



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

PERANCANGAN DAN PEMODELAN DINAMIS *NON-CONTACT COAXIAL MAGNETIC GEARS* PADA *E-DRIVETRAIN* BUS TUGASANDA

IBNU FUAD AL-HANIF
NRP 02111640000211

Dosen Pembimbing:
Prof.Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



TUGAS AKHIR – TM184835

PERANCANGAN DAN PEMODELAN DINAMIS *NON-CONTACT COAXIAL MAGNETIC GEARS* PADA *E-DRIVETRAIN* BUS TUGASANDA

IBNU FUAD AL-HANIF
NRP 0211164000211

Dosen Pembimbing:
Prof.Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020



FINAL PROJECT – TM184835

**DESIGN AND MODELING OF NON-CONTACT COAXIAL
MAGNETIC GEARS IN TUGASANDA E-DRIVETRAIN
BUS**

**IBNU FUAD AL-HANIF
NRP 0211164000211**

**Advising Lecturer:
Prof.Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020**

HALAMAN PENGESAHAN

PERANCANGAN DAN PEMODELAN DINAMIS *NON-CONTACT COAXIAL MAGNETIC GEARS* PADA *E-DRIVETRAIN* BUS TUGASANDA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :



Ibnu Fuad Al-Hanif
NRP. 02111640000211

Disetujui Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., MEng. (Pembimbing)
NIP. 197505111999031001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Penguji I)
NIP. 197004121997032003
3. Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T. (Penguji II)
NIP. 198907052015042005
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T. (Penguji III)
NIP. 198604012015041001



13 AGUSTUS, 2020

PERANCANGAN DAN PEMODELAN DINAMIS *NON-CONTACT COAXIAL MAGNETIC GEARS* PADA *E-DRIVETRAIN* BUS TUGASANDA

Nama Mahasiswa : Ibnu Fuad Al-Hanif
NRP : 02111640000211
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Prof.Dr.Eng. Harus Laksana Guntur,
S.T., M.Eng.

ABSTRAK

Sistem transmisi pada bus listrik sampai saat ini belum ada perkembangan yang cukup signifikan, masih menggunakan transmisi konvensional berupa pasangan-pasangan roda gigi. Penggunaan roda gigi ini menimbulkan banyak kerugian, apalagi daya dan torsi putaran rendah dari motor listrik yang cukup besar membuat roda gigi harus mampu menerima tegangan kontak yang besar sehingga rawan terjadi kegagalan pada roda gigi. maka dari itu, penggunaan mechanical gear mulai ditinggalkan dan akan digantikan oleh coaxial magnetic gear. Pada dasarnya, coaxial magnetic gear merupakan roda gigi yang menggunakan magnet permanen sebagai pengganti gigi-gigi sehingga tidak ada kontak yang terjadi pada pasangan roda gigi. Perpindahan daya terjadi dengan adanya gaya tarik menarik dan tolak menolak antar magnet pada magnetic gear. Coaxial magnetic gear memiliki keunggulan seperti tidak terjadi gesekan, tidak timbul keausan, perawatan yang mudah dan tentunya tidak terjadi gear backlash. Kepadatan torsi terbentuk akibat medan magnet, ini dikarenakan gaya tolak menolak magnet terjadi secara simultan. Coaxial magnetic gear ini memiliki karakteristik sama seperti internal spur gear akan tetapi letak dari porosnya berada dalam satu garis sumbu dimana struktur coaxial magnetic gear terdiri dari 3 komponen utama yaitu inner rotor, stationary pole pieces, steel dan outer rotor.

