

**SKRIPSI**

**PERANCANGAN *BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MOTOR*  
UNTUK KONVERSI KENDARAAN BERBAHAN BAKAR FOSIL  
MENJADI KENDARAAN LISTRIK**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro



Oleh

**BOBY GERMANA FADLY**

**20170019**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA BARAT  
2024**

**PROPOSAL SKRIPSI**

**PERANCANGAN *BRUSHLESS DIRECT CURRENT (BLDC) MOTOR*  
UNTUK KONVERSI KENDARAAN BERBAHAN BAKAR FOSIL  
MENJADI KENDARAAN LISTRIK**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro



Oleh

**BOBY GERMANA FADLY**

**20170019**

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA BARAT  
2024**



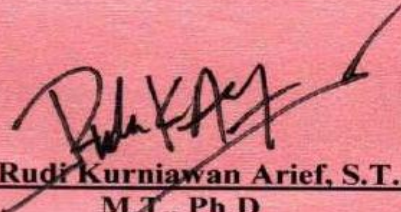
**HALAMAN PENGESAHAN**  
**PERANCANGAN *BRUSHLESS DIRECT CURRENT* (BLDC) MOTOR**  
**UNTUK KONVERSI KENDARAAN BERBAHAN BAKAR FOSIL**  
**MENJADI KENDARAAN LISTRIK**

Oleh

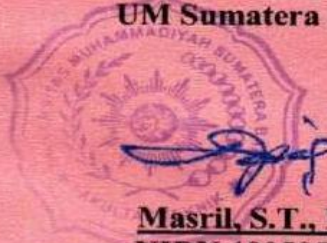

**BOBY GERMANA FADLY**

**20170019**

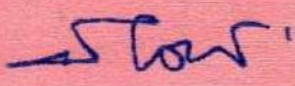
**Dosen Pembimbing I,**

  
**Ir. Rudi Kurniawan Arief, S.T.,**  
**M.T., Ph.D**  
**NIDN. 1023068103**

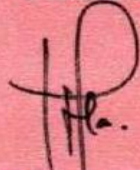
**Dekan Fakultas Teknik**  
**UM Sumatera Barat,**

  
  
**Masril, S.T., M.T.**  
**NIDN 1005057407**

**Dosen Pembimbing II,**

  
**Herris Yamashika, S.T., M.T.**  
**NIDN. 1024038202**

**Ketua Program Studi**  
**Teknik Elektro,**

  
**Aggrivina Dwiharzandis, S.Pd, M.T.**  
**NIDN. 1009019401**

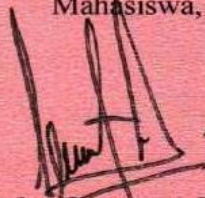


## LEMBAR PERSETUJUAN TIM PENGUJI

Skripsi ini telah dipertahankan dan disempurnakan berdasarkan masukan dan koreksi Tim Penguji pada ujian tertutup tanggal 27 Februari 2024 di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat.

Bukittinggi, 27 Februari 2024

Mahasiswa,

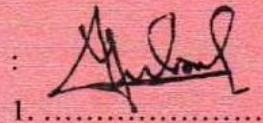


**Bobby Germana Fadly**

20170019

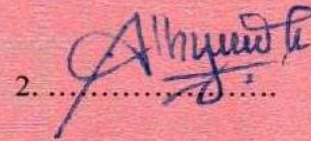
Disetujui Tim Penguji Skripsi tanggal :

1. Ir. Yulisman, M.T.



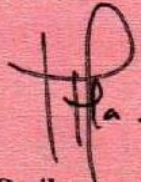
1. ....

2. Mahyessie Kamil, S.T., M.T.



2. ....

Mengetahui,  
Ketua Program Studi  
Teknik Elektro,



**Aggrivina Dwiharzandis, S.Pd, M.T.**

**NIDN. 1009019401**



## LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Bobby Germana Fadly  
Tempat dan Tanggal Lahir : Padang, 02 Desember 1991  
Judul Skripsi : Perancangan *Brushless Direct Current* (BLDC)  
Motor Untuk Konversi Kendaraan Berbahan  
Bakar Fosil Menjadi Kendaraan Listrik

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa penulisan skripsi ini berdasarkan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli dari saya sendiri, baik untuk naskah laporan maupun kegiatan yang tercantum sebagai bagian dari Skripsi ini. Jika terdapat karya orang lain, saya akan cantumkan sumber yang jelas.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya tulis ini dan sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat.

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar tanpa paksaan dari pihak mana pun.

Bukittinggi, 27 Februari 2024

Yang membuat pernyataan,



**Bobby Germana Fadly**

20170019

## ABSTRAK

Penelitian pada tugas akhir ini mengenai perancangan desain elektrik motor BLDC sebagai aplikasi untuk konversi kendaraan berbahan bakar fosil menjadi kendaraan listrik. Kendaraan yang dijadikan acuan dalam penelitian ini adalah kendaraan mobil berjenis sedan. Tujuan akhir dari penelitian ini adalah mendesain elektrik motor BLDC dengan kecepatan 5.200 rpm dan torsi sebesar 142 N.m. metode yang digunakan pada desain elektrik motor BLDC ini adalah metode simulasi dengan menggunakan *software* desain elektromagnetik berbasis FEM. Setelah diperoleh hasil *output* desain pada FEM maka dilakukan validasi data motor BLDC dengan menggunakan sistem *open loop*. Hasil dari simulasi dan konversi mekanik menunjukkan bahwa diperoleh torsi pada motor sebesar 14 N.m, *rating* kecepatan 5200 rpm dan efisiensi 94,7%. Nilai *output* dan kecepatan sudah sesuai dengan nilai ketika kendaraan masih menggunakan mesin berbahan bakar fosil. Di akhir hasil *respons* validasi desain telah sesuai dengan hasil parameter *output* pada FEM.

**Kata kunci** : Konversi Kendaraan, BLDC, *Finite Element Method*



## KATA PENGANTAR

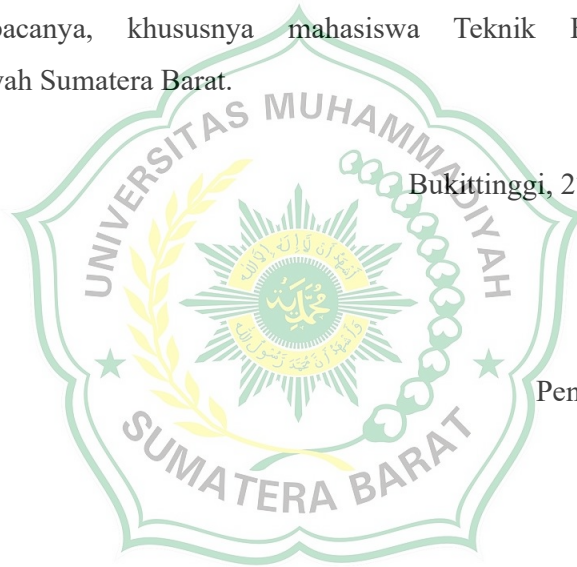
Puji syukur kepada Allah SWT atas segala berkat yang telah diberikan-Nya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan. Skripsi ini merupakan salah satu kewajiban yang harus diselesaikan untuk memenuhi Sebagian persyaratan akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro di Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat (UM Sumatera Barat).

Penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan, bantuan dan doa dari berbagai pihak, Skripsi ini tidak akan dapat diselesaikan tepat pada waktunya. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses pengerjaan skripsi ini, yaitu kepada:

1. Kedua orang tua penulis yang telah menjadi super hero buat penulis dan selalu memberikan kasih sayang, doa, nasehat, serta kesabarannya yang luar biasa dalam setiap langkah hidup penulis, yang merupakan anugerah terbesar dalam hidup penulis. Penulis berharap dapat menjadi anak yang dapat dibanggakan bagi mereka;
2. Keluarga Borobudur dan Keluarga Petojo yang tidak pernah lelah memberikan dukungan, dan motifasi kepada penulis untuk bisa menyelesaikan jenjang pendidikan S1 ini;
3. Abang-abang penulis, terima kasih atas doa dan segala dukungan;
4. Istri dan anak yang tercinta, yang selalu sabar dan selalu memberikan dukungan kepada penulis untuk menyelesaikan jenjang pendidikan ini;
5. Muhammad Hafiz yang telah menjadi teman belajar selama kuliah, teman yang sama-sama haus ilmu pengetahuan, teman yang sama-sama pusing dalam pengerjaan skripsi;
6. Bapak Masril, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik UM Sumatera Barat;
7. Bapak Hariyadi, S.Kom., M.Kom., selaku Wakil Dekan Fakultas Teknik UM Sumatera Barat;
8. Ibu Aggrivina Dwiharzandis, S.Pd, M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro;
9. Ibu Mira Meilisa, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik;

10. Bapak Ir. Rudi Kurniawan Arief, S.T., M.T., Ph.D, selaku Dosen Pembimbing I skripsi yang telah memberikan bimbingan dan banyak memberikan masukan kepada penulis;
11. Bapak Herris Yamashika, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing II skripsi yang telah memberikan bimbingan dan banyak memberikan masukan kepada penulis;
12. Bapak/Ibu tenaga kependidikan Fakultas Teknik UM Sumatera Barat;
13. Semua pihak yang namanya tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata, penulis menyadari bahwa mungkin masih terdapat banyak kekurangan dalam skripsi ini. Oleh karena itu, saran dari pembaca akan sangat bermanfaat bagi penulis. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya, khususnya mahasiswa Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat.



Bukittinggi, 27 Januari 2024

Penulis



## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	i
LEMBAR PERSETUJUAN TIM PENGUJI.....	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumus Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Kendaraan Listrik.....	7
2.3 <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC) Motor.....	9
2.3.1 Stator.....	10
2.3.2 Rotor.....	11
2.3.3 Air-Gap.....	11
2.4 Metode Komutasi <i>Six-Step</i> .....	11

2.5	<i>Back</i> -EMF dan Konstanta <i>Back</i> -EMF ( $K_e$ ) pada BLDC Motor .....	12
2.6	Baja Elektrik (Electrical Steels) .....	13
2.7	Magnet Permanen.....	13
2.8	Jenis Lilitan .....	13
2.9	Derajat <i>Slot</i> , Derajat <i>Pole</i> dan Derajat Mekanik .....	14
2.10	Kombinasi Slot dan Pole.....	15
2.11	Torsi Cogging .....	16
2.12	FEM .....	17
2.13	<i>Sizing Tools</i> .....	19
BAB III	KONSEP PERANCANGAN.....	20
3.1	Lokasi Penelitian.....	20
3.2	Diagram Alir Perancangan .....	20
3.3	Spesifikasi Kendaraan .....	21
3.4	Pemodelan BLDC Motor dengan FEM.....	23
3.4.1	Membuat Model Geometri Motor BLDC.....	26
3.4.2	Membuat <i>Winding</i> pada Model Motor BLDC .....	28
3.4.3	Menambahkan <i>Boundary Conditions</i> dan <i>Mesh</i> pada Model Motor BLDC	32
3.5	Peralatan dan Bahan .....	33
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1	Analisis Pemodelan Desain .....	34
4.2	Analisis <i>Back</i> -EMF dan Konstanta <i>Back</i> -EMF pada Motor BLDC.....	35
4.3	Analisis Performa Motor BLDC dengan Kondisi Tanpa Beban .....	36
4.4	Analisis Torsi <i>Cogging</i> pada Motor BLDC.....	40
4.5	Parameter dari Desain Motor BLDC dengan <i>Software</i> FEM.....	41
4.6	Pengujian Motor BLDC dengan Kondisi Beban Torsi pada Simulink...	42

BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN .....	47
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA.....		48
LAMPIRAN.....		50





## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Penelitian terdahulu.....	6
Tabel 3. 1. Jadwal penelitian .....	20
Tabel 3.2. Spesifikasi kendaraan [20] .....	22
Tabel 3.3. Spesifikasi Minimum Kebutuhan Perancangan Motor BLDC.....	23
Tabel 3. 4. Spesifikasi model BLDC motor .....	24
Tabel 3.5. Hubungan kumparan pada masing-masing fasa.....	30
Tabel 3.6. Faktor Ruang Kawat pada Lilitan Stator.....	31
Tabel 4. 1.Hasil Output Desain Motor BLDC dengan Menggunakan .....	39
Tabel 4. 2. Parameter Desain Motor BLDC .....	42



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Komponen-komponen mobil listrik .....	8
Gambar 2.2. Struktur pada BLDC motor [13] .....	9
Gambar 2.3. Bagian-bagian pada BLDC motor.....	10
Gambar 2.4. Konstruksi Stator pada 1 Slot.....	10
Gambar 2.5. Topologi Magnet: (a) SPM, (b) IPM.....	11
Gambar 2.6. Bentuk Gelombang Komutasi[15] .....	12
Gambar 2.7. Jenis Lilitan (a) Concentrated Winding, (b) Distributed Winding [17] .....	14
Gambar 2.8. Kombinasi slot dan pole untuk motor 3 fasa [7] .....	16
Gambar 2.9. Flowchart Memodelkan Motor BLDC pada Software.....	18
Gambar 3.1. Diagram alir sistem pada motor BLDC .....	20
Gambar 3.2. Metode Pengerjaan Tugas Akhir.....	21
Gambar 3.3. Bentuk Geometri dari BLDC Motor 21 Slot 10 Pole.....	26
Gambar 3.4. Kurva B-H Material M-19 29 Ga.....	27
Gambar 3.5. Desain Motor BLDC 21 Slot 10 Pole yang Telah Diberikan Komponen .....	28
Gambar 3.6. Simulasi Konfigurasi Lilitan Stator 21 Slot pada Software Pengolah Data .....	29
Gambar 3.7. Hubungan Kumparan Fasa R pada Software Pengolah Data.....	30
Gambar 3.8. Konfigurasi Antar Kumparan.....	32
Gambar 3.9. Boundary Condition dan Mesh pada Desain Motor BLDC .....	33
Gambar 4.1. Distribusi Aliran Flux pada Desain Motor BLDC 21 Slot 10 Pole..	34
Gambar 4.2. Gelombang Back-EMF pada Kecepatan Putar Motor 7.300 Rpm...	35
Gambar 4.3. Gelombang Arus Six-Step pada Motor BLDC.....	36
Gambar 4.4. Gelombang Torsi pada Motor BLDC.....	37
Gambar 4.5. Kurva Torsi Terhadap Kecepatan pada Motor BLDC.....	38
Gambar 4.6. Gelombang Torsi Cogging pada Desain Motor BLDC 21 Slot 8 Pole .....	41
Gambar 4.7. Diagram Alir BLDC Motor Speed Control .....	42
Gambar 4.8. Repon Kecepatan Motor BLDC Kondisi Berbeban.....	43

Gambar 4.9. Sinyal Output Sensor Hall..... 44  
Gambar 4.10. Arus Motor BLDC Fasa U-V-W ..... 45  
Gambar 4.11. Back-EMF Motor BLDC U-V-W..... 45  
Gambar 4.12. Torsi Elektrik pada Motor BLDC..... 46





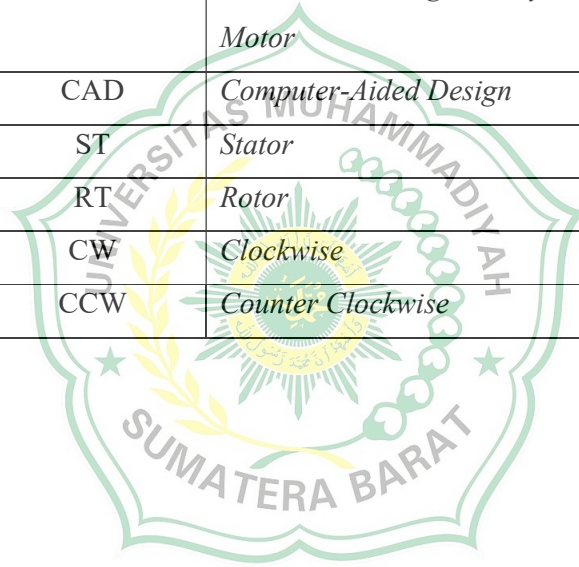
## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran 1.</b> Desain Motor BLDC.....	50
<b>Lampiran 2.</b> Rangkaian Six-Step Inverter untuk Controler BLDC.....	51



## DAFTAR NOTASI

Singkatan	Arti Keterangan
BLDC	<i>Brushless DC</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
Ke	<i>Konstanta Back-EMF</i>
SPM	<i>Surface Permanent Magnet</i>
IPM	<i>Interior Permanent Magnet</i>
DC	<i>Direct Current</i>
AC	<i>Alternating Current</i>
PMSM	<i>Permanent Magnet Synchronous Motor</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
ST	<i>Stator</i>
RT	<i>Rotor</i>
CW	<i>Clockwise</i>
CCW	<i>Counter Clockwise</i>



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Menurut informasi data dari Kementerian Perhubungan, Indonesia memiliki 141,99 juta unit kendaraan bermotor pada tahun 2021. Jumlah tersebut naik 4,30% dari penjualan tahun sebelumnya sebanyak 136,14 juta unit. Bahkan pada tahun 2018, Indonesia memiliki 6,38% mobil bermotor di dunia [1]. Di luar kemacetan lalu lintas, menjamurnya kendaraan bermotor memiliki dampak sekunder berupa pencemaran udara akibat emisi gas buang kendaraan bermotor. Kota-kota besar di seluruh dunia kini menghadapi masalah utama yaitu polusi udara. Polusi udara dapat membahayakan ekosistem, material dan struktur, tanaman, dan juga jarak pandang selain itu efeknya juga dapat merugikan bagi kesehatan manusia. Dapat juga mengakibatkan kerusakan lingkungan akibat peningkatan gas berbahaya CO dan NOx serta polusi suara dari kendaraan [2]. Untuk mengatasi masalah ini diperlukan moda transportasi baru yang ramah lingkungan dan hemat energi.

