2	10.4	26.2

Tabel 1.7 Hasil pengujian gelombang Back EMF

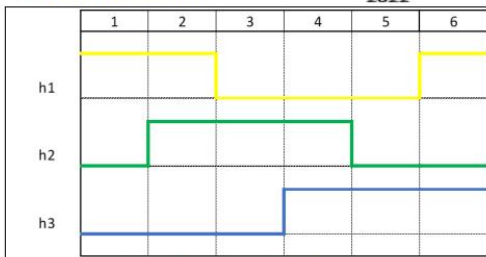
Pada Tabel 1.7 menunjukan hasil gelombang back emf pada variasi kecepatan putar dari rentang 100 hingga 2500 rpm. pada tegangan antar fasa u-v didapatkan hasil gelombang keluaran dengan nilai paling rendah sebesar 1.12 V pada kecepatan putar 100 rpm dan tegangan keluaran tertinggi pada angka 30.2 V pada kecepatan putar 2500 rpm. Pada fasa V-W, hasil gelombang yang dihasilkan memiliki nilai keluaran terkecil sebesar 0.720 V pada kecepatan 100 rpm dan nilai tertinggi pada angka 10.4 V pada kecepatan 2500 rpm. hasil ini lebih rendah jika dibandingkan dengan tegangan antar fasa U-V dan W-U karena terdapat kesalahan dalam proses winding yang menyebabkan keluaran gelombang tidak maksimal. pada tegangan antar fasa W-U didapatkan nilai keluaran tegangan paling rendah pada angka 1.2 V pada kecepatan putar 2500 rpm dan keluaran tegangan tertinggi bernilai 26.2 V. hasil gelombang back emf yang dihasilkan masih belum sesuai dengan hasil keluaran pada simulasi yang dilakukan, dimana pada *roted speed* 2500 rpm didapatkan nilai gelombang keluaran sebesar 50 V. hal ini disebabkan oleh skema pada belitan yang terdapat kesalahan dan kualitas material magnet yang digunakan memiliki kualitas yang dibawah standar. pada tegangan antar fasa W-U mengalami penurunan tegangan seiring semakin tinggi kecepatan putar, hal ini disebabkan oleh rugi-rugi inti yang dihasilkan, dimana terdiri dari dua yaitu rugi-rugi arus eddy dan rugi-rugi hysteresis.

5. Pengujian Sensor Hall

Hall sensor merupakan alat komutasi yang digunakan untuk mengatur sistem switching pada motor BLDC. Cara kerja dari hall sensor adalah dengan mendeteksi posisi magnet pada rotor sehingga nantinya kontroler dapat mengalirkan arus pada belitan stator[2]. Pada proses pengujian sensor hall yang telah kami lakukan, didapatkan hasil keluaran sinyal sensor hall sebagai berikut.

Step	1	2	3	4	5	6
H1	1	1	0	0	0	1
H2	0	1	1	1	0	0
H3	0	0	0	1	1	1

pada step pertama hanya H1 berlogika High, sedangkan pada H2 dan H3 masing-masing berlogika "LOW". pada step kedua masing-masing H1 dan H2 berlogika "HIGH", sedangkan pada H3 berlogika "LOW", dan seterusnya. sehingga pada satu sekuense putaran mekanik rotor menghasilkan 6 sekuens gelombang elektrik, yang mana digambarkan pada grafik berikut.



Tabel 1.1 Grafik Keluaran Sinyal Six-Step Sensor Hall siklus yang terbentuk pada grafik 1.1 akan mengalami perulangan sehingga menyebabkan motor berputar secara kontinyu selama belitan stator dialiri oleh arus oleh kontroler six-step.



gambar 1.5 Gelombang Keluaran Sinyal Six-Step H1 Terhadap Gelombang Back EMF

pada gambar 1.5 menunjukan hasil pengujian linearitas gelombang Back EMF pada fasa U-V dengan H1. gelombang keluaran yang dihasilkan sudah sesuai dengan logika keluaran sinyal H1, namun terdapat sedikit pergeseran derajat gelombang yang disebabkan oleh perputaran rotor yang tidak presisi sehingga menyebabkan pembacaan sensor hall terhadap magnet menjadi kurang akurat. hal tersebut juga terjadi pada keluaran gelombang pada H2 dan H3.