Dalam penelitian ini akan dilakukan simulasi pada ANSYS Maxwell 3D kemudian hasil simulasi tersebut dijadikan sebagai input untuk simulasi pada MATLAB/Simscape. Variasi yang dilakukan adalah pada dimensi panjang arah axial coaxial magnetic gear dengan ukuran 200 mm, 250 mm dan 300 mm. Variasi tersebut akan menjadi variable dalam melakukan simulasi pada software ANSYS Maxwell 3D untuk mengetahui besar torsi yang dihasilkan oleh coaxial magnetic gear dari tiap variasi yang dilakukan, dikarenakan belum ada penelitian tentang variasi panjang coaxial magnetic gear transmission ketika diintegrasikan pada drivetrain kendaraan listrik. kemudian hasilnya digunakan sebagai acuan dalam pemodelan dinamis pada software MATLAB/simscape untuk dimasukkan dalam blok diagram e-drivetrain bus Tugasanda.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan diketahui bahwa pengaruh variasi panjang pada coaxial magnetic gear tersebut mampu meningkatkan torsi output dari coaxial magnetic gear. Semakin panjang coaxial magnetic gear, maka torsi yang dihasilkan semakin besar. Dari simulasi yang dilakukan pada ANSYS Maxwell 3D dan MATLAB simscape, terlihat bahwa dimensi yang tepat dan efisien untuk diaplikasikan pada e-drivetrain Bus Tugasanda adalah coaxial magnetic gear dengan variasi panjang 200 mm karena memiliki torsi yang cukup konstan pada 200 Nm dan karakteristik grafik kecepatan, percepatan, daya dan traks yang mirip dengan bus listrik dengan transmisi konvensional

Kata kunci: *Coaxial magnetic gear, e-drivetrain, torsi, Neodymium*

DESIGN AND MODELING OF NON-CONTACT COAXIAL MAGNETIC GEARS IN TUGASANDA E- DRIVETRAIN BUS

Student Name : Ibnu Fuad Al-Hanif
Student ID : 02111640000211
Department : Mechanical Engineering of FTIRS –
ITS
Academic Advisor : Prof.Dr.Eng. Harus Laksana Guntur,
S.T., M.Eng.

ABSTRACT

Transmission systems on electric buses to date there has been no significant development, still using conventional transmissions in the form of gear pairs. The use of this gear causes a lot of losses, moreover the power and low torque of the electric motor are large enough to make the gear must be able to accept large contact voltages so that there is a prone to failure of the gear. therefore, the use of mechanical gear began to be abandoned and will be replaced by coaxial magnetic gear. Basically, coaxial magnetic gear is a gear that uses permanent magnets instead of gears so that no contact occurs in the pair of gears. The transfer of power occurs with the force of attraction and repulsion resisting between magnets on magnetic gear. Coaxial magnetic gear has advantages such as no friction, no wear, easy maintenance and certainly no backlash gear. The torque density is formed due to the magnetic field, this is because the repulsive force of resisting magnets occurs simultaneously. Coaxial magnetic gear has the same characteristics as internal spur gear but the location of the axis is in one axis where the structure of the coaxial magnetic gear consists of 3 main components namely inner rotor, stationary pole pieces, steel and outer rotor.

In this study a simulation will be performed on ANSYS Maxwell 3D then the simulation results are used as input for

simulations on MATLAB / Simscape. Variations made are the dimensions of the length of the axial coaxial magnetic gear direction with the dimensions are 200 mm, 250 mm, and 300 mm. These variations will be variables in simulating ANSYS Maxwell 3D software to find out the amount of torque produced by coaxial magnetic gear from each variation made, because there has been no research on the length variation of coaxial magnetic gear transmission when integrated in the electric vehicle drivetrain. then the results are used as a reference in dynamic modeling in MATLAB / simscape software to be included in the Youranda e-drivetrain bus block diagram.

Based on the results of research that has been done, it is known that the effect of length variations on the coaxial magnetic gear is able to increase the output torque of the coaxial magnetic gear. The longer the coaxial magnetic gear, the greater the torque produced. From simulations carried out on ANSYS Maxwell 3D and MATLAB simscape, it appears that the exact and efficient dimensions to be applied to the Tugasanda Bus e-drivetrain are coaxial magnetic gear with 200 mm length variations because it has a fairly constant torque at 200 Nm and characteristics of the speed graph, acceleration, power and traction are similar to electric buses with conventional transmissions.