Kendaraan Listrik Baterai (KLB) merupakan salah satu moda transportasi yang mulai diciptakan saat ini. KLB adalah kendaraan listrik yang menyimpan energi listrik dalam baterai sebelum motor listrik mengubahnya menjadi energi mekanik [3]. Penggunaan KLB kini telah mengalami pertumbuhan yang signifikan di kalangan masyarakat umum. Hal ini dikarenakan KLB memberikan sejumlah keunggulan, salah satunya KLB tidak menyebabkan polusi udara. Selain itu, karena motor listrik berfungsi sebagai sumber penggerak utama daripada bahan bakar fosil, KLB secara signifikan mengurangi efek rumah kaca [4]. Saat ini telah banyak pabrik mobil yang memproduksi KLB. Namun dikarenakan harganya yang masih tinggi tidak sedikit pengguna mobil *Internal Combustion Engine* (ICE) yang mencoba mengkonversikan kendaraannya menjadi KLB.

Motor listrik terdiri dari dua jenis sumber tegangan, yaitu motor *Direct Current* (DC) dan motor *Alternating Current* (AC). Setiap jenis memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Untuk pengaplikasian mobil listrik, motor DC atau AC dapat digunakan. Motor DC memiliki keunggulan dibandingkan motor AC dalam hal pengaturan kecepatan. Sementara itu motor AC memiliki kelebihan yang



menghasilkan kinerja yang optimal dan efektif [5]. Kendaraan listrik digerakkan oleh berbagai jenis motor listrik, diantaranya *Permanent Magnet Synchronous Motors* (PMSM), *Asynchronous Motor* dan *Brushless Direct Current Motors* (BLDC). Ketiganya dibedakan oleh karakteristik dan pengaturan. Untuk PMSM dan AM menggunakan pengaturan frekuensi untuk mengatur kecepatan, sedangkan motor BLDC menggunakan metode kontrol *six-step* [6]. Kontroler *six-step* adalah yang paling sederhana dari dua teknik yang digunakan. Teknik *six-step* dapat menghasilkan gelombang *square* atau *trapezoid* yang meniru gelombang *sinusoidal*. Motor sinkron yang dikenal sebagai BLDC memiliki medan magnet yang dihasilkan pada frekuensi yang sama oleh rotor dan stator. Motor BLDC dibuat berbeda dengan motor DC pada umumnya karena memiliki *input* tiga fasa. Akibatnya, pengontrol berisi *inverter* yang tujuannya untuk mengubah tegangan DC yang masuk ke pengontrol menjadi tegangan AC tiga fasa yang akan diterima motor [7]. Sistem pengontrol yang meniadakan penggunaan fungsi *brush* yang terdapat pada motor DC merupakan salah satu manfaat dari terciptanya motor BLDC. Oleh karena itu, pemilihan jenis motor BLDC dapat menurunkan kebutuhan perawatan *brush* untuk motor dan meningkatkan keefektifan motor saat digunakan dalam aplikasi mobil listrik. Karena motor BLDC biasanya memiliki efisiensi 85% hingga 90% [8], merancang motor BLDC dengan efisiensi lebih tinggi dari 90% penting untuk meningkatkan performa motor. Manfaat motor listrik yang diproyeksikan untuk digunakan pada mobil listrik juga mencakup kepadatan daya yang tinggi, respons torsi yang cepat, desain yang kecil dan ringan, harga yang wajar, perawatan yang mudah, dan pengurangan biaya perawatan [9]. Hal inilah yang memotivasi penulis untuk menciptakan motor listrik yang lebih efektif.

Membuat desain motor BLDC adalah langkah pertama dalam membuatnya. Dalam situasi ini, perangkat lunak desain elektromagnetik dengan dasar FEM (*Finite Element Method*) digunakan untuk membuat desain kelistrikan motor BLDC. FEM menggunakan pendekatan numerik untuk menyelesaikan perhitungan persamaan diferensial dan persamaan integral berdasarkan prinsip elektromagnetik. Perhitungan akan lebih sederhana dan cepat jika dilakukan dengan perangkat lunak FEM daripada jika dilakukan secara manual. Dalam FEM, objek berupa luasan (2D) dan volume (3D) dipecah menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*), yang memiliki nilai

batas dan nilai awal (sebagai *trial and error*) dalam perhitungan yang ada. Proses ini sering dilakukan (iterasi) untuk menghasilkan nilai yang mendekati presisi [10].

Rancangan elektrik motor BLDC dapat digunakan sebagai penggerak mobil listrik pada tugas akhir ini. Desain dimensi motor ini dibuat untuk mengakomodasi kebutuhan mekanis kendaraan listrik. *Output* yang ditargetkan adalah kecepatan rendah dengan torsi yang tinggi, sesuai dengan data kebutuhan terhadap kendaraan yang akan dilakukan konversi. Tugas akhir ini akan melakukan pemodelan dan analisis kinerja Motor BLDC untuk tugas akhir “Perancangan *Brushless Direct Current* (BLDC) Motor Untuk Konversi Kendaraan Berbahan Bakar Fosil Menjadi Kendaraan Listrik”.

## 1.2 Rumus Masalah

Berikut adalah rumusan masalah dalam tugas akhir penelitian, “Perancangan *Brushless Direct Current* (BLDC) Motor Untuk Konversi Kendaraan Berbahan Bakar Fosil Menjadi Kendaraan Listrik”:

1. Bagaimana merancang motor listrik BLDC dirancang untuk digunakan pada konversi kendaraan ICE menjadi EV?
2. Bagaimana kinerja performa motor listrik BLDC beroperasi saat digunakan pada kendaraan listrik yang telah dikonversi?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian untuk tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan simulasi untuk perancangan BLDC dengan menggunakan software berbasis FEM.
2. Motor BLDC digunakan untuk konversi kendaraan ICE menjadi kendaraan KLB.
3. Studi kasus adalah mobil sedan dengan kapasitas 4 penumpang berbahan bakar bensin.
4. Memvalidasi hasil nilai kecepatan, arus, *back-EMF*, dan torsi menggunakan simulasi kontrol *six-step* pada *Simulink*, dan akan dibandingkan hasil karakteristik simulasi motor BLDC pada FEM.

#### **1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian**

Tujuan dari pengerjaan tugas akhir ini adalah:

1. Merancang motor BLDC untuk konversi kendaraan ICE menjadi KLB menggunakan software berbasis FEM.
2. Melakukan pengujian terhadap kinerja motor BLDC hasil rancangan.

Hasil kajian tentang penggunaan motor BLDC untuk mobil konversi dapat dijadikan referensi oleh Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat dalam rangka mendorong kemajuan penelitian pembuatan motor BLDC di Indonesia.

#### **1.5 Sistematika Penulisan**

Untuk mempermudah dalam pemahaman mengenai isi laporan tugas akhir, maka laporan ini disusun dengan sistematika sebagai berikut:

##### **BAB I. PENDAHULUAN**

Pada bab pendahuluan ada latar belakang (masalah), rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan dari skripsi.

##### **BAB II. TINJAUAN PUSTAKA**

Pada bab tinjauan Pustaka diuraikan sumber bacaan mengenai perancangan, teori-teori baik dari buku-buku, jurnal dan hasil-hasil penelitian yang relevan dengan permasalahan dan tujuan penelitian yang diangkat dalam skripsi.

##### **BAB III. METODOLOGI PENELITIAN**

Bab Metodologi Penelitian dasarnya menjelaskan rencana dan prosedur penelitian yang dilakukan penulis untuk memperoleh jawaban yang sesuai dengan permasalahan atau tujuan perancangan pada skripsi.

##### **BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Skripsi yang berupa perencanaan, bab ini berisi berbagai perhitungan perencanaan dan tampilan hasil perencanaannya. Di samping itu, juga harus mampu menjawab secara ilmiah tujuan atau permasalahan yang diajukan dalam skripsi.

## BAB V. PENUTUP

Penutup merupakan bab terakhir yang terdiri atas dua sub bab, yaitu Simpulan dan Saran.

## DAFTAR PUSTAKA

## LAMPIRAN-LAMPIRAN





## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Terdahulu

Penulis menggunakan studi terdahulu sebagai salah satu referensi untuk meninjau penelitian ini ketika melakukan penulisan tugas akhir. Penulis tidak dapat menemukan makalah dengan judul penelitian yang sama sebagai referensi tugas akhir ini. Berikut ini penelitian sebelumnya dari sejumlah publikasi serta tugas akhir yang mendekati dengan masalah penelitian perancangan motor BLDC untuk mendukung referensi dan bahan studi.

Tabel 2. 1. Penelitian terdahulu

Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
Ayu Novianti Putri 2021	Perancangan Desain Motor <i>Brushless Direct Current</i> Dengan Daya 2000 Watt Sebagai Penggerak Mobil Listrik Enggang Evo III	Tiga percobaan dilakukan untuk menguji desain dengan menggunakan panjang stator 100 mm, 150 mm, dan 200 mm. Torsi yang diprediksi adalah 8,59 N.m pada kecepatan 1220,27 rpm. Hasil eksperimen yang memenuhi persyaratan didapatkan pada kecepatan 2812 rpm dan 9,20 N.m dengan panjang stator 150mm.
Rafli Faridhoni, Ilham Dimas Fahrizal (2022)	Rancang Bangun <i>Motor Brushless DC</i> (BLDC)	Dalam penelitian ini mencoba merancang motor dengan spesifikasi

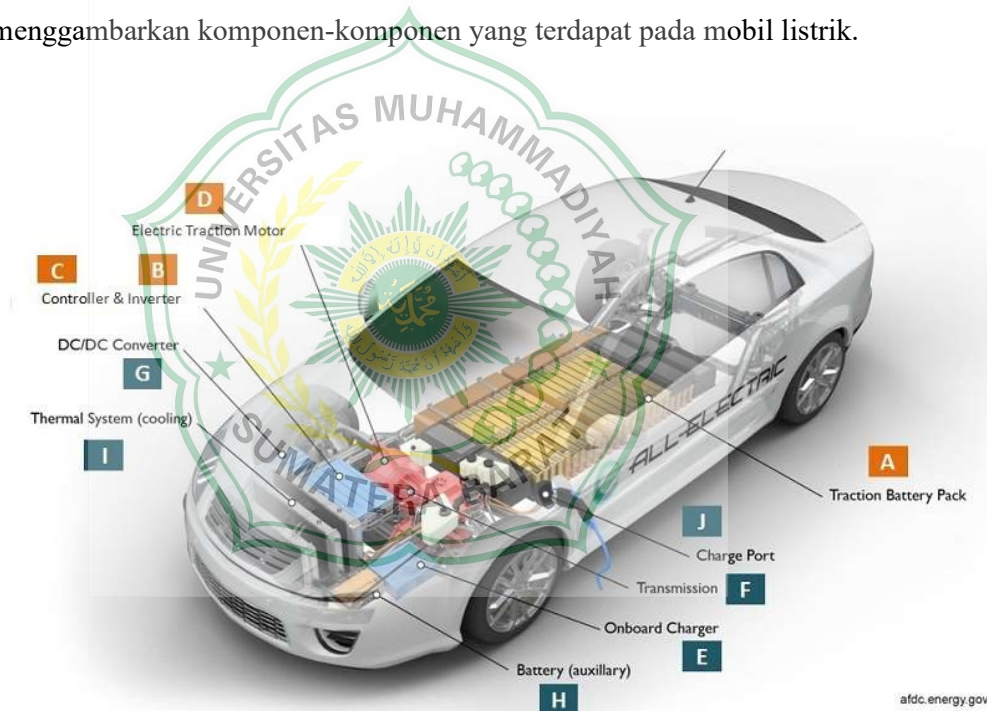
[11]	Untuk Kendaraan Area Perkotaan	motor dengan daya 2000 Watt dan nilai torsi 5,6 N.m pada kecepatan 2500 rpm serta tegangan 72V. percobaan yang dilakukan menggunakan dua percobaan dengan konfigurasi slot pole yang sama namun melakukan perubahan pada bagian rotor serta melakukan optimasi geometri guna mencari desain paling optimal dalam perancangannya.
Xiaodong Sun, Zhou Shi, Gang Lei, Youguang Guo, dan Jianguo Zhu (2019)	<i>Analysis and Design Optimazation of a Permanent Magnet Synchronous Motor for a Campus Patrol Electric Vehicle</i>	Hasil yang diperoleh dari penelitian ini menunjukkan peningkatan terhadap efisiensi dan torsi melalui optimasi pada bagian lebar <i>air-gap</i> , perubahan struktur slot pada stator, serta struktur pada magnet permanen yang digunakan pada rotor.

## 2.2 Kendaraan Listrik

Semua jenis mobil penumpang yang digerakkan sebagian atau seluruhnya oleh motor listrik, seperti kombinasi mesin berbahan bakar dengan motor listrik, disebut sebagai kendaraan listrik (EV). *Battery Electric Vehicle* (BEV) atau juga dikenal

sebagai Kendaraan Listrik Baterai (KLB), adalah kelas kendaraan yang digerakkan secara eksklusif oleh motor listrik. KLB adalah mobil listrik yang menyimpan energi listrik dalam baterai sebelum motor listrik mengubahnya menjadi energi mekanik. Baterai ini menerima energi listrik dari sumber energi listrik eksternal selama proses pengisian.

Motor listrik merupakan sumber energi mekanik atau tenaga penggerak pada kendaraan listrik. Energi mekanik ini diciptakan dengan mengubah secara elektromagnetik energi listrik yang tersimpan di dalam baterai. Motor listrik memiliki efisiensi konversi yang tinggi, kebisingan yang kecil, dan desain yang kompak [3]. Motor sinkron magnet permanen (PMSM), motor induksi, dan motor dc adalah beberapa jenis motor listrik yang digunakan pada mobil listrik. Gambar 2.1 menggambarkan komponen-komponen yang terdapat pada mobil listrik.



Gambar 2.1. Komponen-komponen mobil listrik

Sumber: <http://www.omazaki.co.id/komponen-mobil-listrik-dan-prinsip-kerjanya/>

*Battery Pack, Power Inverter, Controller* dan motor listrik adalah elemen utama dari mobil listrik, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. *Battery Charger, Transmission, DC/DC Converter, Battery Charger Port, thermal System,* dan *Auxiliary Battery* adalah beberapa bagian tambahan selain yang utama.

### 2.3 *Brushless Direct Current (BLDC) Motor*

*Brushless Direct Current* atau yang dikenal sebagai BLDC adalah motor yang kontrolernya disuplai oleh sumber daya DC. Gaya tarik menarik antara dua magnet dengan kutub yang berbeda atau gaya tolak menolak antara dua magnet dengan polaritas yang sama merupakan dasar pengoperasian motor BLDC. Untuk mengontrol putaran motor, motor BLDC menggunakan *hall* sensor, yaitu sensor yang dapat menemukan magnet atau menentukan letak rotor [12].

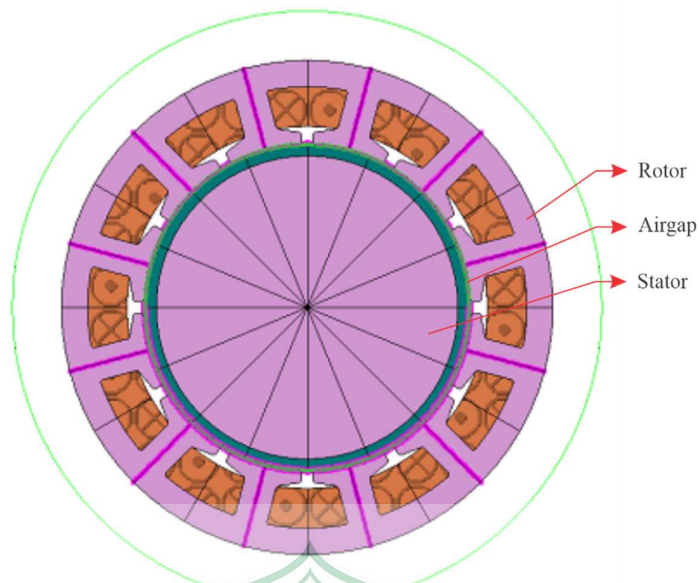
*Controller*, *driver*, dan *inverter* adalah tiga komponen motor BLDC yang paling krusial. Bagian ini mengontrol dan menggerakkan putaran motor. Mikrokontroler adalah bagian utama dari *controller*. Kumpulan MOSFET membentuk komponen inti *driver*, berfungsi sebagai *switching* motor BLDC. Untuk menyalakan *driver*, *inverter* mengubah listrik DC menjadi tegangan AC sebelum mengubahnya kembali menjadi tegangan DC. Konstruksi motor BLDC ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut ini [13].



Gambar 2.2. Struktur pada BLDC motor [13]

Selain itu konstruksi dari BLDC motor terdiri dari stator, rotor dan juga air gap. Berikut ini pada Gambar 2.3 merupakan bagian dari BLDC motor.