gambar 1.6 Gelombang Keluaran Sinyal Six-Step H2 Terhadap Gelombang Back EMF

gambar 1.6 menunjukkan pengujian linearitas gelombang keluaran H2 terhadap tegangan antar fasa U-P sehingga diharapkan keluaran gelombang H2 terhadap tegangan W-I yang polaritas gelombangnya sudah sesuai, namun masih terdapat sedikit ketidaksesuaian pada derajat elektrinya.



gambar 1.7 Gelombang Keluaran Sinyal Six-Step H3 Terhadap Gelombang Back EMF

pada gambar 1.7 menunjukan gelombang keluaran tegangan antar fasa V-W terhadap sensor H3, dimana menunjukan polaritas gelombang yang sudah sesuai, namun sama seperti gelombang H1 dan H2, masih terdapat sedikit pergeseran derajat elektrik antara sinyal H3 dengan gelombang tegangan V-W.

Logs / Catatan Aktivitas (meliputi perencanaan, aktivitas/tugas, dan capaiannya)

Perencanaan

Pada proses perencanaan, langkah awal yang dilakukan adalah melakukan proses *deburring*, yaitu pembersihan sisa-sisa pemotongan dari proses *post machining*. Melakukan proses laminasi pada stator dan rotor dengan menggunakan *insulating varnish*, yang bertujuan untuk memberikan lapisan pada stator rotor yang memberikan manfaat mengurangi rugi-rugi arus eddy. Dilakukan proses *stacking* dimana inti besi disusun menjadi satu bagian sesuai dengan dimensi ketebalan yang telah ditentukan pada proses perancangan. Pemasangan belitan pada stator dan juga pemasangan magnet pada rotor. Setelah belitan terpasang pada stator, dilakukan pengukuran pada belitan, yang terdiri dari pengukuran isolasi tahanan, resistansi dan induktansi pada tiap masing-masing belitan. Kemudian penyatuan belitan pada masing masing slot stator, sehingga menjadi satu bagian kelompok fasa. Kemudian dilakukan proses *assembly*, pada *housing*, dilakukan proses pemasangan inti besi. Tahap terakhir yaitu melakukan pengujian BEMF yang bertujuan untuk mendapatkan data sebagai validasi nilai pada hasil simulasi BEMF.

Aktivitas/tugas

No	Anggota	Tugas dan Tanggung jawab	Target
1	Rafly Faridhoni	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan <i>deburring</i> pada stator dan rotor. Melakukan laminasi pada stator dan rotor. Melakukan <i>assembly</i> stator dan rotor yang telah dilaminasi. Melakukan pengukuran Resistansi. Melakukan pengukuran Induktansi. Melakukan pengukuran Tahanan Isolasi Lilitan. Melakukan pengujian Back EMF. 	<ul style="list-style-type: none"> Mengurangi atau menghilangkan sisa logam dan menghaluskan permukaan pada stator dan rotor sebelum dilakukan proses laminasi. Stator dan rotor terlamnisi dengan <i>insulating varnish</i>. <i>Stacking</i> pada tiap keping inti besi stator dan rotor, dimana inti besi disusun menjadi satu bagian sesuai dengan dimensi ketebalan yang telah ditentukan pada proses perancangan. Mengetahui keseimbangan luas penampang dari masing-masing slot kumparan dan melihat apakah ada hubung singkat antara tembaga dengan belitan. Mengetahui keseimbangan jumlah lilitan pada setiap slot stator. Mengetahui apakah terjadi kebocoran pada tiap lilitan pada slot stator. Mendapatkan kesesuaian gelombang keluaran antar fasa dengan hasil simulasi <i>Back EMF</i>

2	Ilham Dimas Fahrizal	<ul style="list-style-type: none"> Melakukan <i>deburring</i> pada stator dan rotor. Melakukan laminasi pada stator dan rotor. Melakukan <i>assembly</i> stator dan rotor yang telah dilaminasi. Melakukan pengukuran Resistansi. Melakukan pengukuran Induktansi. Melakukan pengukuran Tahanan Isolasi Lilitan. Melakukan pengujian Back EMF. 	<p>yang dilakukan.</p> <ul style="list-style-type: none"> Mengurangi atau menghilangkan sisa logam dan menghaluskan permukaan pada stator dan rotor sebelum dilakukan laminasi. Stator dan rotor terlamnisi dengan <i>insulating varnish</i>. <i>Stacking</i> pada tiap keping inti besi stator dan rotor, dimana inti besi disusun menjadi satu bagian sesuai dengan dimensi ketebalan yang telah ditentukan pada proses perancangan. Mengetahui keseimbangan luas penampang dari masing-masing slot kumparan dan melihat apakah ada hubung singkat antara tembaga dengan belitan. Mengetahui keseimbangan jumlah lilitan pada setiap slot stator. Mengetahui apakah terjadi kebocoran pada tiap lilitan pada slot stator. Mendapatkan kesesuaian gelombang keluaran antar fasa dengan hasil simulasi <i>Back EMF</i> yang dilakukan.
---	----------------------	---	---