Key words : Coaxial magnetic gear, e-drivetrain, torque, Neodymium

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb. Dengan penuh syukur penulis mengucapkan "Alhamdulillah" atas segala kenikmatan yang telah diberikah Allah swt sehingga tugas akhir dengan judul "**Perancangan dan Pemodelan Dinamis *Non-Contact Coaxial Magnetic Gear* pada *E-drivetrain Bus Tugasanda***" dapat selesai sesuai dengan harapan penulis. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

1. Bapak Suradi dan Ibu Nurchotimah serta Kakak Ibrahim Alhanif dan Nidaul Hanifah dan seluruh keluarga besar di rumah yang selalu memberikan dukungan, doa dan segalanya kepada saya.
2. Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam memberikan masukan dan saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Ir. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc selaku kepala Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
4. Ir.Yusuf Kaelani M.Sc.E selaku dosen wali saya yang turut membantu saya dalam menyusun strategi mata kuliah yang akan diambil.
5. Bapak-Ibu dosen penguji yang telah memberikan saran serta masukan guna menyempurnakan Tugas Akhir ini dan Para Dosen Teknik Mesin ITS yang memberikan bimbingan kepada penulis.

6. Seluruh civitas akademika Departemen Teknik Mesin yang telah ramah kepada saya selama menempuh pendidikan di kampus yang tercinta.
7. Keluarga besar M59 selaku angkatan saya yang paling saya banggakan.
8. Keluarga Besar laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis yang sangat erat sekali kekeluargaannya.
9. Mas Reza Arianto yang sangat sabar dalam menanggapi semua keluhan dalam mengurus berkas-berkas untuk yudisium wisuda.
10. Keluarga B-nalz yang merupakan teman senasib didalam Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS antara lain Kimon, Iqra, Adit, Vano, Ebi, Komplek, Mat Kafi, Ujik, Quro, Telo, Jerry, Arif, Davi, Haikal, Ucoy, Bawir, Ishlah, Aqbil, Refi, Gemilang, Ifa, Roze, Alfa kalian istimewa. Akhir kata penulis berharap tugas akhir ini dapat berguna untuk semuanya. Saya meminta maaf apabila dalam tugas akhir ini masih ditemui banyak kesalahan. Kritik dan saran yang membangun penulis harapkan agar dapat memperbaiki diri kembali. Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, 13 Agustus 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB 1	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
BAB 2	7
TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Roda Gigi.....	7
2.2 Magnet	8
2.2.1 Material Magnet Permanen	8
2.2.2 Sifat Utama Magnet Permanen.....	11
2.2.3 Kelebihan dan Kekurangan Magnet Permanen	20
2.2.4 Proses Pembuatan Magnet.....	23
2.3 <i>Magnetic Gear</i>	24
2.3.1 <i>Coaxial Magnetic Gear (CMG)</i>	25
2.4 Perhitungan Rasio Transmisi	26
2.5 Perhitungan Torsi	28
2.6 Perbandingan <i>Magnetic gear</i> dengan <i>Mechanical Gear</i>	29
2.7 Kendaraan Bus Listrik	31
2.8 Gaya Hambat Kendaraan	32
2.9 <i>E-drivetrain</i> pada Kendaraan Listrik	34
2.10 Desain Sistem Transmisi.....	36
2.11 Karakteristik Traksi Kendaraan.....	37