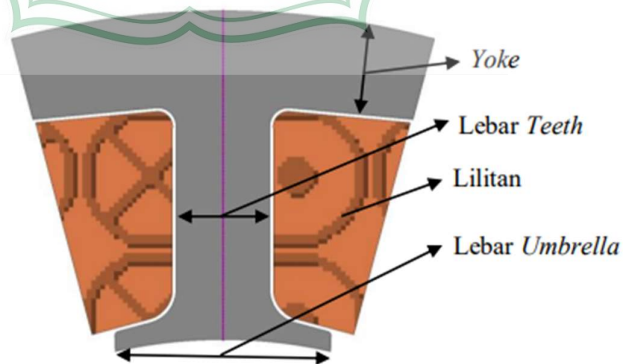




Gambar 2.3. Bagian-bagian pada BLDC motor

### 2.3.1 Stator

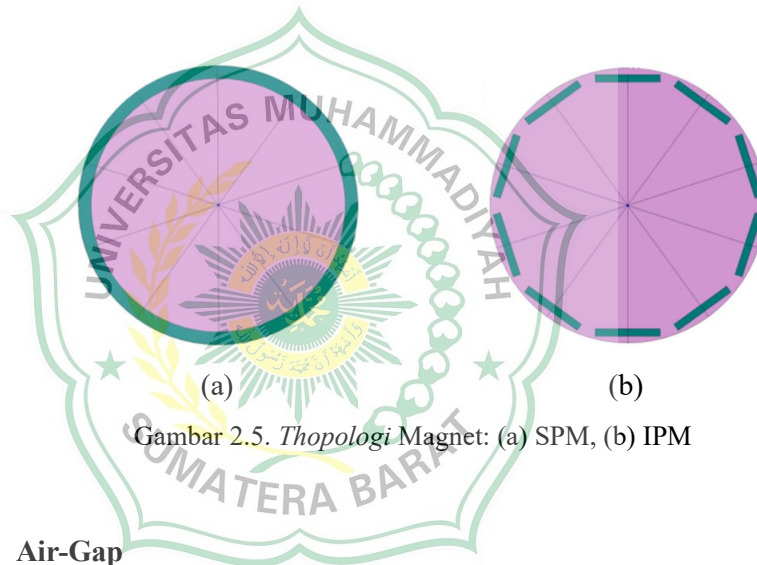
Salah satu komponen motor yang tidak bergerak adalah stator. Terdapat gerigi atau gigi pada arsitektur stator yang digunakan untuk melilitkan kawat atau konduktor tembaga. Pada stator, ruang antar gigi disebut *slot*. Gambar 2.4 menggambarkan struktur stator.



Gambar 2.4. Konstruksi Stator pada 1 Slot

### 2.3.2 Rotor

Komponen yang berputar adalah rotor. Bahan yang terbuat dari magnet permanen digunakan untuk komponen rotor. SPM (*Surface Permanent Magnet*) dan IPM (*Interior Permanent Magnet*) adalah dua *topologi* untuk memasang magnet permanen pada rotor. SPM akan memiliki tegangan induksi yang tinggi dibandingkan dengan *topologi* lainnya, sehingga sesuai untuk operasi kecepatan tinggi. IPM, di sisi lain, memiliki riak torsi minimal dan karena itu sesuai untuk pengoperasian mesin yang membutuhkan torsi kuat pada kecepatan rendah [14]. Pada Gambar 2.5, dua *topologi* ditampilkan.



Gambar 2.5. *Thopologi* Magnet: (a) SPM, (b) IPM

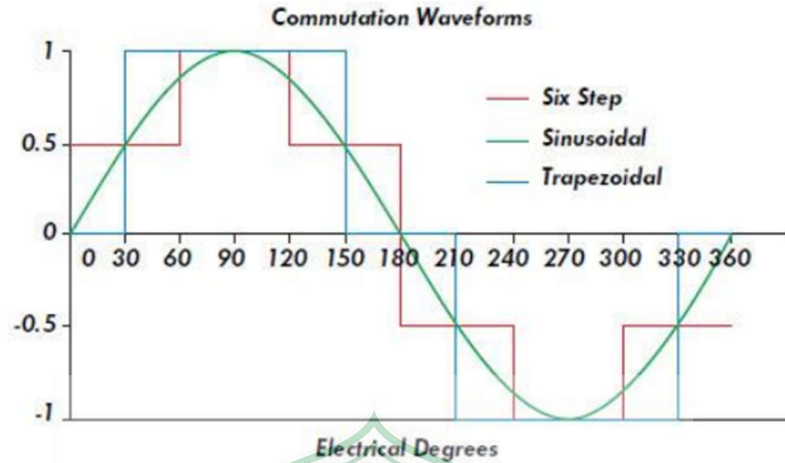
### 2.3.3 Air-Gap

Stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang disebut *Air-Gap*. Fluks magnet ditransfer dari rotor ke stator sepanjang celah udara. Celah udara juga mencegah stator dan rotor bergesekan satu sama lain selama rotasi. Performa motor akan dipengaruhi oleh luasnya celah udara.

## 2.4 Metode Komutasi *Six-Step*

Metode *six-step* dapat menghasilkan gelombang *square* atau *trapezoid* yang meniru gelombang *sinusoidal*. Metode *six-step* memiliki keuntungan sebagai salah satu cara paling sederhana dan paling mudah untuk mengoperasikan motor DC. Kelemahan *six-step* termasuk kerugian yang signifikan, kebisingan, arus besar, dan

torsi riak yang signifikan. Bentuk gelombang yang digunakan dalam metode *six-step* ditunjukkan pada Gambar 2.6 di bawah ini [15].



Gambar 2.6. Bentuk Gelombang Komutasi[15]

Gambar 2.6 mengilustrasikan penggunaan gelombang *six-step* dari PWM *square*, yang memiliki enam bagian yaitu dua positif, dua negatif, dan dua *floating* yang masing-masing membentuk segmen gelombang sinusoidal 60 derajat.

## 2.5 *Back*-EMF dan Konstanta *Back*-EMF ( $K_e$ ) pada BLDC Motor

Besarnya tegangan yang dihasilkan akibat adanya fluks medan magnet dikenal sebagai *back*-EMF. Jumlah lilitan, jari-jari motor atau generator, kekuatan medan magnet, kecepatan sudut, dan fluks penghubung semuanya dapat berdampak pada nilai *back*-EMF. Persamaan 2.7 dapat digunakan untuk menyatakan *back*-EMF dalam kaitannya dengan hukum Faraday [7]:

$$E = \omega_m \frac{d\Psi}{dt} \quad (2.1)$$

Dimana:

$E$  : *Back*-EMF (V)

$\Psi$  : Flux Magnet (T)

$t$  : Waktu (s)

$\omega_m$  : Kecepatan angular rotor (rad/s)

Angka yang akan mewakili keadaan mesin itu sendiri adalah konstanta *back-EMF*. Persamaan 2.8 dapat digunakan untuk menghitung nilai konstanta  $K_E$  [7]:

$$K_E = \frac{V_{dc}}{\omega_m} \quad (2.2)$$

Dimana:

$K_E$  : Konstanta *back-EMF*

$V_{dc}$  : Nilai tegangan DC rata-rata (V)

## 2.6 Baja Elektrik (Electrical Steels)

Generator listrik, motor, dan trafo semuanya membutuhkan lembaran baja dari jenis baja listrik. Karena mereka memiliki nilai rugi inti besi yang lebih rendah daripada baja standar, baja listrik lebih disukai sebagai bahan konstruksi motor. Baja listrik juga memiliki nilai permeabilitas material yang tinggi, sehingga efektif sebagai penghantar fluks pada inti besi [16].

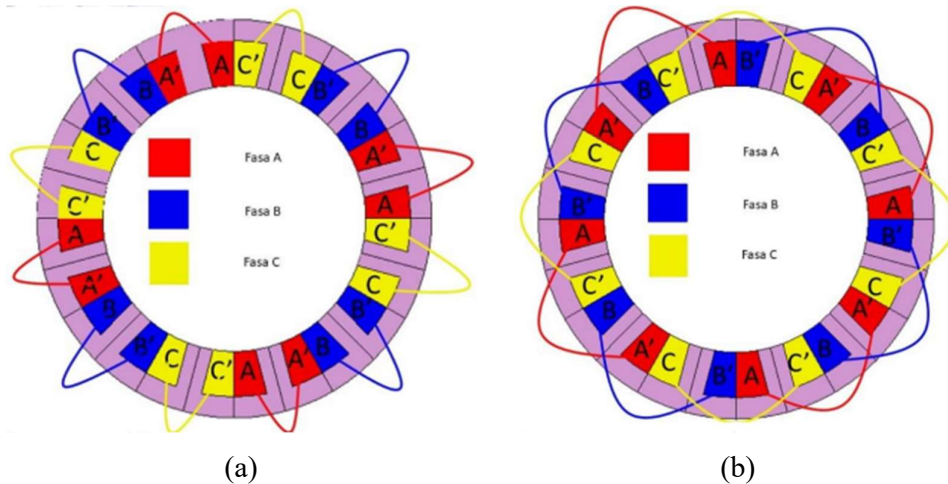
## 2.7 Magnet Permanent

Bahan magnet yang dapat menghasilkan medan magnet dengan besaran tetap tanpa perlu eksitasi lebih lanjut disebut magnet permanen. Motor listrik, generator, *speaker*, dan lainnya menggunakan magnet permanen. Magnet *neodymium* (NdFeb) adalah salah satu jenis magnet permanen terkuat [16].

## 2.8 Jenis Lilitan

Motor memiliki dua jenis lilitan yang berbeda yaitu *concentrated winding* dan *distributed winding*. Gambar 2.7 menggambarkan dua jenis belitan ini secara umum [17].





Gambar 2.7. Jenis Lilitan (a) *Concentrated Winding*, (b) *Distributed Winding* [17]

Gambar 2.7 mengilustrasikan bagaimana perbedaan kedua jenis dapat dibuat berdasarkan bagaimana kawat dililitkan di sekitar motor. Karena tembaga hanya digulung pada satu gigi dalam jenis *concentrated winding*, jenis ini mendapat manfaat dari kehilangan tembaga yang relatif rendah karena pendeknya konduktor yang digunakan. Sementara tipe *distributed winding* memiliki keuntungan transmisi panas yang lebih besar di *slot* karena tembaga dibungkus dengan cara terdistribusi di setiap *slot*, mengurangi kerugian terkait panas tambahan yang mungkin terjadi.

## 2.9 Derajat *Slot*, Derajat *Pole* dan Derajat Mekanik

Persamaan 2.3 dapat digunakan untuk menghitung derajat *slot*, yang merupakan sudut antara *slot* pada stator [13]:

$$\theta_s = \frac{(2 \cdot \pi)}{N_s} \quad (2.3)$$

Dimana:

$\theta_s$  : Besar sudut antar *slot*

$N_s$  : Jumlah *slot* pada stator

Jarak antara sudut kutub magnet pada rotor dikenal sebagai derajat pole (pole *degree*) dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 2.10 [13]:

$$\theta_p = \frac{(2 \cdot \pi)}{N_p} \quad (2.4)$$

Dimana:

$\theta_p$  : Besar sudut antar *magnet*

$N_p$  : Jumlah kutub magnet pada rotor

Derajat *electric* mengukur besarnya sudut yang dibuat oleh tegangan yang dihasilkan ketika coil diputar di antara medan magnet. 360 derajat listrik terkandung dalam satu putaran penuh. Tingkat mekanik, di sisi lain, mewakili sudut putaran kumparan berdasarkan jumlah pasangan kutub. Persamaan 2.11 dapat digunakan untuk menunjukkan bagaimana derajat *electric* dan mekanik berhubungan satu sama lain [18]:

$$\theta_m = \frac{\theta_e}{p} \quad (2.5)$$

Dimana:

$\theta_m$  : Derajat mekanik

$\theta_e$  : Derajat elektrik

$p$  : Jumlah pasang *pole*

## 2.10 Kombinasi Slot dan Pole

Hubungan antara *slot* dan *pole* secara signifikan mempengaruhi karakteristik motor. Torsi *cogging*, kecepatan konsekuensi, dan frekuensi semuanya dipengaruhi oleh pengaturan *slot* dan *pole*. Persamaan kombinasi slot dan pole adalah sebagai berikut pada persamaan 2.12 [18]:

$$N_p = \frac{120 f}{n} \quad (2.6)$$

Dimana:

$N_p$  : Jumlah pole

$f$  : Frekuensi (Hz)

$n$  : Kecepatan putaran motor (rpm)

Rekomendasi variasi *slot* dan *pole* motor 3 fasa ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dalam hal seberapa baik penurunan torsi *cogging* yang disebabkan oleh *slot* dan *pole*, daftar ini memberikan rincian singkat dari opsi potensial untuk *slot* dan *pole* motor.

Slots	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48
Poles	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
			6	8	10	6	8	8	6	8	8	6	8	8	6	8
			8	10		8	14	10	8	10	10	8	10	10	8	10
			12	18		12	16	16	10	20	14	10	14	14	10	14
						14		20	12	22	20	12	16	16	12	16
						16			18	26	22	14	26	26	14	20
									20		26	16	28	28	16	32
									22		28	22	32	32	20	34
									24			24	34	34	28	38
											26				30	40
											28				32	
											30				34	
											32				38	
															40	

Gambar 2.8. Kombinasi *slot* dan *pole* untuk motor 3 fasa [7]

### 2.11 Torsi Cogging

Interaksi antara magnet permanen dan inti besi ketika tidak ada arus yang mengalir, menciptakan gaya yang dikenal sebagai torsi *cogging*. Tujuan simulasi *cogging* adalah untuk menentukan karakteristik torsi *cogging* desain motor. Persamaan 2.13 dapat digunakan untuk menghitung prosedur simulasi ini, yang melibatkan rotasi bagian rotor ke derajat tertentu untuk menghasilkan 1 gelombang torsi *cogging* [19]:

$$\theta_{\lambda cog} = \frac{2\pi}{n_{kpk}} \quad (2.7)$$

Dimana:

$\theta_{\lambda cog}$  : Besar sudut rotor untuk satu gelombang *cogging* (°)

$n_{kpk}$  : Nilai kelipatan persekutuan terkecil antara jumlah *slot* dan *pole*

Selain itu, nilai *cogging* ditentukan menggunakan persamaan 2.14 untuk mendapatkan nilai *peak to peak* :

$$T_{cog} = T_{max} - T_{min} \quad (2.8)$$

Dimana:

$T_{cog}$  : Torsi *cogging* (N.m)

$T_{max}$  : Torsi *cogging* maksimum (N.m)

$T_{min}$  : Torsi *cogging* minimum (N.m)

## 2.12 FEM

FEM adalah teknik yang digunakan untuk mengatasi masalah perhitungan berbasis teori elektromagnetik. Pendekatan ini, juga dikenal sebagai teknik elemen hingga, memungkinkan masalah yang sifatnya tak terbatas untuk direpresentasikan dengan memecahnya menjadi sejumlah elemen diskrit yang terbatas. Dimungkinkan untuk menilai keefektifan desain elektromagnetik yang dibuat menggunakan FEM dan mengamati bagaimana medan elektromagnetik didistribusikan ke seluruh inti besi. Distribusi fluks magnet yang berasal dari magnet permanen dapat dipelajari dengan menggunakan pendekatan FEM [19]. Perhitungan akan lebih sederhana dan cepat jika dilakukan dengan perangkat lunak FEM daripada jika dilakukan secara manual. Persamaan Maxwell digunakan sebagai pendekatan dalam perangkat lunak desain elektromagnetik berbasis FEM ini untuk menemukan medan magnet dalam model. Persamaan Maxwell digunakan dalam perhitungan elektromagnetik dalam perangkat lunak desain elektromagnetik berbasis FEM dan diberikan dalam persamaan 2.15 dan 2.16 di bawah ini.



- Persamaan Ampere-Maxwell Law

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.9)$$

Dimana:

- $\vec{H}$  : Medan magnet (A/m)
- $\vec{j}$  : Kerapatan arus (A/m<sup>2</sup>)
- $\vec{D}$  : Medan listrik (C/m<sup>2</sup>)

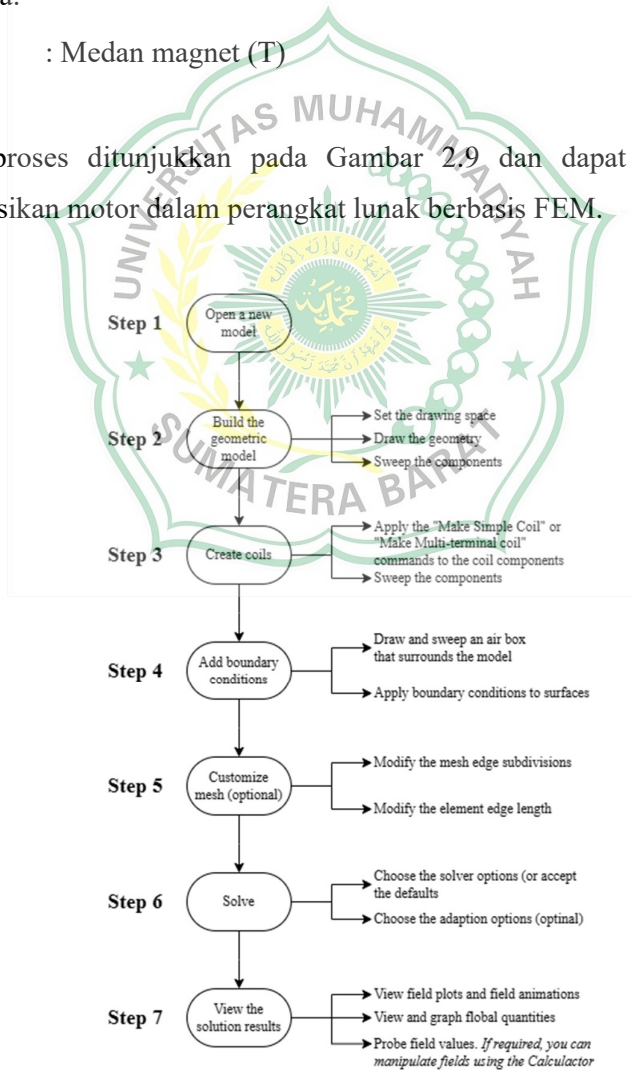
- Persamaan Gauss Magnetic Law

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (2.10)$$

Dimana:

- $\vec{B}$  : Medan magnet (T)

Alur proses ditunjukkan pada Gambar 2.9 dan dapat digunakan untuk mensimulasikan motor dalam perangkat lunak berbasis FEM.