Capaian

No	Proses yang telah dilakukan	Capaian
1	Melakukan Manufaktur Komponen Prototype	Seluruh komponen dari prototype telah lengkap untuk proses perakitan.
2	Melakukan Assembly Komponen Prototype	Proses perakitan telah dilakukan, yang meliputi laminasi pada tiap buah dari stator dan rotor, penyatuan tiap buah dari stator dan rotor, pemasangan kawat pada tiap slot stator,

		penyatuan <i>wiring</i> kawat antar slot dari stator, pemasangan <i>shaft</i> rotor dan pemasangan stator dan rotor ke <i>housing</i> .
3	Membuat Pengujian <i>Prototype</i>	Dilakukan pengukuran resistansi, pengukuran induktansi, pengukuran tahanan isolasi, pengalaman pengguna dan pengujian <i>Back EMF</i> . Keseluruhan pengujian dilakukan untuk menghasilkan data yang mendekati target.

Catatan tambahan

Referensi (menggunakan format IEEE dalam penulisan referensi)

[1] R. Ondrialdi, U. Situmeang, and Zufahri, "Analisis Pengujian Kualitas Isolasi Transformator Daya di PT. Indah Kiat Pulp and Paper Perawang," *SainETn*, vol. 4, no. 2, pp. 72-81, Jun. 2020, doi: 10.31849/sainetn.v4i2.6288.

[2] Q. Fitriyah, R. Aritha, H. Toar, and M. P. E. Wahyudi, "ALAT KENDALI KECEPATAN MOTOR PADA PENGGERAK DEPAN SEPEDA LISTRIK DI POLITEKNIK NEGERI BATAM," *J. INTEGRASI*, vol. 12, no. 2, pp. 116-121, Oct. 2020, doi: 10.30871/ji.v12i2.2417.

LAMPIRAN-LAMPIRAN

Sertakan dokumen/bukti-bukti pendukung dari deskripsi/penjelasan laporan ini (jika ada)



NEW 8192SA / 2025A OPERATING INSTRUCTION

[DANGER, HIGH VOLTAGE]

Before using this tester, read the safety warnings and test methods described in the instruction manual thoroughly and completely.

1. Preparation

- 1) First of all, check the battery power level. When the battery indicator shows () , the battery is exhausted. Replace the batteries with new ones.
- 2) It is very dangerous if any electrical charge is remaining in the circuit of the test object.
- 3) Always ring-bell before measurement with a high voltage tester.
- 4) Wear insulated gloves for high voltage.
- 5) Confirm that the range switch is at the "OFF" position, and then connect the test leads to the instrument.

2. Voltage measurement (600V or less)

Can measure voltage to ground or 600V or less with this instrument.

WARNING

- * This instrument does not have a function for measuring high voltage.
- * Do not make measurement when the voltage to ground is over than 600V over of the line voltage is 600V or less.
- * Set the range switch to "V ac/dc" position.
- * Connect the test leads to the correct under test to measure voltage. There is no need to press the test button (Fig. 1).
- * This instrument has AC/DC detection function and can measure AC/DC voltage.

3. Insulation resistance measurement

3-1. Measurement

- 1) Set the range switch to a desired insulation resistance range.
- 2) Connect the test leads to the circuit under test.
- 3) Press the test button (Fig. 1) to start a measurement.
- 4) The measured voltage can be checked on the voltage monitor.
- 5) When the measurement ends, make sure that the voltage monitor shows 0V with the test leads connected. The auto-discharge function operates to discharge the electric charge on the circuit under test.

3-2. DAR/PI Measurement Function

- 1) An insulation measurement begins, after a measurement is started, DAR/PI value will be displayed automatically on the display in a certain time.
- 2) Press the "DAR/PI" button (Fig. 2) to switch DAR or PI value.