2.12	Karakteristik <i>Power</i> dan Traksi Kendaraan	40
2.13	Kajian Pustaka.....	41
2.14	Software Penelitian.....	48
2.14.1	<i>Ansys Maxwell 3D</i>	48
2.14.2	<i>SolidWorks Premium 2019</i>	48
2.14.3	<i>MATLAB Sinscape</i>	48
BAB 3	.....	51
METODOLOGI PENELITIAN	.....	51
3.1	Diagram Alir Penelitian	51
3.1.1	Observasi.....	53
3.1.2	Perumusan Masalah	53
3.1.3	Studi Literatur.....	54
3.1.4	Penentuan Data Awal.....	54
3.1.4.1	<i>Coaxial Magnetic Gear</i>	54
3.1.4.2	Bus Tugasanda.....	55
3.1.4.3	Motor Listrik BLDC	56
3.1.5	Menghitung Gaya Hambat Kendaraan.....	57
3.1.6	Menghitung Rasio Gigi Kendaraan	58
3.1.7	Pemodelan 3D <i>Coaxial Magentic Gear</i>	61
3.1.8	Pemodelan FEM (<i>Finite Element Methode</i>).....	62
3.1.8.1	Input Model 3 Dimensi	65
3.1.8.2	<i>Assign Material</i>	66
3.1.8.3	<i>Atur Region</i>	67
3.1.8.4	<i>Assign Boundary & Excitation</i>	68
3.1.8.5	<i>Assign Meshing Operation</i>	68
3.1.8.6	<i>Assign Parameter dan Analysis Setup</i>	68
3.1.8.7	<i>Iterate</i>	70
3.1.8.8	<i>Validation Check & Analyze All</i>	70
3.1.8.9	<i>Transient Solution Type</i>	71
3.1.8.10	<i>Assign Motion</i>	71
3.1.8.11	<i>Post Processing</i>	72
3.1.8.12	Pengambilan dan Pengolahan Data.....	73
3.1.9	Simulasi dan Pemodelan <i>E-drivetrain</i>	74
3.1.9.1	Rancangan <i>E-Drivetrain</i> Bus Tugasanda	77
3.1.9.2	Input FEM Torsi <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	77

3.1.9.3	Blok Diagram MATLAB/ <i>Simscape E-Drivetrain</i> Bus Tugasanda.....	77
3.1.9.4	<i>Assign Parameter</i>	78
3.1.9.5	Pengambilan dan Pengolahan Data.....	79
3.1.10	Pengambilan dan Pengolahan Data.....	80
3.1.11	Analisis Data dan Pembahasan.....	80
3.1.12	Kesimpulan Penelitian	80
3.2	Proses Verifikasi.....	80
BAB 4	.....	83
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	.....	83
4.1	Perhitungan Rasio Coaxial Magnetic Gear	83
4.2	Data Hasil Penelitian pada Simulasi <i>ANSYS Maxwell 3D</i>	89
4.2.1	Hasil Torsi <i>Coaxial Magnetic Gear</i> pada Putaran 1000 rpm	89
4.2.2	Hasil <i>Coaxial Magnetic Gear</i> Torsi pada Putaran 4700 rpm	91
4.2.3	Hasil Torsi <i>Coaxial Magnetic Gear</i> pada Putaran 8000 rpm	92
4.3	Data Hasil Penelitian pada Simulasi <i>e-drivetrain MATLAB/simscape</i>	93
4.3.1	Karakteristik Kecepatan Bus dengan <i>e-drivetrain</i> pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm.....	95
4.3.2	Karakteristik Percepatan Bus dengan <i>e-drivetrain</i> pada Putaran 0 rpm- 8000 rpm	97
4.3.3	Karakteristik Daya Bus dengan <i>e-drivetrain</i> pada Putaran 0 rpm- 8000 rpm.....	98
4.3.4	Karakteristik Traksi Bus dengan <i>e-drivetrain</i> pada Putaran 0 rpm- 8000 rpm.....	100
4.3.5	Penentuan <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	101
BAB 5	.....	105
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	105
5.1	Kesimpulan	105
5.2	Saran	106
DAFTAR PUSTAKA	.....	107