Gambar 2.9. Flowchart Memodelkan Motor BLDC pada Software

Dalam FEM, objek yang berbentuk luasan (2D) atau volume (3D) dipecah menjadi elemen kecil (*mesh*), yang memiliki nilai batas dan nilai awal (sebagai hasil *trial and error*) pada perhitungan sebelumnya. Proses ini diulang beberapa kali (*iterasi*) untuk mendapatkan nilai yang mendekati presisi. Pemodelan CAD dari desain merupakan tahap pertama dalam proses FEM, dilanjutkan dengan pemberian komponen dan variasi ketebalan. Pendekatan FEA (*Finite Element Analysis*) kemudian diterapkan pada aplikasi untuk menentukan nilai akhir desain [10].

### 2.13 Sizing Tools

Alat ukuran tersedia di FEM untuk membuat proses desain lebih mudah dan lebih cepat. Desain asli model motor dapat diperoleh dengan cepat menggunakan fitur ukuran. Kemampuan otomatis ini sangat membantu untuk menetapkan tujuan masukan untuk persyaratan kinerja dan batasan desain motor. Dimensi model, posisi lilitan, spesifikasi kumparan fasa, dan informasi lain yang disediakan oleh fitur ini akan membantu pembuatan desain lengkap.



## BAB III KONSEP PERANCANGAN

### 3.1 Lokasi Penelitian

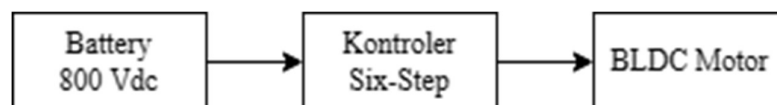
Pelaksanaan desain untuk penelitian ini akan dilakukan di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat. Penulis akan melakukan penelitian yang tertera pada Tabel 3. 1 sesuai dengan *timeline* berikut.

Tabel 3. 1. Jadwal penelitian

NO	KEGIATAN	November 2023				December 2023				January 2024			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Penentuan Tema												
2	Studi Pustaka												
3	Persiapan Proposal												
4	Penentuan Parameter												
5	Pemodelan BLDC												
6	Simulasi <i>winding</i>												
7	Simulasi <i>Back-EMF</i>												
8	Simulasi torsi <i>Cogging</i>												
9	Simulasi dengan kontroler <i>Six-Step</i>												
10	Pengolahan Data												
11	Validasi performa motor												
12	Penulisan laporan												

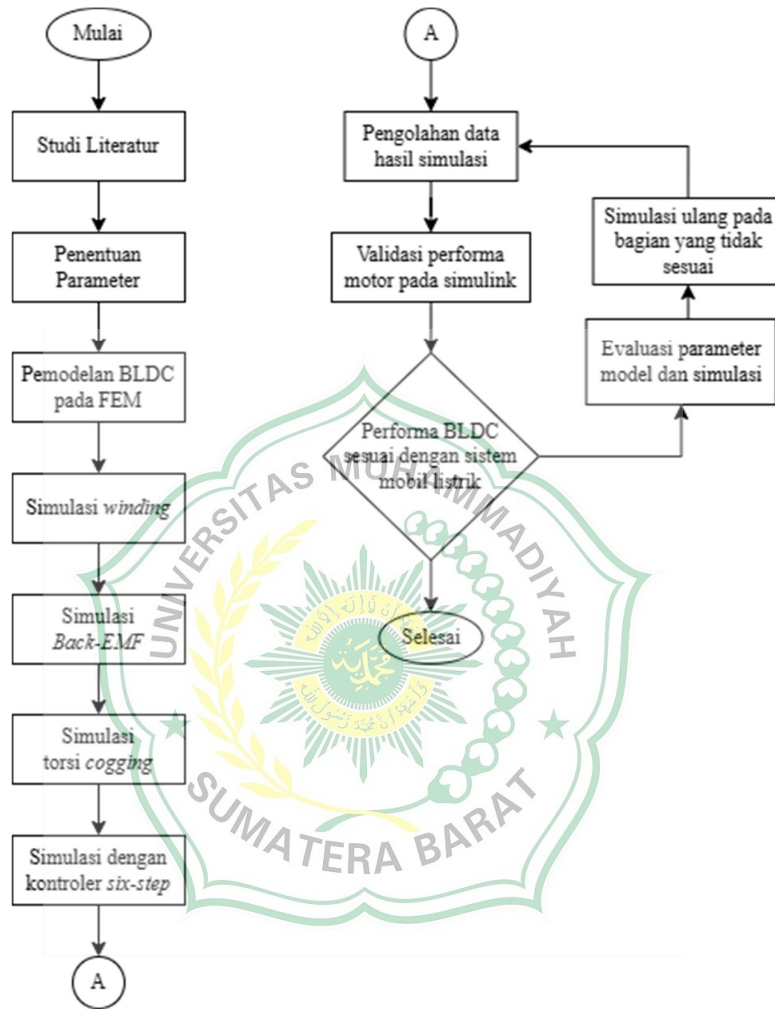
### 3.2 Diagram Alir Perancangan

Kerangka desain sistem ini didasarkan pada diagram alir desain sistem. Diagram alir sistem yang akan digunakan pada mobil listrik dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir sistem pada motor BLDC

Diagram alir untuk mengembangkan motor BLDC dapat digunakan untuk mengilustrasikan langkah-langkah yang terlibat dalam membuat satu untuk tugas akhir ini.



Gambar 3.2. Metode Pengerjaan Tugas Akhir

### 3.3 Spesifikasi Kendaraan

Jenis mobil yang akan digunakan sebagai dalam penelitian ini adalah mobil sedan. Adapun spesifikasi mobilnya sebelum dilakukan konversi adalah sebagai berikut:

Tabel 3.2. Spesifikasi kendaraan [20]

<b>SPESIFIKASI MOBIL</b>	
<i>Engine Type – Number of clinders</i>	: Inline 4
<i>Engine Code</i>	: D16Z6
<i>Fuel Type</i>	: Petrol
<i>Fuel System</i>	: MPI – Honda PGM-FI
<i>Engine Alignment</i>	: Transverse
<i>Engine Position</i>	: Front
<i>Engine Size – Diplacement – Engine capacity</i>	: 1590 cm <sup>3</sup> / 97 cu-in
<i>Bore x Stroke</i>	: 75.0 x 90.0 mm
<i>Number of valves</i>	: 16 Valves
<i>Compression Ratio</i>	: 9.2
<i>Maximum Power Output – Horsepower</i>	: 125 PS / 123 HP / 92 kW @ 6500 rpm
<i>Maximum Torque</i>	: 142 Nm @ 5200 rpm
<i>Drive wheels – Traction – Drivetrain</i>	: FWD
<i>Transmission Gearbox – Number of speeds</i>	: 5 speed Manual
<i>Wheelbase</i>	: 257.0 cm
<i>Length</i>	: 408.0 cm
<i>Width</i>	: 170.0 cm
<i>Height</i>	: 134.0 cm
<i>Crub Weight</i>	: 985 Kg
<i>Weight-Power Output Ratio</i>	: 7.9 kg/hp
<i>Trunk/Boot capacity</i>	: From 190 L

Sumber : <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Honda/7875/Honda-Civic-V-3d-16-ESi.html>

Dari spesifikasi diatas, berikut ini adalah kesimpulan yang menjadi pedoman dalam proses perancangan motor BLDC.



Tabel 3.3. Spesifikasi Minimum Kebutuhan Perancangan Motor BLDC

No.	Indikator	Keterangan
1	Daya minimum	92 kW
2	Kecepatan	6.500 rpm
3	Torsi	142 Nm

Tabel 3.3 memperlihatkan nilai kriteria desain yang akan digunakan sebagai pedoman dalam desain yang akan dieksekusi dalam keadaan ideal. Kecepatan rendah dan torsi tinggi akan menjadi fitur desain motor yang akan dibuat. Oleh karena itu, pada kecepatan 5.600 rpm dan torsi 142 N.m adalah peringkat kecepatan dan nilai torsi yang diinginkan untuk parameter desain motor.

### 3.4 Pemodelan BLDC Motor dengan FEM

Untuk mensimulasikan motor BLDC menggunakan FEM, model geometri BLDC terlebih dahulu harus dibuat dengan menentukan *slot*, *pole*, dan derajat mekanik menggunakan persamaan 2.3–2.5.

1. Menentukan derajat *slot*

$$\theta_s = \frac{(2.\pi)}{N_s}$$

Dimana :

$$N_s : 21$$

Maka :

$$\theta_s = \frac{(2.\pi)}{21}$$

$$\theta_s = 17,14^\circ$$

2. Menentukan derajat *pole*

$$\theta_s = \frac{(2.\pi)}{N_p}$$

Dimana :

$$N_p : 10$$

Maka,

$$\theta_p = \frac{(2.\pi)}{10}$$

$$\theta_p = 36^\circ$$

### 3. Menentukan derajat mekanik

$$\theta_m = \frac{\theta_e}{p}$$

Dimana :

$$\theta_e : 360^\circ$$

$$p : 5$$

Maka :

$$\theta_m = \frac{360^\circ}{4}$$

$$\theta_p = 72^\circ$$

Ukuran komponen motor ditentukan secara *trial and error* untuk mengetahui persyaratan model motor BLDC. Dengan menyesuaikan *slot* dan *pole*, serta geometri stator, rotor, dan magnet pada motor, dilakukan *trial and error*. Nilai *back-EMF*, bentuk gelombang *back-EMF*, nilai torsi, dan efisiensi motor adalah hasil dari modifikasi *trial and error*.

Spesifikasi berikut yang ditunjukkan pada Tabel 3.4 adalah yang digunakan dalam model motor BLDC setelah *trial and error* digunakan untuk menetapkan ukuran komponen motor.

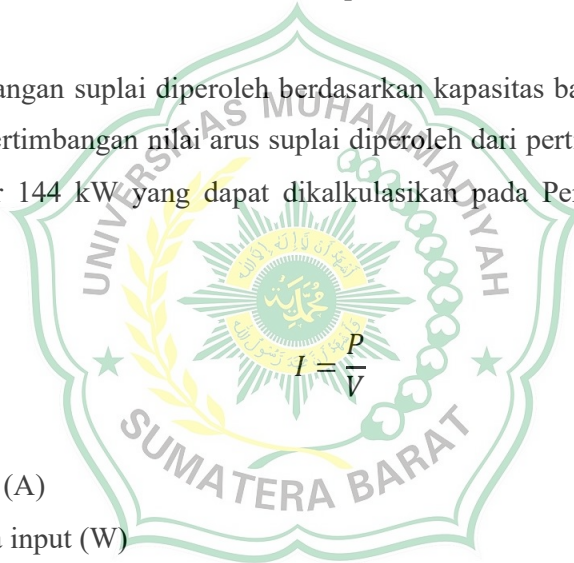
Tabel 3.4. Spesifikasi model BLDC motor

<b><i>Supply Voltage</i></b>	800 Vdc
<b><i>Rated Current</i></b>	180 A
<b><i>Slot/Poles</i></b>	21S10P
<b><i>ST-OD/ID</i></b>	320 mm / 195,4 mm
<b><i>RT-OD</i></b>	192 mm
<b><i>AirGap</i></b>	1,7 mm
<b><i>Stator Stack Length</i></b>	182 mm
<b><i>Rotor Stack Length</i></b>	182 mm

<b><i>Magnet Length</i></b>	182 mm
<b><i>Core Material</i></b>	M-19 29 Ga
<b><i>Magnet Material</i></b>	N52
<b><i>Coil Material</i></b>	Copper : 100% IACS
<b><i>Magnet Thopology</i></b>	IPM <i>with variable orientation magnets</i>
<b><i>Coil Specs</i></b>	2,5 mm / 23 <i>paralel</i> / 3 <i>trun</i>
<b><i>Coil Connections</i></b>	Wye ( <i>Star</i> )

Nilai tegangan suplai dihitung menggunakan kapasitas baterai 800 Vdc. Saat mempertimbangkan daya masukan sasaran sebesar 144 kW, yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.1, nilai arus suplai ditentukan.

Nilai tegangan suplai diperoleh berdasarkan kapasitas baterai yaitu 800 Vdc. Sedangkan pertimbangan nilai arus suplai diperoleh dari pertimbangan daya *input* target sebesar 144 kW yang dapat dikalkulasikan pada Persamaan 3.1 sebagai berikut.



$$I = \frac{P}{V}$$

(3.1)

Dimana:

$I$  : Arus (A)

$P$  : Daya input (W)

$V$  : Tegangan input (V)

Maka:

$$I = \frac{144.000}{800}$$

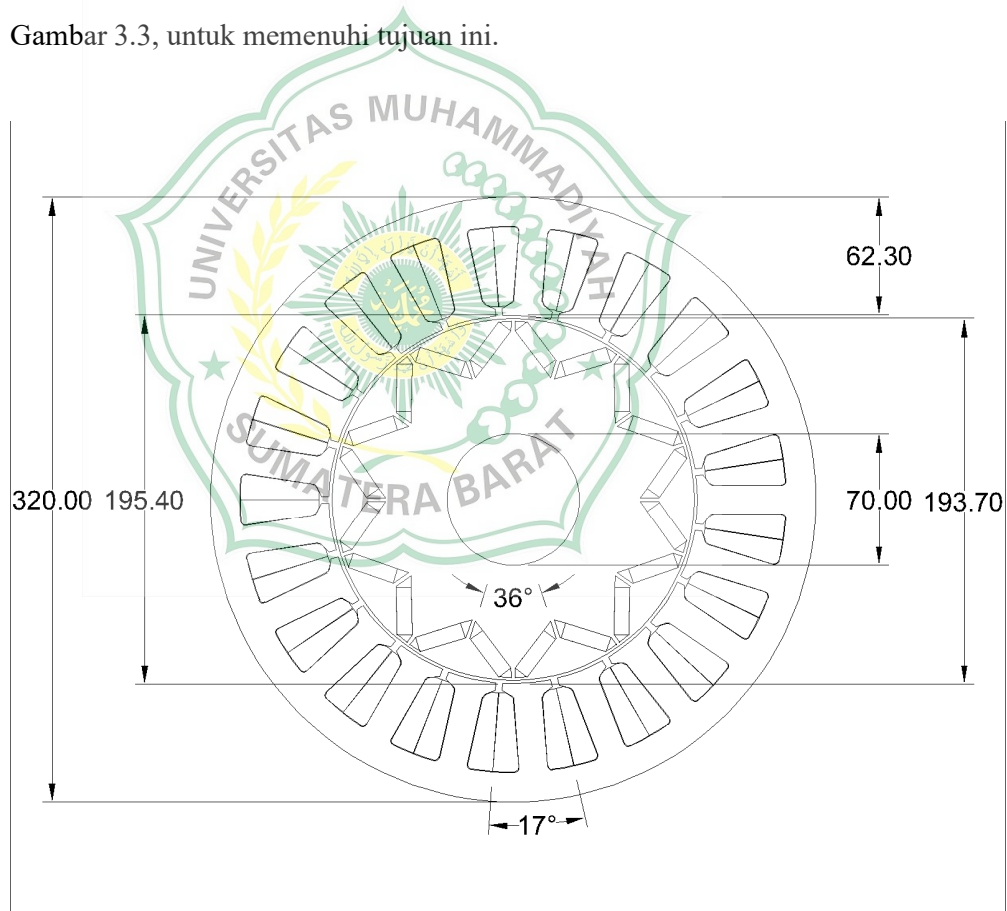
$$I = 180 A$$

Menggunakan temuan perhitungan saat ini, arus *impost* 180A dianggap cukup untuk memenuhi spesifikasi daya *input*. Selain itu, konduktor melingkar memiliki luas penampang 2,5 mm<sup>2</sup> dan total 23 paralel, yang memungkinkan pertimbangan arus 460 A. Arus 26A dapat ditransmisikan rata-rata ketika luas masing-masing penampang adalah 2,5 mm<sup>2</sup>.

Pemodelan motor BLDC dapat dipecah menjadi 7 fase dengan menggunakan diagram alir motor pada Gambar 2.9 sebagai panduan. Proses pemodelan terdiri dari langkah-langkah berikut 2 sampai 5.