Unit	Insulation resistance (1 sec after a start of test)
(Elements Association Ratio)	DAR
(Phase-to-ground Index)	PI

Start of test → [DAR/PI] → [DAR value] / [PI value]

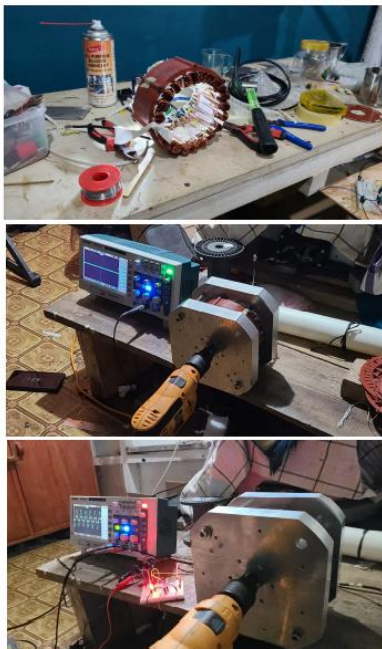
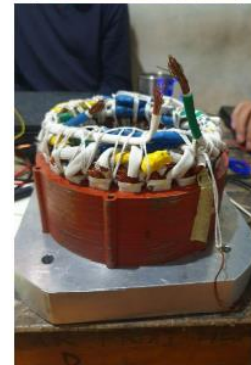
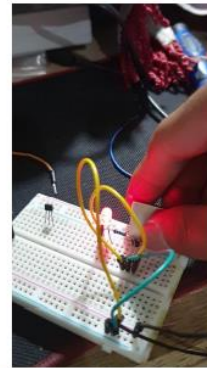
Press [DAR/PI] → [DAR value] / [PI value]