LAMPIRAN A	109
LAMPIRAN B.....	110
LAMPIRAN C.....	111
BIODATA PENULIS	115

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Contoh bentuk kegagalan pada roda gigi (a) wear, (b) breakage failure, (c) plastic flow, (d) surface fatigue failure.....	3
Gambar 1.2	Struktur <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	4
Gambar 2.1	Jenis-Jenis Roda Gigi	7
Gambar 2.2	Jenis-Jenis Material Magnet Permanen (a) Magnet Alnico, (b) Neodymium magnet, (c) Samarium-Cobalt magnet, (d) Keramik magnet, (e) Plastik magnet	11
Gambar 2.3	<i>Fluks Density</i>	12
Gambar 2.4	Total Outer Gear Volume	14
Gambar 2.5	Grafik Torsi Terhadap Posisi Sudut Magnet.....	15
Gambar 2.6	Magnetic Gear dan Diagram Torsi	16
Gambar 2.7	Kurva Demagnetisasi dan <i>Knee Point</i>	18
Gambar 2.8	Metode Pembuatan Magnet	23
Gambar 2.9	Riset pada <i>Magnetic Gear</i>	24
Gambar 2.10	Struktur <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	26
Gambar 2.11	Konstruksi <i>Coaxial Magnetic Gear Stator (1), Outer Rotor (2), Radial Magnetized Pole Magnet (3), Inner and Stator Magnet (4)</i>	27
Gambar 2.12	(a) <i>Magnetic spur gear</i> (b) <i>Mechanical gear</i>	30
Gambar 2.13	Bus Tugas Anda	31
Gambar 2.14	Dinamika Kendaraan Bus Tugasanda.....	32
Gambar 2.15	Karakteristik Motor Listrik	34
Gambar 2.16	Jenis-Jenis Konfigurasi Drivetrain pada Mobil Listrik.....	35
Gambar 2.17	Skema Aliran Energi Kendaraan Listrik Motor BLDC.....	37
Gambar 2.18	Karakteristik Traksi Kendaraan Listrik	39
Gambar 2.19	Grafik Karakteristik Power Kendaraan listrik Ezzy II ITS.....	40
Gambar 2.20	<i>Coaxial Magnetic Gear</i>	42
Gambar 2.21	Dimensi Modulator.....	43

Gambar 2.22	Grafik Torsi yang Dihasilkan Setelah Optimasi Modulator	43
Gambar 2.23	<i>Flux line distribution</i> dari hasil Analisis CMG1 (a), CMG2 (b), CMG3.....	44
Gambar 2.24	(a) <i>Halbach Permanent Magnet Array</i> (b) <i>Parameter Desain</i>	45
Gambar 2.25	Grafik Torsi yang Dihasilkan.....	46
Gambar 2.26	Medan Magnet dan <i>Flux Density</i> pada Simulasi CMG	47
Gambar 3.1	Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir	51
Gambar 3.2	Dimensi <i>Coaxial Magnetic Gear</i> (a) Struktur Dasar <i>Coaxial Magnetic Gear</i> (b).....	54
Gambar 3.3	Grafik Torsi terhadap Kecepatan BLDC Motor Yasa P400.....	57
Gambar 3.4	Dinamika Kendaraan Bus Tugasanda.....	58
Gambar 3.5	Diagram Alir Perhitungan Gaya Hambat Kendaraan	59
Gambar 3.6	Komponen CMG (a) <i>Outer Rotor</i> (b) <i>Stationary Pole Pieces</i> (c) <i>Inner Rotor</i> (d) CMG diaplikasikan pada Bus.....	61
Gambar 3.7	Diagram Alir Tahapan Simulasi Penelitian	62
Gambar 3.8	Hasil <i>Input</i> dan <i>Assembly 3D Model</i>	66
Gambar 3.9	<i>Material Properties</i> (a) <i>Steel 1010</i> (b) <i>NdFeB35</i> ...	67
Gambar 3.10	Pembuatan <i>Region</i>	67
Gambar 3.11	Bentuk <i>Meshing</i>	68
Gambar 3.12	Pemilihan Solusi Simulasi Menu Maxwell 3D	69
Gambar 3.13	Pengaturan Analisis <i>Transient</i>	69
Gambar 3.14	Hasil Analisis <i>Mesh</i>	70
Gambar 3.15	Tahap <i>Validation Check</i>	71
Gambar 3.16	<i>Assign Motion</i>	72
Gambar 3.17	Nilai dan Arah Vektor <i>Flux Density</i>	73
Gambar 3.18	Grafik Torsi terhadap Waktu	73
Gambar 3.19	Diagram Simulasi <i>Drivetrain Coaxial Magnetic Gear</i>	74
Gambar 3.20	Blok Diagram MATLAB/Simscape	78