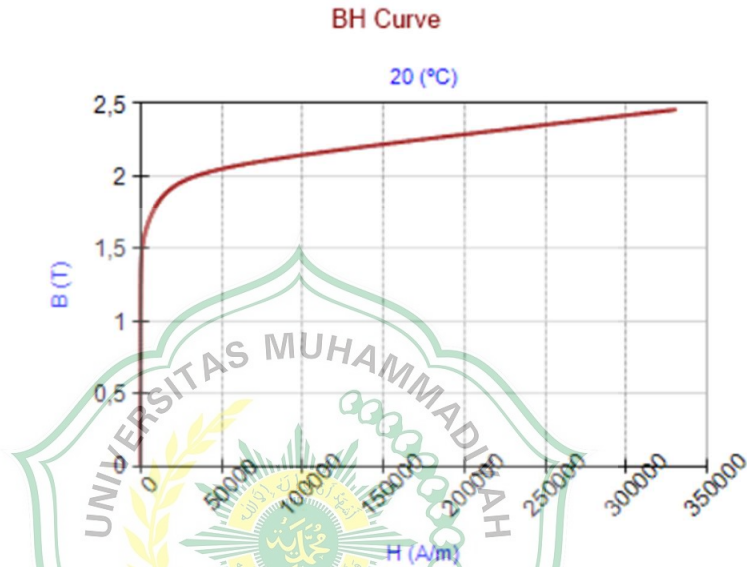
### 3.4.1 Membuat Model Geometri Motor BLDC

Varian model 21 *slot* dan 10 *pole* dipilih karena variasi *slot* berukuran  $17.14^\circ$ , sehingga sesuai dengan ukuran motor yang dikonstruksi, dan setiap *slot* secara mekanis berukuran  $90^\circ$ . Motor harus memiliki ukuran yang kecil, ukuran magnet yang kecil, lilitan yang cukup, tenaga yang cukup, dan kinerja terbaik saat sedang dirancang. Model kutub 21 *slot* 8 *pole* dapat menghasilkan kinerja yang disimulasikan dalam FEM, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.3, untuk memenuhi tujuan ini.



Gambar 3.3. Bentuk Geometri dari BLDC Motor 21 *Slot* 10 *Pole*

Komponen akan ditetapkan ke geometri motor setelah selesainya desain geometri Motor BLDC. *Electrical steels* dipilih sebagai material inti besi pada model ini dengan kriteria *Non-Oriented AISI Silicon Steel M-19 29 Ga* untuk produksi komponen inti besi. Bahan ini setebal 0,36 mm dan memenuhi standar IEC 60404-8-4.

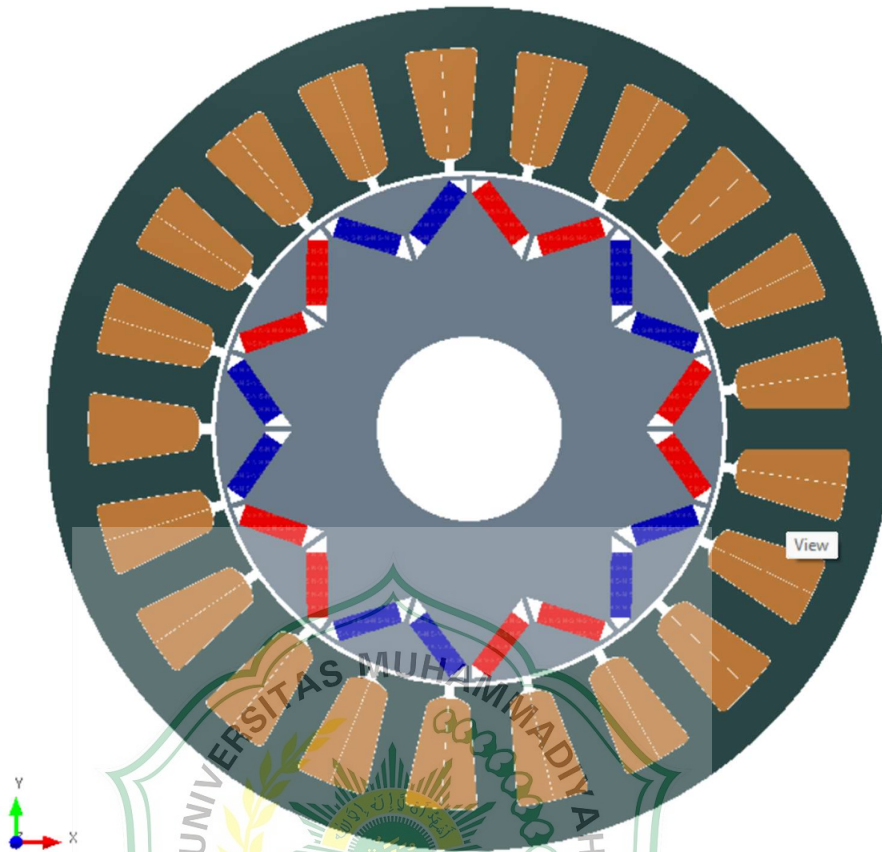


Gambar 3.4. Kurva B-H Material M-19 29 Ga

Korelasi antara kerapatan fluks magnet (B) dan kuat medan magnet (H) pada material M-19 29 Ga ditunjukkan pada Gambar 3.4. Agar nilai kerapatan fluks magnet mencapai titik jenuhnya, diperlukan kuat medan magnet yang lebih besar semakin rapat nilai fluks magnetnya. Ketika kerapatan fluks magnet mencapai titik jenuh, kerapatan fluks magnet tidak meningkat secara berarti ketika kekuatan medan magnet meningkat. Kerapatan fluks magnetik material M-19 29 Ga mencapai saturasi pada nilai 2 T.

Bahan tembaga dengan peringkat konduktivitas 100% digunakan di bagian koil. Tahapan selanjutnya adalah penambahan komponen pada motor setelah memilih material untuk desain motor BLDC. Gambar 3.5 menggambarkan total arsitektur motor BLDC dengan komponen-komponennya.

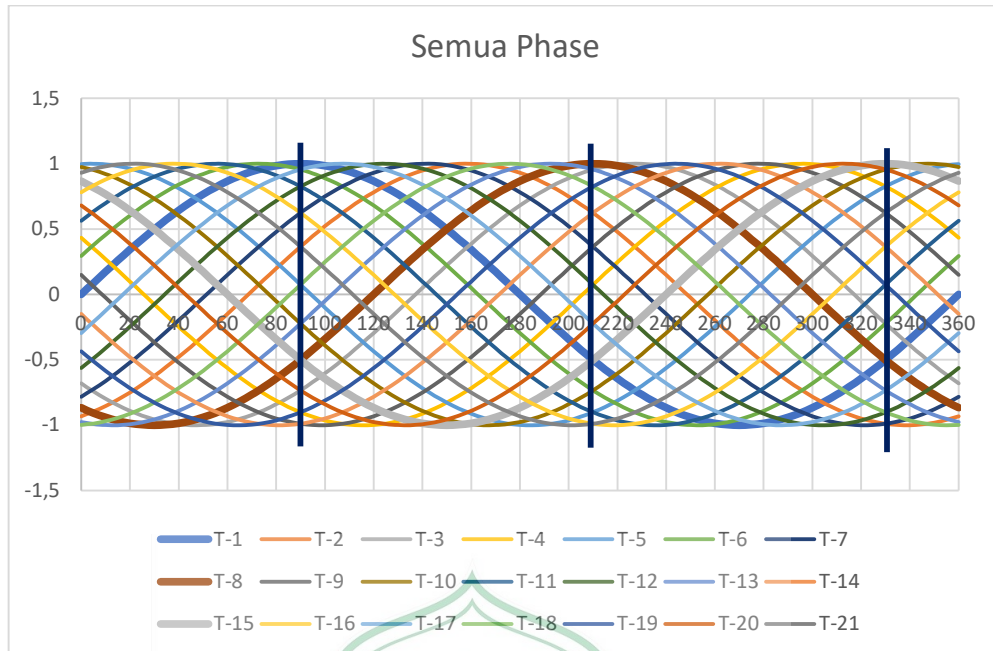




Gambar 3.5. Desain Motor BLDC 21 Slot 10 Pole yang Telah Diberikan Komponen

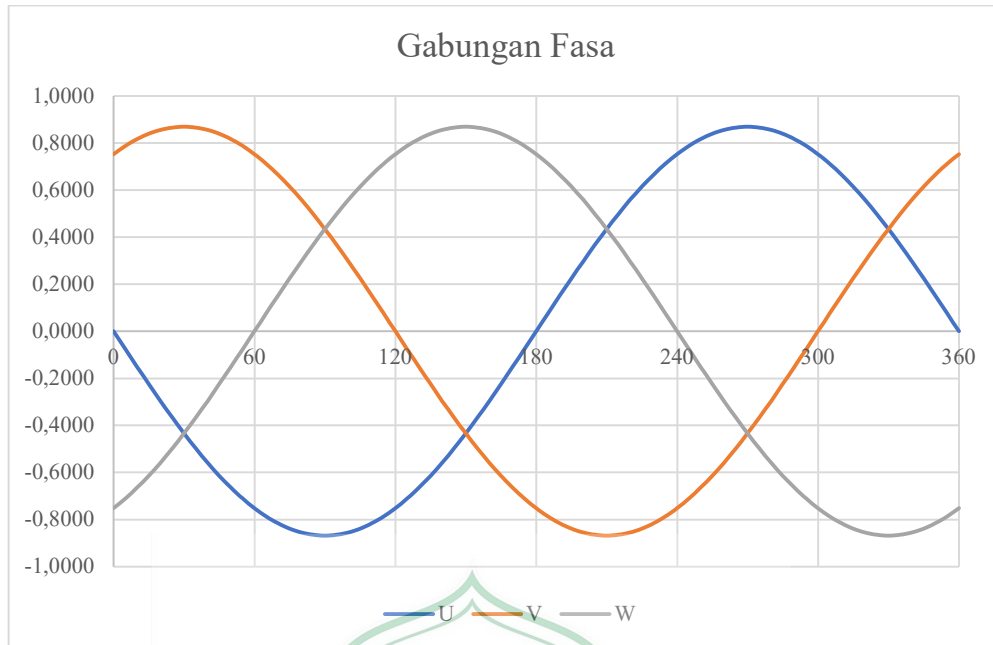
### 3.4.2 Membuat *Winding* pada Model Motor BLDC

Setelah mendapatkan model motor, simulasi lilitan dilakukan dengan tujuan menghubungkan setiap bagian motor BLDC untuk menghasilkan keluaran listrik 3 fasa. *Distributed winding* adalah teknik lilitan yang digunakan. Perangkat lunak pengolah data digunakan untuk menghitung koneksi antar kumparan. Setiap kumparan dibangun menyerupai gelombang sinusoidal dengan perbedaan fasa stator  $17,14^\circ$ . Setiap gelombang kumparan dicatat pada sumbu y, setelah itu setiap pasangan kumparan diidentifikasi. Dimana setiap fase mencakup empat kumparan yang berorientasi CW (Counter Wise) dan CCW (Counter Clock Wise). Gambar 3.6 menunjukkan bagaimana posisi kumparan pada stator ditentukan.



Gambar 3.6. Simulasi Konfigurasi Lilitan Stator 21 Slot pada *Software* Pengolah Data

Sambungan kumparan pada setiap fasa dapat ditentukan dengan menggunakan Gambar 3.6. Berdasarkan bentuk gelombang sinusoidal 3 fasa, yaitu fasa R (T-1), fasa S (T-8) dan fasa T (T-15), sambungan kumparan fasa primer R, S, dan T diidentifikasi. Sedangkan kedekatan gelombang pada fasa utama digunakan untuk mengidentifikasi kumparan seri pada satu fasa. Ketika sampel fase R dikumpulkan di dekat gelombang T-6 dan T-7. Empat kumparan berikut, T-14, T-9, T-19, dan T-4, kemudian dipilih dari gelombang yang berlawanan pada T-1, T-6, dan T-7. Gambar 3.7 menampilkan hasil bentuk gelombang satu fasa, dan Tabel 3.5 merangkum hubungan antar kumparan.



Gambar 3.7. Hubungan Kumparan Fasa R pada *Software* Pengolah Data

Tabel 3.5. Hubungan kumparan pada masing-masing fasa

Arah Kumparan	Fasa		
	R	S	T
CW	T-1, T-6, T-17	T-8, T-13, T-3	T-15, T-20, T-10
CCW	T-14, T-9, T-19, T-4	T-21, T-16, T-5, T-11	T-7, T-2, T-12-, T-18

Jumlah lilitan untuk setiap fasa koil dihitung setelah sambungan koil untuk setiap fasa dibuat. Diameter konduktor koil dan faktor ruang kawat di lubang *slot* harus diperhitungkan saat menentukan lilitan. 30–50% adalah faktor pengisian lubang slot atau faktor ruang kabel [8]. Kerapatan arus maksimum konduktor adalah  $6 \text{ A/mm}^2$ . Sebuah konduktor dengan 23 paralel dan luas penampang  $2,5 \text{ mm}^2$  digunakan untuk mengalirkan arus 180A. Penggunaan yang meluas dari penampang konduktor besar ini juga mempertimbangkan fakta bahwa penggulangan kabel masih dilakukan dengan tangan dan konduktor dapat dengan mudah dibentuk dan diatur

selanjutnya. Persamaan 3.2 dapat digunakan untuk menentukan diameter konduktor kumparan berdasarkan luas penampang konduktor.

$$A = \pi r^2 \quad (3.2)$$

Dimana :

$A$  : Luas penampang konduktor ( $\text{mm}^2$ )

$r$  : Jari-jari konduktor (mm)

Maka :

$$r = \sqrt{\frac{2,5}{\pi}}$$

$$r = 0,8923 \text{ mm}$$

$$d = 1,7846 \text{ mm}$$

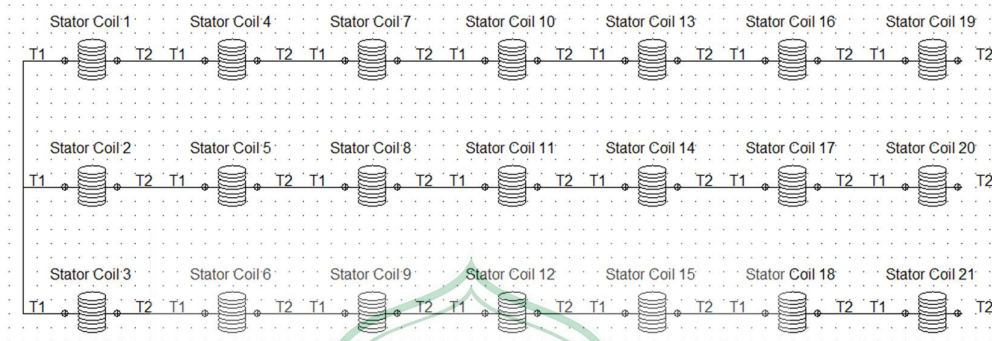
Hasil simulasi berdasarkan variasi faktor jarak kawat dan jumlah lilitan, yang keduanya dipengaruhi oleh diameter konduktor kumparan pada stator 21 slot ditunjukkan pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6. Faktor Ruang Kawat pada Lilitan Stator

Jumlah Lilitan	Faktor Ruang Kawat
1	13,07%
2	26,14%
3	39,21%
4	52,58%
5	65,35%
6	78,42%
7	91,449%
8	104,6%

Berdasarkan temuan simulasi pada Tabel 3.6, 2 lilitan (39,21%) adalah jumlah maksimal lilitan yang dapat dilakukan di setiap celah untuk memenuhi faktor ruang kawat 30–50%. Pembatasan proses penggulangan yang masih dilakukan dengan tangan, dan pengaruh isolator keduanya akan berdampak

pada nilai faktor ruang kawat. Jadi, ketika jumlah lilitan ditentukan, simulasi FEM dari desain lilitan dijalankan. Dengan menggabungkan semua kumparan dalam konfigurasi Y dan membuat seri 7 pada setiap fasa sesuai dengan Tabel 3.5, simulasi pada 21 *slot* telah selesai. Gambar 3.8 dapat berfungsi sebagai representasi dari susunan kumparan.

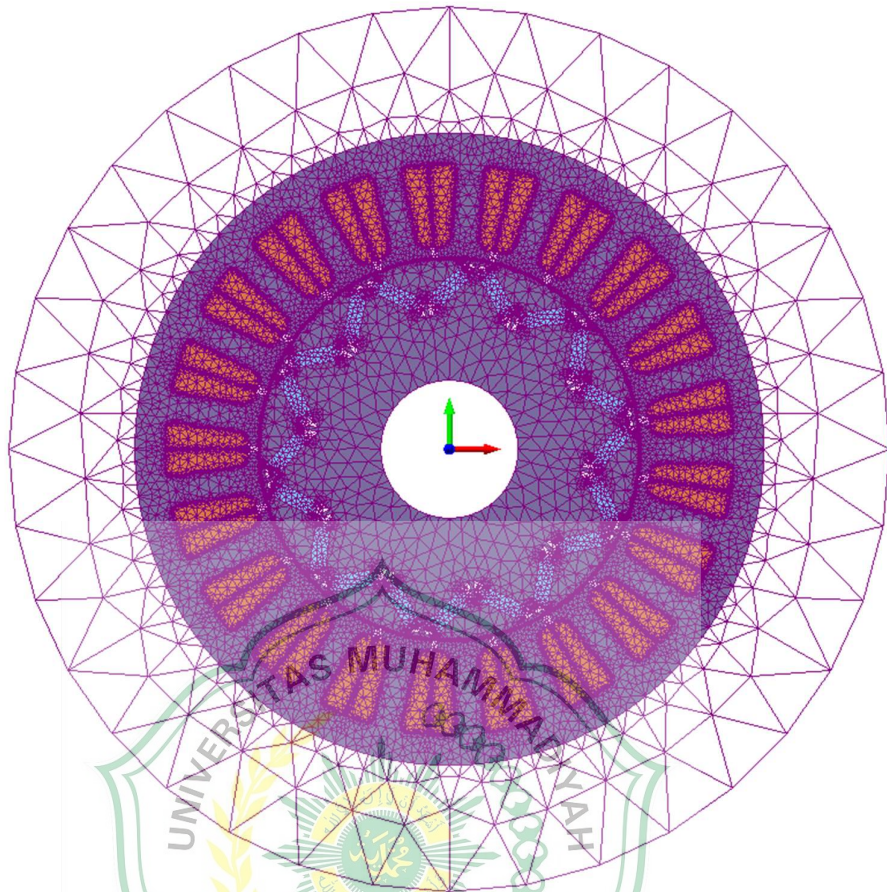


Gambar 3.8. Konfigurasi Antar Kumparan

### 3.4.3 Menambahkan *Boundary Conditions* dan *Mesh* pada Model Motor BLDC

Kondisi batasan (*boundary condition*) desain model harus ditentukan sebelum melakukan perhitungan atau *solving* dalam perangkat lunak. Pada permukaan model, kondisi batas ditentukan yang berfungsi sebagai batas luar model. Udara yang membentuk batas luar ini disebut sebagai *air box*, dan ukurannya harus lebih besar dari elektromagnetik. *Mesh* dalam model harus ditentukan selain batasan. Untuk tujuan perhitungan, jaring model dipecah menjadi potongan segitiga kecil. Presisi perhitungan yang diinginkan menentukan ukuran *mesh*. *Mesh* yang terlihat pada model motor BLDC adalah *automatic mesh* yang dibuat oleh program. Model motor BLDC dengan *boundary* dan *mesh* ditunjukkan pada Gambar 3.9.