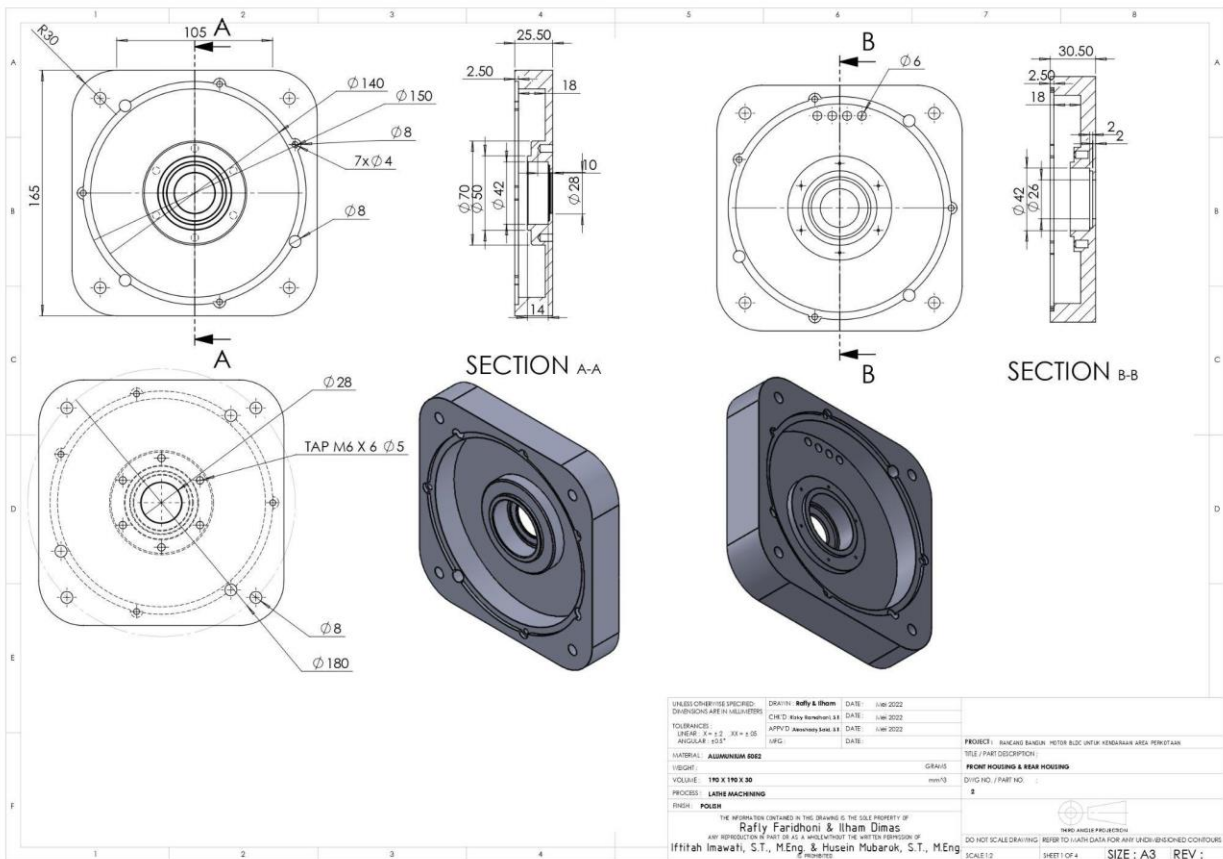
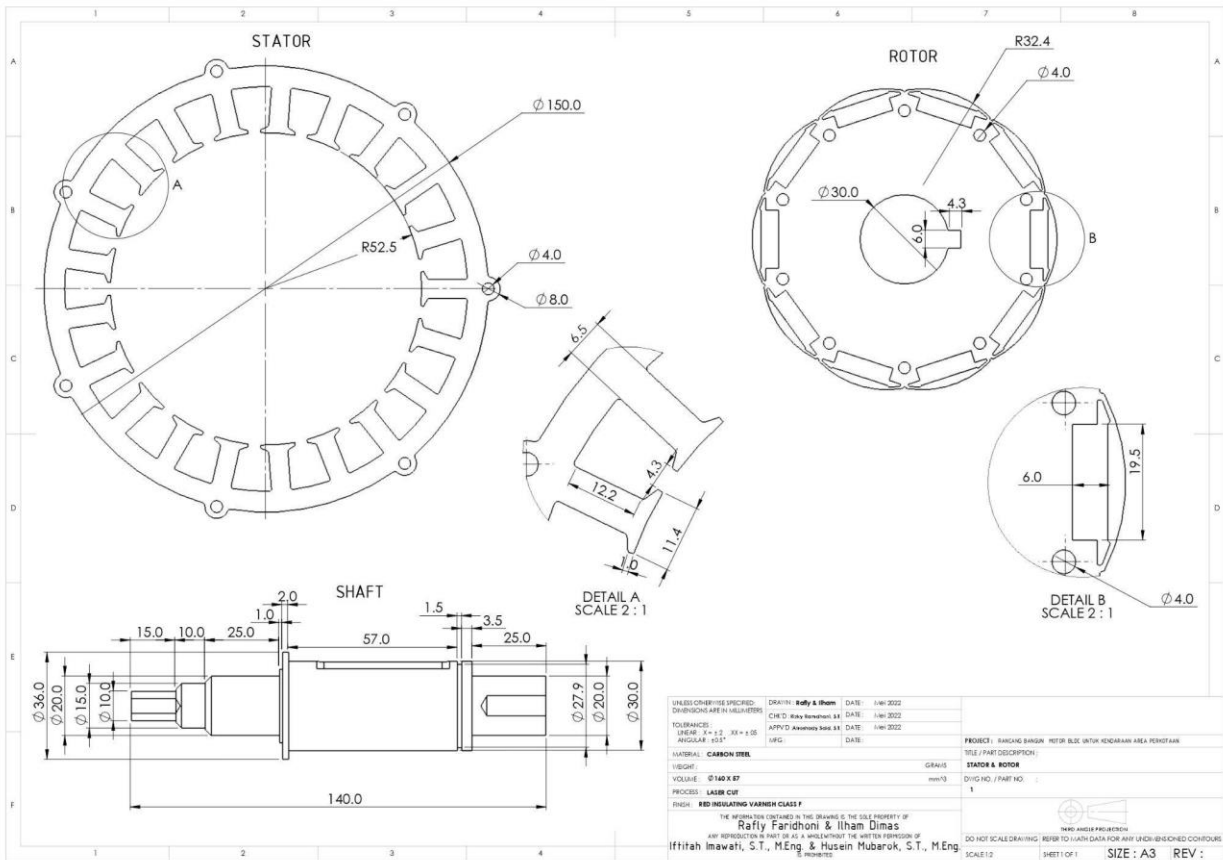
3-3. Continuous measurement

For continuous measurement, press and turn the test button clockwise. (See Fig. 1). Handle with care since high voltages will be generated continuously.