Gambar 3.21	<i>Input Parameter</i> (a) Parameter Bodi Bus Tugasanda (b) Parameter <i>Differential</i> dan (c) Parameter Roda 79	
Gambar 3.22	<i>Coaxial Magnetic Gear</i> Disimulasikan secara 3D	81
Gambar 4.1	Grafik Gaya (a) Hambat <i>rolling</i> dan (b) Tanjakan.	84
Gambar 4.2	Transmisi Bus Konvensional	82
Gambar 4.3	Dimensi <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	87
Gambar 4.4	Variasi Panjang Arah Aksial.....	87
Gambar 4.5	Grafik torsi hasil verifikasi pada penelitian terdahulu	88
Gambar 4.6	Grafik torsi CMG dengan Variasi Panjang pada Putaran 1000 rpm.....	89
Gambar 4.7	Grafik Torsi CMG dengan Variasi Panjang pada Putaran 4700 rpm.....	91
Gambar 4.8	Grafik Torsi CMG dengan Variasi Panjang pada Putaran 8000 rpm.....	92
Gambar 4.9	Blok Diagram e-drivetrain pada MATLAB/ <i>simscape</i>	94
Gambar 4.10	Grafik Kecepatan terhadap Waktu pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm.....	95
Gambar 4.11	Grafik Percepatan terhadap Waktu pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm	97
Gambar 4.12	Grafik Daya terhadap Waktu pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm	98
Gambar 4.13	Grafik traksi terhadap Waktu pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm	100
Gambar 4.14	Karakteristik Traksi Bus Tugasanda dengan e- drivetrain CMG 200 mm	115

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Properties</i> Utama pada Beberapa Jenis Magnet Permanen	17
Tabel 2.2 Simbol dan Deskripsi Simbol dalam <i>Magnetic Gear</i> ..	20
Tabel 2.3 Sifat magnetik dari magnet NdFeB (NdFeB Datasheet, Eclipse Magnetics)	22
Tabel 2.4 Perbandingan <i>Magnetic Gear</i> dan <i>Mechanical Gear</i> ..	29
Tabel 2.5 Parameter Simulasi	46
Tabel 3.1 Spesifikasi <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	55
Tabel 3.2 Data Spesifikasi Bus Tugasanda.....	55
Tabel 3.3 Data spesifikasi BLDC Motor Yasa 400.....	56
Tabel 3.4 Perancangan Simulasi <i>Coaxial Magnetic Gear</i> dengan Variasi Dimensi Arah Axial (mm) dan Kecepatan Angular (rpm)	74
Tabel 4.1 Proses verifikasi.....	88
Tabel 4.2 Parameter Bus pada <i>e-drivetrain</i>	94

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Riset dalam teknologi mobil listrik untuk moda transportasi umum semakin digencarkan akhir-akhir ini. Salah satunya adalah bus listrik yang akan dikerjakan oleh ITS bekerjasama dengan karoseri bus Tugasanda. Bus ini nantinya akan dikonversi menjadi bertenaga listrik sebagai sumber penggeraknya dan nantinya komponen yang akan diriset adalah bagian transmisinya. Transmisi terdiri dari beberapa roda gigi atau *gear* dengan rasio yang berbeda-beda. Roda gigi berfungsi untuk mentransmisikan daya dan mengubah variasi tingkat putaran poros pada mesin. *Gear* juga dapat berguna untuk mengubah arah sumbu putar dan mengubahnya dari gerak rotasi menjadi gerak translasi. Sebagian besar mesin modern saat ini masih menggunakan roda gigi karena keunggulan roda gigi dibandingkan alat pentransmisi lainnya. Kelebihan tersebut meliputi ; *Reliability* yang tinggi dan tidak mudah rusak, kemampuan dalam mentransmisikan dayanya tinggi karena tidak mengalami *slip*, mampu menerima beban yang berat dan *torque density* yang tinggi.