Gambar 3.9. *Boundary Condition* dan *Mesh* pada Desain Motor BLDC

### 3.5 Peralatan dan Bahan

Berikut ini adalah alat dan bahan yang digunakan dalam proyek penelitian akhir, "Perancangan Motor Brushless Direct Current (BLDC) untuk Konversi Kendaraan Berbahan Bakar Fosil Menjadi Kendaraan Listrik":

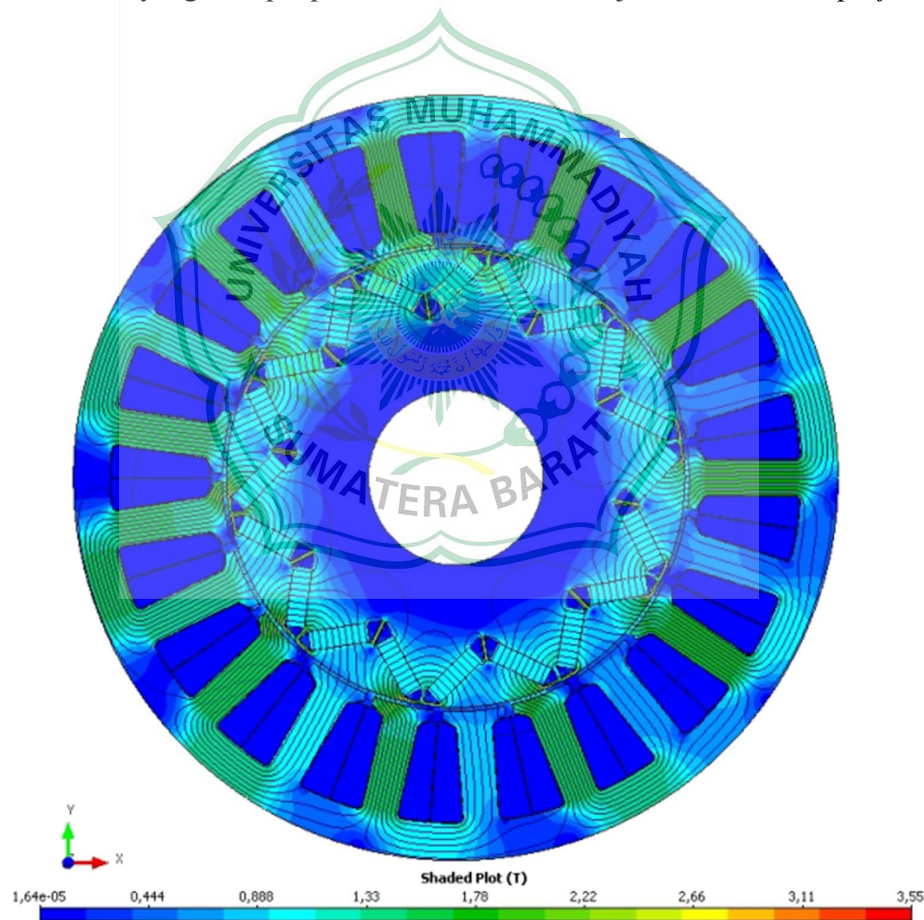
1. Laptop.
2. *Software* FEM.
3. *Software* CAD.
4. *Software* Simulink.
5. *Software* pengolahan data.

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis Pemodelan Desain

Setelah melalui tahap desain dan menentukan material dan spesifikasi pada motor, tahap selanjutnya adalah mengamati distribusi aliran *flux* pada desain motor BLDC. Tujuan dari pengamatan ini adalah menganalisis proses pendistribusian medan magnet pada tiap komponen. Distribusi aliran *flux* pada model motor BLDC 21 Slot 10 Pole dapat dilihat pada Gambar 4.1. Dimana garis-garis pada inti besi merupakan garis aliran *flux* magnet yang dinyatakan pada satuan Tesla, sedangkan warna-warna yang terdapat pada model motor menunjukkan intensitas rapat *flux*.

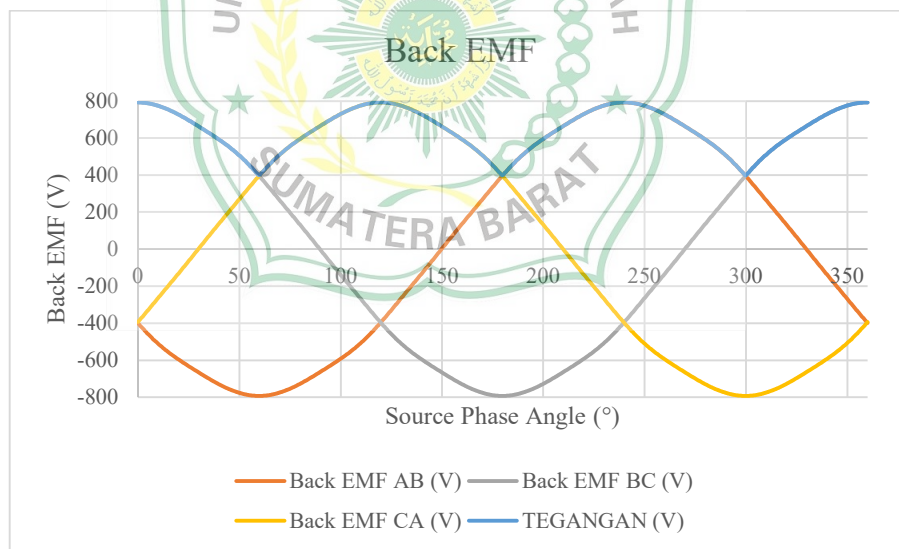


Gambar 4.1. Distribusi Aliran Flux pada Desain Motor BLDC 21 Slot 10 Pole

Dari hasil proses desain pada Gambar 3.3 dan pemberian komponen pada Gambar 3.5 diperoleh hasil simulasi berupa distribusi aliran *flux* pada Gambar 4.1. Berdasarkan data pada Gambar 4.1 diperoleh nilai *flux density* pada teeth sebesar 1,81 T. berdasarkan kurva saturasi bahan inti stator pada gambar Gambar 3.4 diperoleh titik nilai saturasi sebesar 2 T. Jika dibandingkan hasil *flux density* pada hasil simulasi dan nilai saturasi bahan, maka nilai hasil simulasi tidak melebihi dari nilai saturasi bahan. Sehingga aliran *flux* pada stator dikatakan cukup untuk memenuhi nilai *back-EMF* sebesar 800 V.

#### 4.2 Analisis *Back-EMF* dan Konstanta *Back-EMF* pada Motor BLDC

Simulasi *back-EMF* pada FEM bertujuan untuk memperoleh karakteristik dan konstanta *back-EMF*. Bentuk gelombang *back-EMF* ditentukan pada desain magnet, geometri motor dan distribusi kumparan stator. Pada simulasi ini rotor diputar pada kecepatan rating, yaitu 6500 RPM atau 680,678408 rad/s lalu diperoleh nilai *back-EMF* saat kondisi tanpa beban pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Gelombang *Back-EMF* pada Kecepatan Putar Motor 7.300 Rpm

Berdasarkan data pada Gambar 4.2, selanjutnya dengan menggunakan *software* pengolahan data diperoleh nilai puncak *back-EMF* antar fasa adalah 792,4291 V, sedangkan *back-EMF* dc diperoleh dari nilai masing-masing *back-EMF* antar fasa

yang di absolutkan. Nilai *back*-EMF antar fasa yang di absolutkan akan membentuk gelombang seolah-olah berupa gelombang tegangan dc. Maka nilai rata-rata *back*-EMF dc diperoleh sebesar 792,4291 V. Selanjutnya untuk memperoleh nilai konstanta *back*-EMF maka dilakukan kalkulasi dengan menggunakan Persamaan 2.8.

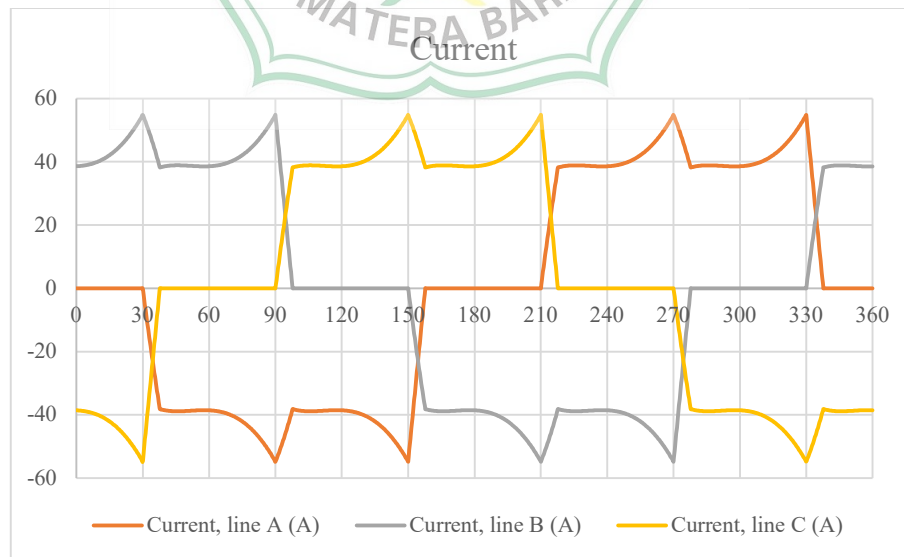
$$K_E = \frac{V_{dc}}{\omega_m}$$

$$K_E = \frac{792,491 V}{680,678408 rad/s}$$

$$K_E = 1,164266$$

### 4.3 Analisis Performa Motor BLDC dengan Kondisi Tanpa Beban

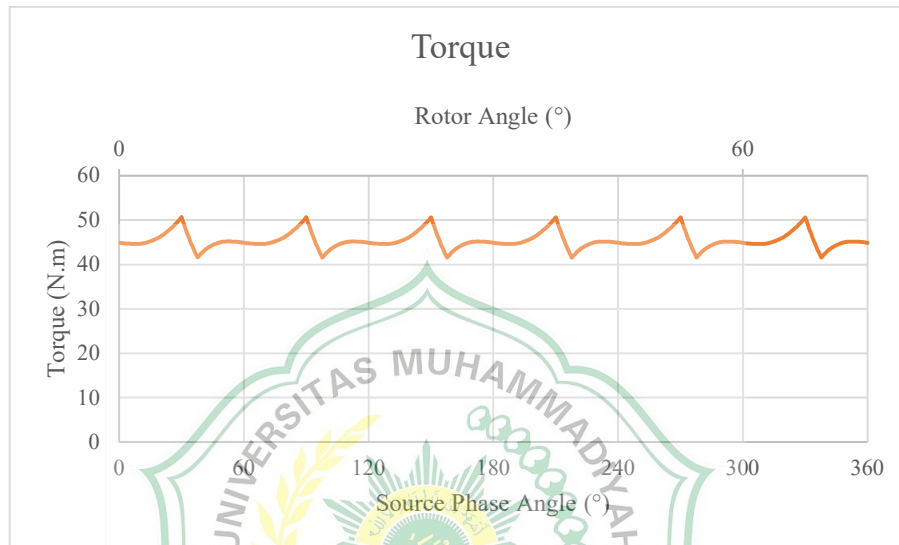
Metode yang digunakan pada motor BLDC ini adalah metode *six-step*, dimana pada metode ini motor BLDC diberikan arus dengan bentuk gelombang *six-step*. Tujuan dari penggunaan metode *six-step* adalah metode ini mampu menghasilkan gelombang trapezoid atau *square* yang akan menyerupai gelombang sinusoidal. Gelombang *six-step* ini menggunakan PWM *square* yang terdiri dari 6 bagian, yaitu 2 positif, 2 negatif dan 2 *floating* yang masing-masing membentuk bagian sebesar 60 derajat gelombang sinusoidal. Berikut ini pada Gambar 4.3 merupakan bentuk gelombang arus *six-step* yang diberikan pada motor BLDC.



Gambar 4.3. Gelombang Arus Six-Step pada Motor BLDC



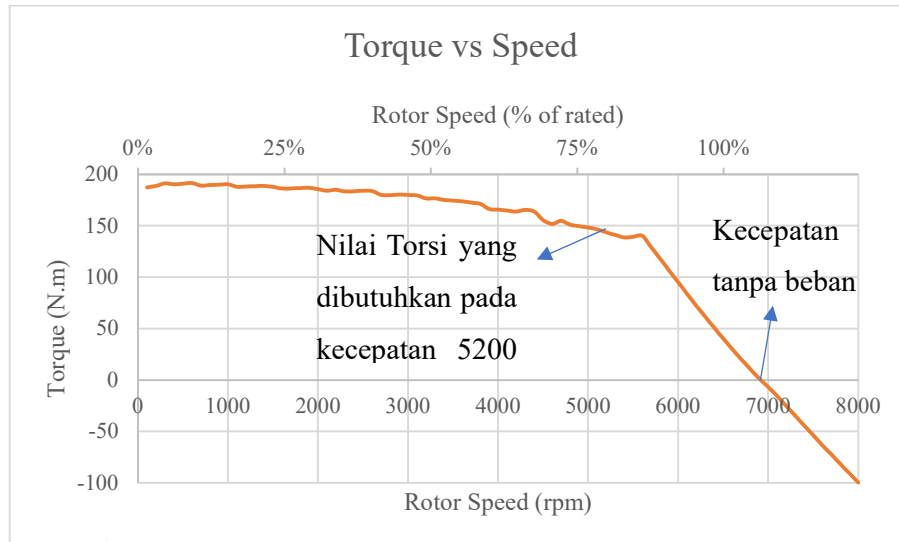
Berdasarkan data pada Gambar 4.3 diperoleh nilai arus puncak yang diberikan pada motor sebesar 54,82183A. Komutasi *six-step* ini diperoleh berdasarkan posisi dari sensor *hall*. Sensor *hall* bekerja dengan cara mendeteksi adanya medan magnet pada motor. Setelah diketahui gelombang arus, maka selanjutnya diperoleh gelombang torsi motor BLDC ketika rotor 360° elektrik pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Gelombang Torsi pada Motor BLDC

Berdasarkan data pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai torsi motor pada saat motor diputar dengan kecepatan 100% atau sebesar 6500 rpm diperoleh nilai maksimum sebesar 50,64765 N.m dan nilai minimum sebesar 41,54839 N.m. bentuk gelombang torsi diakibatkan adanya *ripple* torsi yang diperoleh sebesar 9,099268 N.m. Torsi *ripple* pada motor BLDC idelanya adalah nol. Torsi *ripple* disebabkan dari sisi motor atau suplai motor. Pada sisi motor diakibatkan oleh torsi *cogging*, harmonisa medan torsi elektrik dan lain-lainnya. Sedangkan dari sisi suplai dapat diakibatkan oleh harmonisa arus pada output inverter, pergantian pada pemberian arus fasa, *ripple* arus akibat dari *switching* frekuensi yang tinggi dan lain-lain. Nilai torsi yang diperoleh pada motor sangat berkaitan dengan nilai kecepatan motor. Dimana karakteristik dan range pada motor dapat dilihat dari hubungan antara torsi terhadap kecepatan motor. Dari hasil simulasi variasi kecepatan motor dapat diperoleh kurva torsi vs kecepatan pada Gambar 4.5.





Gambar 4.5. Kurva Torsi Terhadap Kecepatan pada Motor BLDC

Kurva torsi vs kecepatan berfungsi untuk mengetahui karakteristik perubahan torsi terhadap beban pada kecepatan. Berdasarkan data pada Gambar 4.5 diperoleh karakteristik kecepatan dan torsi pada desain motor. Proses pengambilan data torsi terhadap kecepatan diperoleh berdasarkan variasi kecepatan putaran rotor secara bertahap dari kecepatan 0 hingga 8.000 rpm.

Dari kurva ini dapat menunjukkan hubungan antara motor dan generator, saat *starting* kecepatan nol sampai kecepatan tanpa beban (yaitu saat kondisi torsi 0) mesin beroperasi sebagai motor. Sedangkan ketika torsi negative dan dalam kecepatan yang lebih besar dari kecepatan tanpa beban mesin beroperasi sebagai generator. Sehingga berdasarkan data kurva dapat disimpulkan bahwa untuk mengoperasikan motor pada kecepatan 0 – 316 rpm torsi yang dihasilkan sebesar 191 rpm. Selanjutnya dari kecepatan 316 – 5600 rpm, torsi akan turun secara perlahan mencapai torsi 140 N.m. Selibhnya dari kecepatan diatas 5601 rpm torsi akan mengalami penurunan yang lebih cepat hingga menyentuk nilai torsi sebesar 0. Dari data tersebut dapat dilihat bahwa nilai torsi berbanding terbalik dengan nilai kecepatan, usaha yang diperlukan untuk awalan putaran motor akan lebih besar. Sedangkan jika kecepatan semakin bertambah maka semakin kecil usaha yang diberikan motor untuk berputar.