Range	250V	500V	1000V	5000V
Measuring range & accuracy	10-100.00kV (0.1-99.99kV) (R=100kΩ)	10-100.00kV (0.1-99.99kV) (R=100kΩ)	10-100.00kV (0.1-99.99kV) (R=100kΩ)	10-100.00kV (0.1-99.99kV) (R=100kΩ)
Power source	D.C. 1.5V (6x1.5V) (D.C. 1.5V (6x1.5V) (D.C. 1.5V (6x1.5V) (D.C. 1.5V (6x1.5V)			
Battery	LR14 (Alkaline battery size C) × 6 pcs			

Note: See also the NEW 8192SA.





Gambar

Keterangan



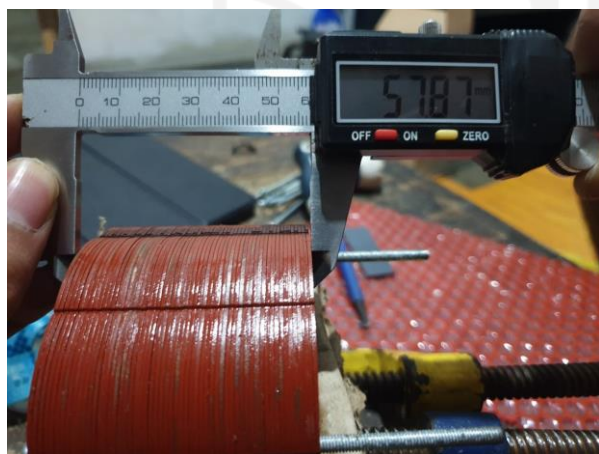
Proses deburring stator dan rotor.



Proses pemasangan stacking rotor.



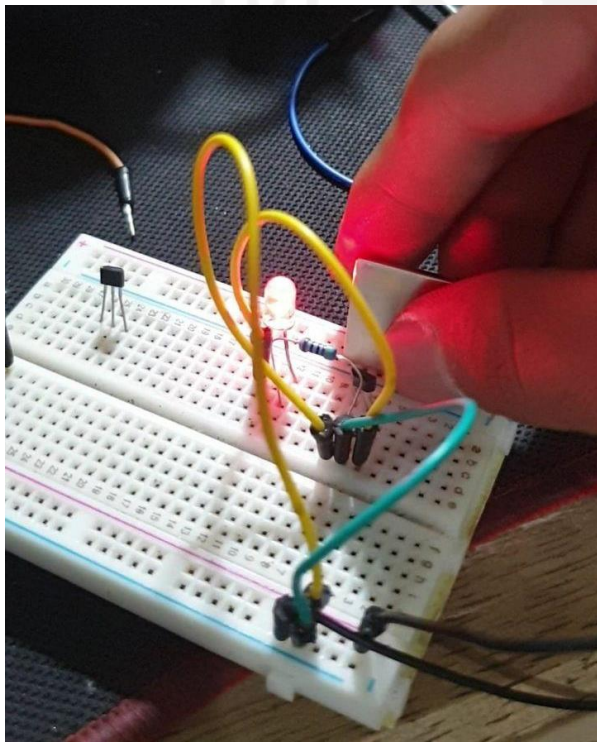
Laminasi pada stator dan rotor.



Pengukuran ketebalan rotor.



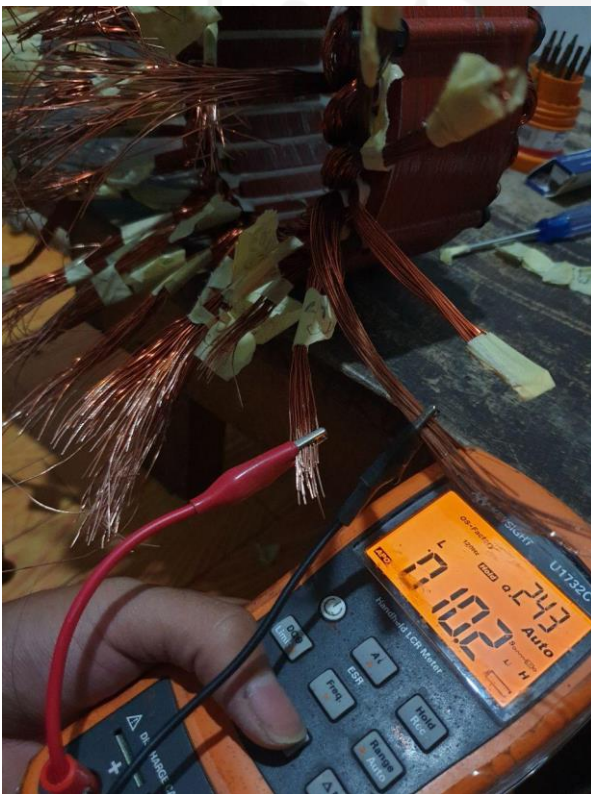
Pemasangan kumparan pada stator.