Namun roda gigi juga memiliki keterbatasan dalam operasinya. Ketika pasangan *gear* saling berputar terjadi gesekan pada daerah *pitch line* yang diikuti dengan *rolling* pada bagian atas dan bawah garis ini. gesekan dan *rolling* di permukaan gigi pada tegangan yang tinggi berlangsung secara berulang sehingga menimbulkan *inheret wear* yang dapat memicu terjadinya *failure*. Akibat adanya gesekan ini juga menimbulkan beberapa kerugian-kerugian, antara lain terjadinya keausan dikarenakan adanya kontak antar gigi-gigi roda gigi, kebisingan, panas akibat kontak dua metal bisa sangat tinggi, dapat rusak apabila dikenai kondisi torsi yang berlebihan karena tidak terjadinya *slip* pada roda gigi, memerlukan pelumasan yang baik, perawatan secara rutin dimana getaran dan keandalan menjadi perhatian utama.

Kegagalan roda gigi pada dasarnya berasal dari dua buah

tegangan yang bekerja pada gigi-gigi yang saling bertautan, yaitu tegangan kontak dan tegangan *bending*. Tegangan-tegangan ini akan sangat cepat memicu kegagalan jika dipadukan dengan kesalahan-kesalahan dalam perancangan, pemasangan, dan manufaktur roda gigi. Menurut (Mulyadi, 2011), kegagalan-kegagalan yang terjadi pada roda gigi adalah *wear*, *breakage failure*, *plastic flow*, dan *surface fatigue failure*.

➤ *Wear*

Wear adalah fenomena pada permukaan gigi dimana lapisan-lapisan metal terlepas dari permukaan akibat adanya kontak antara permukaan gigi-gigi pada roda gigi.

➤ *Breakage Failure*

Breakage failure adalah patahan yang terjadi pada keseluruhan atau sebagian besar bagian dari sebuah gigi. Umumnya disebabkan oleh kelebihan beban dan siklus tegangan yang bekerja diluar batas ketahanan gigi dari roda gigi tersebut.

➤ *Plastic Flow*

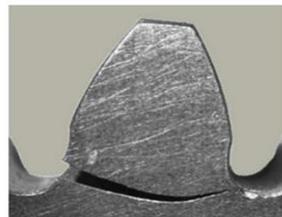
Plastic flow adalah *cold working* pada permukaan gigi yang disebabkan karena tingginya tegangan kontak dan aksi *sliding* dan *rolling* yang terjadi pada dua gigi yang bertautan.

➤ *Surface Fatigue Failure*

Surface fatigue failure adalah pembentukan lubang-lubang di permukaan gigi dikarenakan pengurasan metal akibat tegangan yang berfluktuasi. Berikut merupakan contoh kegagalan-kegagalan yang terjadi pada roda gigi, ditunjukkan pada Gambar 1.1



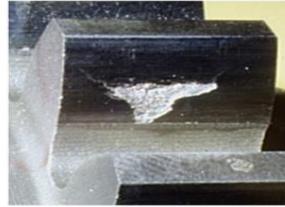
(a)



(b)



(c)



(d)

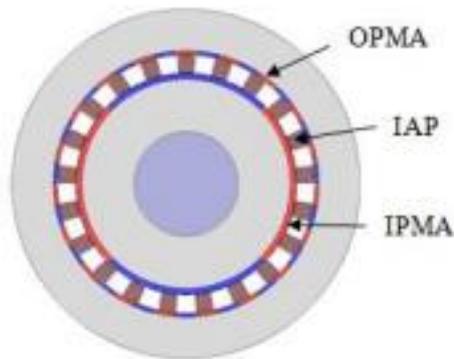
Gambar 1.1 Contoh bentuk kegagalan pada roda gigi (a) *wear*, (b) *breakage failure*, (c) *plastic flow*, (d) *surface fatigue failure*

Pada mesin industri, mesin-mesin saling terhubung dengan komponen peralatan yang lain dalam sebuah sistem produksi. Jika roda gigi pada salah satu mesin rusak maka akan menyebabkan kerusakan yang beruntun pada komponen yang lain dalam sistem tersebut. Karena kondisi tersebut tidak hanya akan menambah biaya produksi untuk memperbaiki, namun bisa saja akan membuat proses produksi terhenti. Dikarenakan penggunaan roda gigi dirasa kurang efektif untuk jangka panjang sehingga dapat mengalami beberapa kerusakan maka diperlukan adanya sebuah inovasi yang tepat, akurat, dan efisien, terutama roda gigi pada mesin-mesin industri.