Dari hasil pengamatan dan analisis, maka diperoleh nilai output pada desain motor BLDC dengan menggunakan *software* FEM pada **Error! Reference source not found.**

Tabel 4. 1. Hasil Output Desain Motor BLDC dengan Menggunakan

<b>Torsi Rata-Rata</b>	142 N.m
<b>RMS Ripple Torsi</b>	9,099268 N.m
<b>Input Daya</b>	82,7 kW
<b>Output Daya</b>	78,2 kW
<b>Rating Kecepatan</b>	6500 Rpm

Berdasarkan data hasil output desain motor pada **Error! Reference source not found.** diperoleh nilai torsi rata-rata 142 N.m dan rating kecepatan sebesar 6.500 rpm. Hal ini tercapai untuk pembuatan motor dengan kecepatan rendah. Jika dibandingkan hasil dari desain motor dengan target spesifikasi minimum pada Tabel 3.3, dapat dilihat nilai torsi dan kecepatan yang dibutuhkan sudah sesuai dengan target yang dibutuhkan.

Dengan menggunakan data input dan output daya motor BLDC pada **Error! Reference source not found.**, maka dapat dikalkulasikan efisiensi dari motor BLDC pada persamaan 4.2 sebagai berikut.

$$Efisiensi = \frac{Daya\ Output}{Daya\ Input} \times 100\% \quad (4.1)$$

$$Efisiensi = \frac{78,2\ kW}{82,7\ kW} \times 100\%$$

$$Efisiensi = 94,7\%$$

Berdasarkan hasil nilai efisiensi, maka dapat dikatakan bahwa motor beroperasi secara optimal, dimana efisiensi dari desain motor BLDC melebihi target sebesar 90%. Hal ini diperoleh karena umumnya motor BLDC memiliki efisiensi sebesar 85-90%[21].

#### 4.4 Analisis Torsi *Cogging* pada Motor BLDC

Simulasi untuk memperoleh karakteristik torsi *cogging* dilakukan dengan cara memutar rotor dengan sudut tertentu untuk memperoleh 1 gelombang torsi *cogging*. Untuk menentukan sudut pada 1 gelombang torsi *cogging* maka dapat dihitung berikut ini dengan menggunakan persamaa (2.7).

$$\theta_{\lambda cog} = \frac{2\pi}{n_{kpk}}$$

Dimana

$n_{kpk}$  : 210 (nilai kpk antara 21 dan 10)

Maka,

$$\theta_{\lambda cog} = \frac{2\pi}{210}$$

$$\theta_{\lambda cog} = 0,0299 \text{ rad} = 1,714^\circ$$

Maka nilai  $1,714^\circ$  merupakan nilai derajat mekanik akan dikalkulasikan menjadi derajat elektrik dengan menggunakan Persamaan (2.5).

$$\theta_m = \frac{\theta_e}{p}$$

Dimana,

$\theta_m$  :  $1,714^\circ$

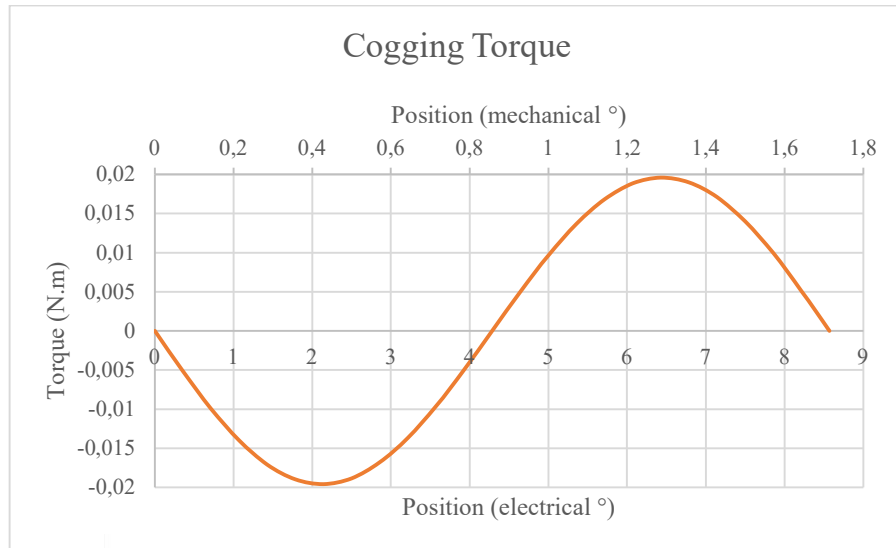
$p$  : 5 (jumlah pasang kutub)

Maka,

$$\theta_e = 1,714^\circ \times 5$$

$$\theta_e = 8,57^\circ$$

Sehingga diperoleh bahwa untuk mendapatkan 1 gelombang torsi *cogging*, rotor harus diputar sebesar  $1,714^\circ$  mekanik atau  $8,57^\circ$  elektrik. Berikut ini Gambar 4.6 merupakan hasil 1 gelombang torsi *cogging*.



Gambar 4.6. Gelombang Torsi Cogging pada Desain Motor BLDC 21 Slot 8 Pole

Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh gelombang torsi *cogging* pada Gambar 4.6. Dari data torsi *cogging* diperoleh nilai maksimal torsi *cogging* sebesar 0,0197 N.m, sedangkan nilai minimal torsi *cogging* sebesar -0,0197 N.m. Maka dengan menggunakan Persamaan (2.8) diperoleh nilai torsi *cogging*.

$$T_{cog} = 0,0197 - (0,0197)$$

$$T_{cog} = 0,0394 \text{ N.m}$$

Berdasarkan hasil desain motor BLDC diperoleh nilai torsi *cogging* sebesar 0,0394 N.m. Maka dapat disimpulkan bahwa setidaknya dibutuhkan torsi minimal sebesar 0,0394 N.m untuk memutar bagian rotor pada motor BLDC.

#### 4.5 Parameter dari Desain Motor BLDC dengan *Software* FEM

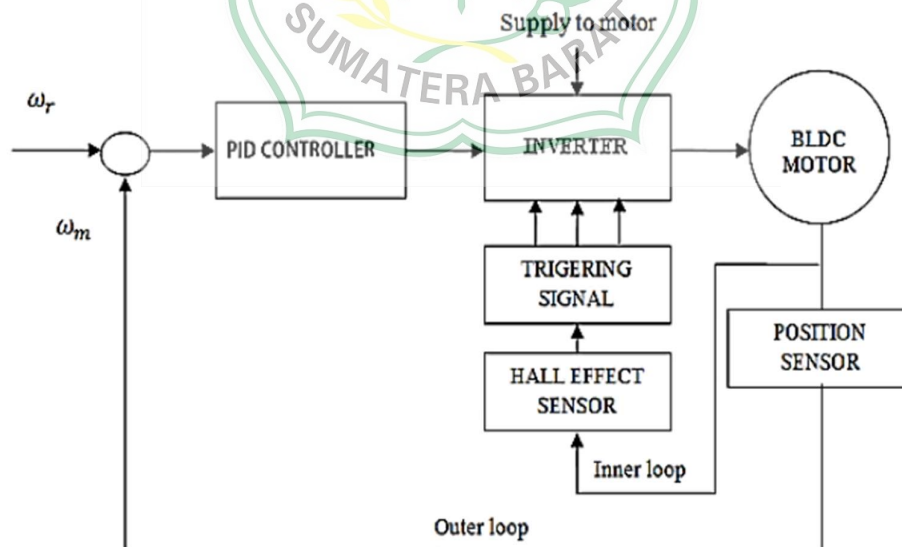
Setelah melalui simulasi desain pada *software* FEM, maka diperoleh parameter desain motor BLDC pada Tabel 4.3. Parameter diperlukan untuk memenuhi simulasi validasi motor pada *Simulink*.

Tabel 4. 2. Parameter Desain Motor BLDC

<i>Number of phases</i>	3
<i>Back EMF Waveform</i>	Trapezoidal
<i>Mechanical input</i>	<i>Torque T<sub>m</sub></i>
<i>Stator phase resistance R<sub>s</sub></i>	0,00614929205140323 Ω
<i>Stator phase inductance L<sub>s</sub></i>	0,000356872929192616 H
<i>Flux linkage established by magnet</i>	0,139021072901436 V.s
<i>Back EMF flat area</i>	140°
<i>Inertia</i>	0,00062 kg.m <sup>2</sup>
<i>Viscous damping</i>	0,0003035 N.m.s
<i>Pole pairs</i>	4

#### 4.6 Pengujian Motor BLDC dengan Kondisi Beban Torsi pada *Simulink*

Kali ini, tujuan pengujian motor BLDC pada situasi beban torsi adalah untuk menilai respon kecepatannya pada skenario beban tertinggi. Diagram alir pada Gambar 4.7. menunjukkan pemodelan rangkaian sistem speed control untuk BLDC Motor.

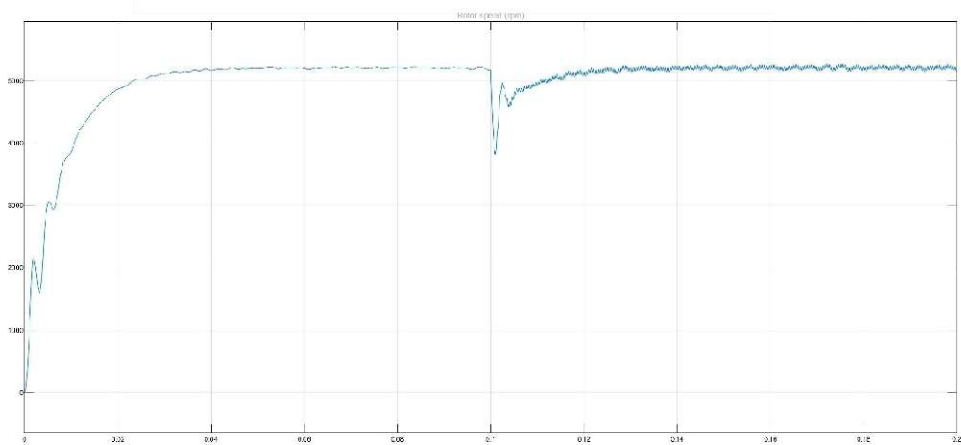


Gambar 4.7. Diagram Alir BLDC Motor Speed Control



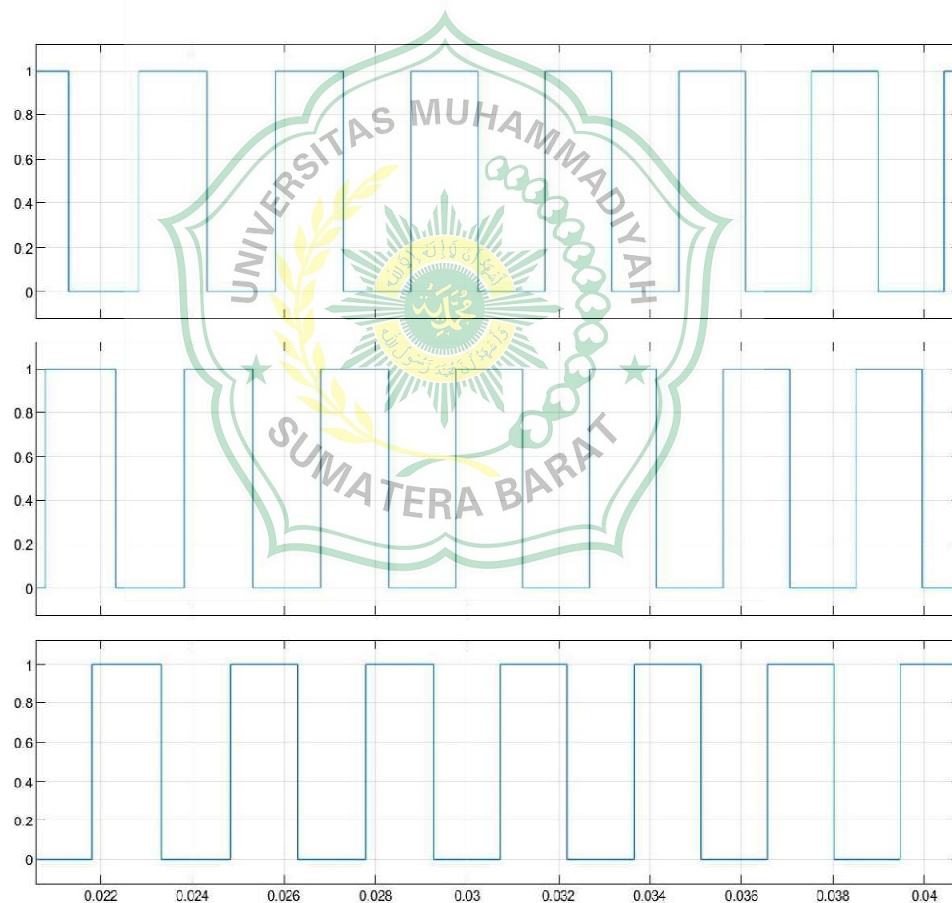
Gambar 4.7 menunjukkan diagram blok pengontrol kecepatan motor BLDC menggunakan dua sistem *closed loop*. Dalam hal ini, loop internal digunakan untuk menyetel dan merasakan polaritas *power supply* dan loop eksternal digunakan untuk mengontrol kecepatan. Pengontrol kecepatan motor membantu mengatur tegangan bus DC. Untuk mengendalikan sistem, diperlukan suplai DC dan nilainya tergantung pada kecepatan motor (rpm) dan kapasitasnya. Sistem ini juga membutuhkan pengontrol, dalam hal ini digunakan pengontrol PID yang pada akhirnya mengontrol tegangan keluaran dari inverter. Sensor adalah bagian integral dari pengontrol *closed loop* untuk mengontrol kecepatan motor. Fungsi utama sensor adalah mengubah posisi fisik dan kondisi poros motor menjadi sinyal listrik yang setara untuk rangkaian pengontrol. Biasanya, motor BLDC memerlukan bentuk gelombang tegangan seperti AC untuk pengoperasiannya, sehingga rangkaian *inverter* digunakan untuk mengubah tegangan catu daya DC menjadi tegangan catu AC yang setara. Parameter yang terdapat pada motor BLDC diambil dari hasil desain pada program FEM.

Pengamatan dilakukan selama pengujian untuk mengetahui karakteristik respon kecepatan, sensor hall, respon arus, dan respon *back-EMF* pada desain motor BLDC. Pengujian dilakukan dengan memberikan tegangan suplai motor 800V.



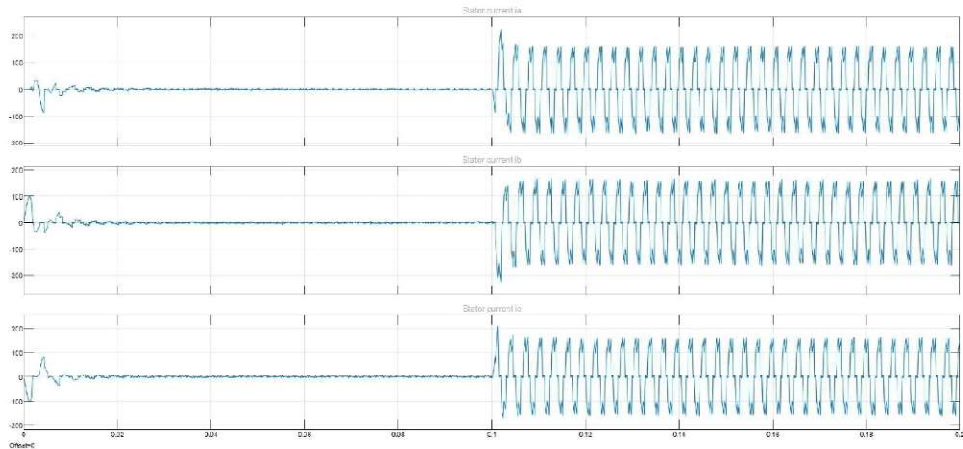
Gambar 4.8. Repon Kecepatan Motor BLDC Kondisi Berbeban

Kontroler PID bekerja untuk motor BLDC dengan kecepatan 5200 rpm seperti yang di tunjukan pada Gambar 4.8. Sumbu X mempresentasikan waktu dalam detik dan sumbu Y mempresentasikan kecepatan (rpm) motor BLDC. Dari gambar terlihat bahwa *setting time* kontroler adalah sekitar 0,02 detik dengan jumlah *overshoot* dan *undershoot* yang dapat diabaikan. Hal ini dikarenakan unit motor masih baru dalam keadaan starting dan tanpa beban. Setelah itu motor berjalan pada kecepatan konstan dari nilai yang telah ditetapkan yaitu 5200 rpm. *Undershoot* yang terdapat di antara 0,1 hingga 0,14 disebabkan motor dalam kondisi baru diberi beban sebesar 142 N.m.