Proses *testing* magnet pada hall sensor.



Micro-Ohm Meter, digunakan saat pengukuran resistansi.



Pengukuran Induktansi dari kumparan kawat stator.



Ketika menyolder *winding* pada tiap kumparan menyesuaikan skema.



Pengujian tahanan isolasi.



KEW 3125A / 3025A OPERATING INSTRUCTION

[DANGER. HIGH VOLTAGE]

Before using this tester, read the safety warnings and test methods described in the instruction manual thoroughly and completely.

1. Preparation

- First of all, check the battery power level. When the battery indicator shows (), the batteries are exhausted. Replace the batteries with new ones.
- It is very dangerous if any electrical charge is remaining in the circuit of the test object. * Please check it before measurement with a high voltage detector.
- Wear insulated gloves for high voltage.
- Confirm that the Range switch is at the "OFF" position, and then connect the test leads to the instrument.


2. Voltage measurement (600V or less)

Can measure voltage to ground of 600V or less with this instrument.

WARNING

- This instrument does not have a function for measuring high voltage.
- Do not make measurement when the voltage to ground is over than 600V even if the line voltage is 600V or less.

- Set the range switch to "V AC/DC" position.
- Connect the test leads to the circuit under test to measure voltage. There's no need to press the test button (Fig.1).
- This instrument has AC/DC detection function and can measure AC/DC voltage.



(Fig.1)

3. Insulation resistance measurement

3-1. Measurement

- Set the range switch to a desired insulation resistance range.
- Connect the test leads to the circuit under test.
- Press the test button (Fig.1) to start a measurement. The measured voltage can be checked on the voltage monitor.
- When the measurement ends, make sure that the voltage monitor shows 0V with the test leads connected. The auto-discharge function operates to discharge the electric charges on the circuit under test.

3-2. DAR/PI Measurement Function

- At insulation measurement ranges, after a measurement is started, DAR/PI value will be displayed automatically on the display in a certain time.
- Press the "DISP" Button (Fig.2) to switch DAR or PI value.

DAR (Dielectric Absorption Ratio)	DAR =	Insulation resistance (1 min after a start of test) Insulation resistance (15 sec after a start of test) *1
PI (Polarization Index)	PI =	Insulation resistance (10 min after a start of test) Insulation resistance (1 min after a start of test)

Note *1: 15 or 30 sec is selectable.

Start of test → 1 min later → DAR value → 10 min later → PI value

* DISP * Button to switch the displayed DAR/PI values

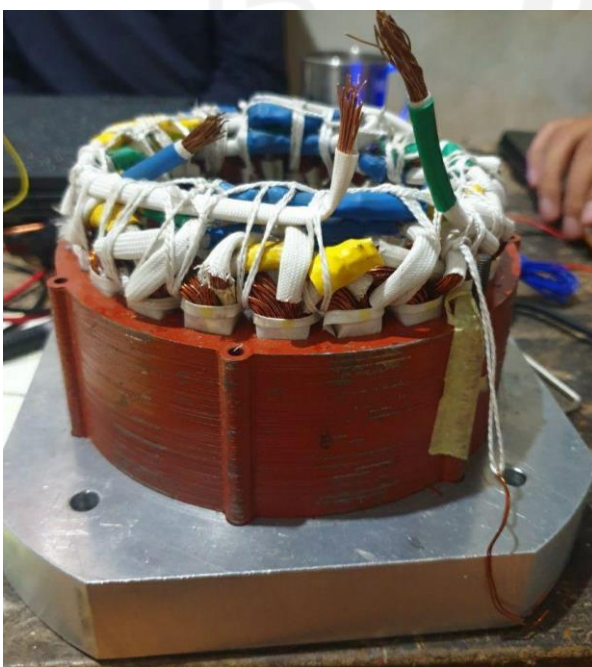
3-3. Continuous measurement

For continuous measurement, press and turn the test button clockwise. (See Fig.1)
Handle with care since high voltages will be generated continuously.

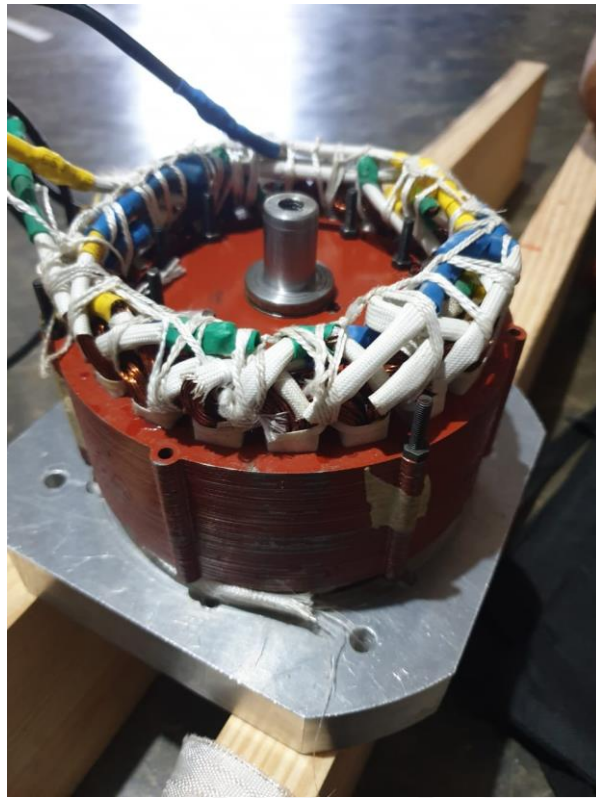
Rated measuring voltage	250V	500V	1000V	2500V	5000V *2
Measuring range & accuracy	0.0-100.0MΩ	0.0-99.9MΩ 80-1000MΩ	0.0-99.9MΩ 80-999MΩ 0.80-2.00GΩ	0.0-99.9MΩ 80-999MΩ 8.0-100.0GΩ	0.0-99.9MΩ 80-999MΩ 0.80-9.99GΩ 8.0-99.9GΩ
		± 5% rdg ± 3 dgt			± 20% rdg
Display range	0.0-105.0MΩ	0.0-1050MΩ	0.0M-2.10GΩ	0.0M-105.0GΩ	0.0M-1200GΩ
Battery	LR14 (Alkaline battery size C) × 8 pcs				

Note *2: only on KEW 3125A

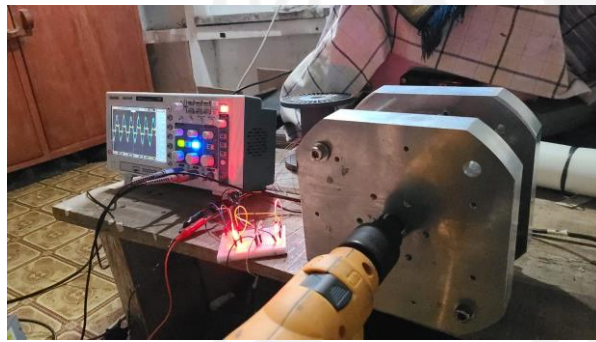
Operation instruction dari megger.



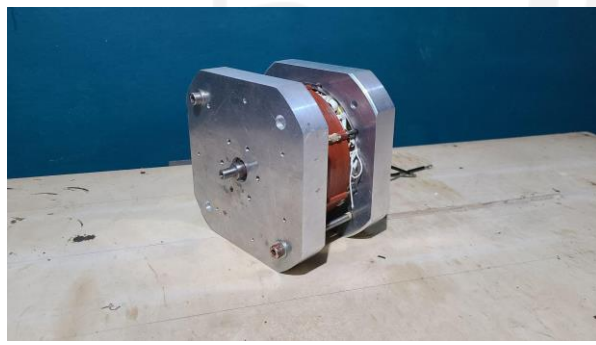
Kondisi *prototype* ketika *winding* telah disatukan.



Kondisi *prototype* ketika *winding* telah disatukan dan rotor telah dipasang.



Pengujian hall sensor pada *prototype*.



Prototype telah selesai terassembly.