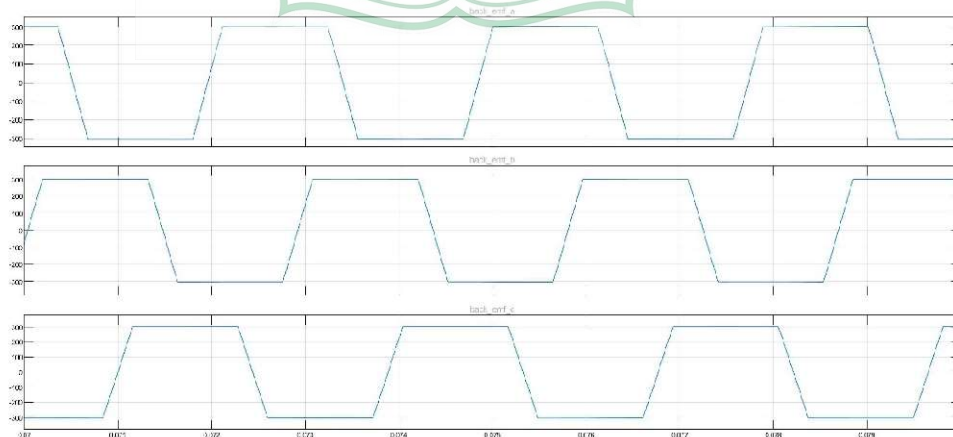
Gambar 4.9. Sinyal *Output* Sensor Hall

Gambar 4.9 menunjukkan sinyal 3 fasa yang dihasilkan dari sensor Hall. Di sini garis warna biru mewakili sinyal fase individual yang dihasilkan oleh sensor.



Gambar 4.10. Arus Motor BLDC Fasa U-V-W

Pada gambar Gambar 4.10 ini sumbu X mewakili waktu dalam detik (detik) dan sumbu Y masing-masing arus stator motor dalam Ampere (A). Lonjakan arus yang terjadi di awal diakibatkan karena motor baru *starting*. Pada saat sebelum mencapai 0,1 detik, motor pada dasarnya tidak memiliki arus yang mengalir dikarenakan motor belum memiliki beban. Setelah diberikan beban sebesar 142N.m. maka arus yang disuplai ke motor naik menjadi 153,1A. Gelombang arus yang disediakan adalah gelombang *six-step* dengan enam kondisi, yaitu nol-positif-positif-nol-negatif-negatif, di setiap gelombang.



Gambar 4.11. *Back-EMF* Motor BLDC U-V-W

Gambar 4.11 menunjukkan gaya gerak listrik balik (ggl) atau yang dikenal dengan sebutan *Back-EMF* motor BLDC sebesar 300V. Pada gambar ini, sumbu X waktu dalam detik (detik) dan Y mewakili nilai *Back-EMF* dalam Volt (V) dari motor BLDC. *Back-EMF* pada Gambar 4.2. merupakan hasil nilai antar fasa pada motor, sedangkan pada Gambar 4.11 merupakan hasil berupa nilai fasa pada motor. Gelombang *back-EMF* yang muncul berbentuk *trapezoidal*. Ini terjadi sebagai akibat dari pengontrol motor BLDC, yang memiliki komutasi *six-step* dan menggunakan arus tertentu dengan bentuk gelombang *six-step*. Dengan begitu dapat menghasilkan gelombang *trapezoidal* sebagai hasil dari *back-EMF*.



Gambar 4.12. Torsi Elektrik pada Motor BLDC

Gambar 4.12 menunjukkan kinerja respons torsi keluaran motor. Pada gambar ini, sumbu X mewakili waktu dalam detik (detik) dan Y mewakili torsi elektromagnetik dalam Newton-meter (N.m) motor BLDC. Berdasarkan data pada Gambar 4.12, motor tidak disuplai beban pada waktu 0-0,1 detik, sehingga nilai torsi mendekati 0. Sedangkan pada waktu 0,1-0,2 detik, motor diberi beban sebesar 142 Nm. Membandingkan ini dengan Gambar 4.4, *output* dari simulasi dalam program FEM sudah sesuai.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berikut ini dapat disimpulkan dari temuan desain dan analisis motor 21 *Slot* 10 *Pole* untuk digunakan dalam konversi mobil bensin menjadi mobil listrik menggunakan perangkat lunak FEM:

1. Performa motor BLDC 21 *Slot* 10 *Pole* sesuai dengan persyaratan kendaraan sebagaimana ditentukan dalam desainnya. Oleh karena itu, tidak diperlukan gearbox kedua atau konversi mekanis lebih lanjut lainnya.
2. Hasil tes akhir motor menunjukkan torsi 142 N.m, rating kecepatan 6.500 rpm, dan efisiensi 94,7%, yang dianggap cukup untuk keperluan kendaraan yang akan dikonversi.
3. Data yang diperoleh dari validasi desain menggunakan *software Simulink* sesuai dengan desain motor pada *software* FEM dari segi karakteristiknya.

#### 5.2 Saran

Berikut adalah beberapa rekomendasi yang dapat dipenuhi untuk pembuatan desain motor BLDC baru, yaitu:

1. Penyempurnaan tambahan geometri motor diperlukan untuk membuat BLDC dengan kinerja dan efisiensi yang lebih besar.
2. Untuk meningkatkan kinerja motor BLDC dalam sistem pengontrol motor, diperlukan pengontrol yang lebih andal.
3. Penelitian tambahan diperlukan pada sistem mekanis motor BLDC untuk digunakan dalam aplikasi kendaraan listrik.



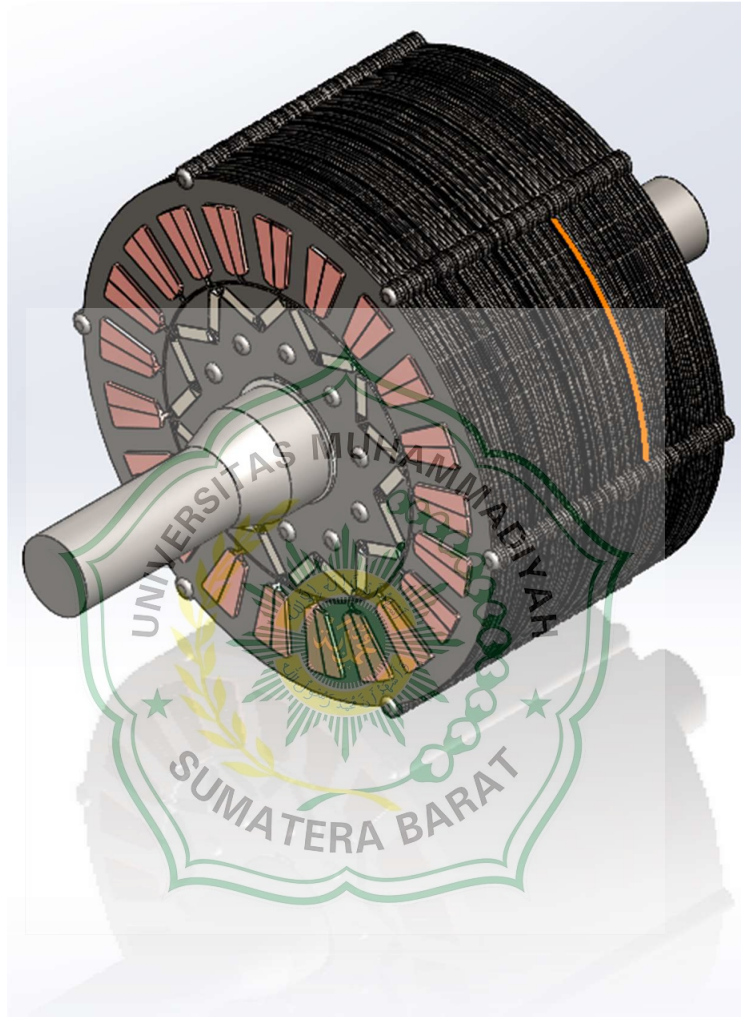
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Sarya, "Jumlah Kendaraan di Indoensia Capai 141,99 Juta Unit pada 2021," *DataIndonesia.id*, Nov. 22, 2022. <https://dataindonesia.id/sektor-riil/detail/jumlah-kendaraan-di-indonesia-capai-14199-juta-unit-pada-2021> (accessed Mar. 17, 2023).
- [2] Iqbal and R. Muammar, "Kajian Polusi Udara Dari Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor Pada Simpang Masjid Raya Kota Langsa," *Sains dan Teknologi*, vol. 5, no. 2, pp. 125–132, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.31764/justek.vXiY.ZZZ>.
- [3] N. S. Kumara, "Tinjauan Perkembangan Kendaraan Listrik Dunia Hingga Sekarang," *Teknik Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 89–96, Jun. 2008.
- [4] R. Mulyadi, K. Dwi Artika, and M. Khalil, "Perancangan Sistem Kelistrikan Perangkat Elektronik Pada Mobil Listrik," *Elemen*, vol. 6, no. 1, pp. 7–12, 2019.
- [5] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*.
- [6] Phouckal, "How to determine a motor is BLDC or PMSM," *Microchip*, Jul. 16, 2017. <https://forum.microchip.com/s/topic/a5C31000000MVHYEA4/t350308?comment=P-2568848> (accessed Mar. 17, 2023).
- [7] J. R. Hendeshot and T. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*.
- [8] P. Irasari, H. Syaeful Alam, and M. Kasim, "Perancangan dan Analisis Generator Magnet Permanen 3kW, 200 Rpm Untuk Aplikasi Pembangkit Listrik Energi Terbarukan," *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, vol. 12, no. 1, pp. 55–66, Jun. 2013.
- [9] A. Noviyanti Putri, "Perancangan Desain Motor Brushless Direct Current Dengan Daya 2000 Watt sebagai Penggerak Mobil Listrik Enggang Evo III".
- [10] S. Bhavikatti, *Finite Element Analysis*.
- [11] S. K. Chawrasia, C. K. Chanda, and S. Banerjee, "Design and Analysis of In-Wheel Motor for an Electric Vehicle," pp. 351–355, 2020.

- [12] P. Yedamale and Microchip Technology Inc., “Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals,” 2003.
- [13] T. Kenjo and S. Nagamori, *Permanent-Magnet and Brushless DC Motor*. New York: Oxford Science, 1985.
- [14] A. Wang, Y. Jia, and W. L. Soong, “Comparison of Five Topologies for an Interior Permanent-Magnet Machine for a Hybrid Electric Vehicle,” *IEEE Trans Magn*, vol. 47, no. 10, pp. 3606–3609, 2011, doi: 10.1109/TMAG.2011.2157097.
- [15] W. Brown and Microchip Technologi Inc., “Brushless DC Motor Control Made Easy,” 2019.
- [16] E. S. Hamdi, *Design of Small Electrical Machines*.
- [17] J. Goss, D. Staton, R. Wrobel, and P. Mellor, “Brushless AC Interior-Permanent Magnet Motor Design: Comparison of Slot/Pole Combinations and Distributed Vs. Concentrated Windings,” *IEEE*, pp. 1213–1219, 2013.
- [18] M. O. Suhada and I. Yasri, “Aspek Rancangan Generator Magnet Permanen Fluks Radial Kecepatan Rendah,” *FTEKNIK*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2018.
- [19] J. F. Gieras, *Electrical Machines Fundamentals of Electromechanical Energy Conversion*. 2017.
- [20] utimateSPECS, “Honda Civic V 3d 1.6 ESi Specs,” *ultimateSPECS*. <https://www.ultimatespecs.com/car-specs/Honda/7875/Honda-Civic-V-3d-16-ESi.html> (accessed Mar. 19, 2023).
- [21] Lee Teschler, “Difference between a brushless dc motor and a shaded pole induction motor.” <https://www.powerelectronicstips.com/difference-brushless-dc-motor-shaded-pole-induction-motor/> (accessed Apr. 03, 2023).

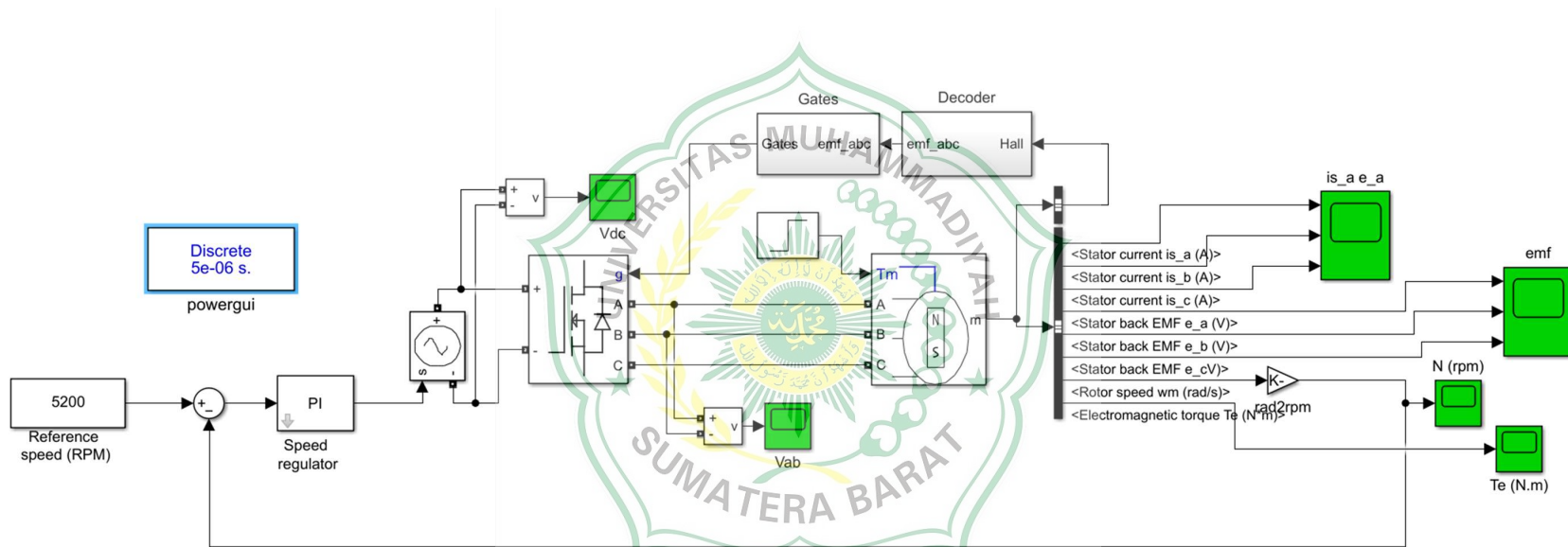
## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Desain Motor BLDC



Desain BLDC Motor

**Lampiran 2.** Rangkaian *Six-Step Inverter* untuk *Controler* BLDC



Rangkaian *Six-Step Inverter* BLDC Motor pada *Simulink*

### KARTU KONSULTASI BIMBINGAN SKRIPSI

<b>Nama Mahasiswa</b>	:	Boby Germana Fadly
<b>NIM</b>	:	20190019
<b>Program Studi</b>	:	Teknik Elektro
<b>Pembimbing I</b>	:	Ir. Rudi Kurniawan Arief, S.T., M.T., Ph.D
<b>NIDN</b>	:	1023068103
<b>Judul</b>	:	Perancangan <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC) Motor Untuk Konversi Kendaraan Berbahan Bakar Fosil Menjadi Kendaraan Listrik

No.	Tanggal Konsultasi	Materi dan Catatan Pembimbing	Paraf Pembimbing
1.	23 November 2023	1. Latar belakang tugas akhir. 2. Diskusi Konten BAB II dan BAB III.	
2.	06 Desember 2023	1. Menentukan parameter motor BLDC. 2. Menentukan topologi magnet. 3. Menentukan dimensi motor BLDC.	
3.	23 Desember 2023	1. Parameter output motor. 2. Desain motor BLDC.	
4.	09 Maret 2024	1. Diskusi penyusunan artikel internasional. 2. Diskusi penerbit jurnal internasional.	
5.	25 Maret 2024	1. Diskusi sidang TA.	



### KARTU KONSULTASI BIMBINGAN SKRIPSI

<b>Nama Mahasiswa</b>	:	Boby Germana Fadly
<b>NIM</b>	:	20190019
<b>Program Studi</b>	:	Teknik Elektro
<b>Pembimbing II</b>	:	Herris Yamashika, S.T., M.T.
<b>NIDN</b>	:	1024038202
<b>Judul</b>	:	Perancangan <i>Brushless Direct Current</i> (BLDC) Motor Untuk Konversi Kendaraan Berbahan Bakar Fosil Menjadi Kendaraan Listrik

No.	Tanggal Konsultasi	Materi dan Catatan Pembimbing	Paraf Pembimbing
1.	23 November 2023	<ol style="list-style-type: none"> <li>Latar belakang tugas akhir.</li> <li>Perbedaan BLDC, PMSM dan Asynchronous.</li> <li>Menentukan spesifikasi kendaraan.</li> </ol>	h
2.	09 Desember 2024	<ol style="list-style-type: none"> <li>Menentukan jumlah slot dan pole.</li> <li>Hasil kurva Back-EMF, Arus, Torsi, Torsi terhadap kecepatan dan cogging.</li> </ol>	h
3.	13 Januari 2024	<ol style="list-style-type: none"> <li>Diskusi simulasi kontroler six-step BLDC pada simulink.</li> <li>Hasil output kontroler.</li> </ol>	h
4.	02 Februari 2024	<ol style="list-style-type: none"> <li>Presentasi proses pengerjaan tugas akhir dari awal sampai akhir.</li> <li>Diskusi progres tugas akhir.</li> </ol>	h
5.	09 Maret 2024	<ol style="list-style-type: none"> <li>Diskusi penyusunan artikel internasional.</li> <li>Diskusi penerbit jurnal internasional.</li> </ol>	h
6.	25 Maret 2024	<ol style="list-style-type: none"> <li>Diskusi sidang TA.</li> </ol>	h