Para peneliti sudah banyak melakukan riset dan inovasi untuk mengurangi kegagalan-kegagalan yang terjadi pada gigi roda gigi. Yaitu *non-contact magnetic gear* dimana *magnetic gear* ini menggantikan gigi-gigi pada roda gigi dengan magnet sehingga tidak terjadi kontak antar gigi-gigi dari roda gigi. Kontak antar gigi digantikan oleh sifat magnet yang saling tolak menolak ketika bertemu dengan kutub yang sejenis. Magnet dipasang melingkar sesuai diameter *gear*. Karena tidak adanya kontak antar gigi-giginya maka *magnetic gear* memiliki banyak keunggulan dari roda gigi biasa, diantaranya adalah agar tidak terjadi kontak dengan

pasangannya, tidak memerlukan pelumasan, panas yang timbul menjadi sedikit, dan tidak menimbulkan suara yang berisik.

Jenis-jenis *magnetic gear* sama dengan roda gigi biasa/*mechanical gear* seperti *coaxial magnetic gear* (CMG) salah satunya yang akan dibahas dalam dalam tugas akhir ini. *Coaxial magnetic gear* merupakan salah satu jenis *magnetic gear* yang paling lazim digunakan karena kemampuan dalam mentransmisikan daya dari 2 sistem rotasi yang berbeda dan kepadatan torsi yang tinggi (Rasmusen, 2005). Kepadatan torsi terjadi karena medan magnet yang dihasilkan oleh gaya tolak menolak magnet terjadi secara simultan (Atallah, 2001). *Coaxial magnetic gear* (CMG) sebenarnya sama seperti *spur gear* namun letak dua *gear*nya berada dalam 1 poros yang terdiri dari *outer permanent magnetic array* (OPMA) atau *low speed rotor*, *inner permanent magnetic array* (IPMA) atau *high speed rotor*, dan IAP atau *static modulator* (Carlos 2017).



Gambar 1.2 Struktur Coaxial Magnetic Gear ^[2]

Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan desain *coaxial magnetic gear* pada *software* SolidWorks 2019 dengan dimensi sesuai dengan motor listrik yang akan dipakai kemudian

disimulasikan dalam ANSYS Maxwell 3D untuk mengetahui torsi yang dihasilkan kemudian hasil torsi tersebut dijadikan salah satu parameter dalam simulasi MATLAB *simscape* dalam bentuk blok diagram bodi kendaraan bus listrik. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk mengembangkan transmisi *non-contact coaxial magnetic gear* untuk diaplikasikan dalam bus listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana rancangan *coaxial magnetic gear* yang cocok pada bus listrik?
2. Bagaimana model dinamis dan performa *coaxial magnetic gear* ketika diaplikasikan dalam bus listrik?
3. Bagaimana pengaruh dari variasi dimensi pada *coaxial magnetic gear*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Untuk mengetahui rancangan *coaxial magnetic gear* pada bus listrik.
2. Untuk mengetahui model dinamis dan performa *coaxial magnetic gear* ketika diaplikasikan dalam bus listrik.
3. Untuk mengetahui pengaruh dari variasi dimensi pada *coaxial magnetic gear*.

1.4 Batasan Masalah Penelitian

Batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Struktur *coaxial magnetic gear* terdiri dari *inner rotor*, *stationary pole pieces* dan *outer rotor*.
2. *Air gap* atau celah antara *inner rotor* dan *outer rotor* dengan *stationary pole pieces* sebesar 1 mm
3. Magnet permanen yang digunakan adalah jenis *Neodymium* (NdFeB)

4. Material yang digunakan pada *inner rotor*, *stationary pole pieces* dan *outer rotor (transmission case)* adalah *steel 1010*.
5. Motor listrik yang dipakai adalah Yasa P400 75 kW
6. Ukuran rancangan *coaxial magnetic gear* mengacu pada transmisi bawaan Bus Tugasanda
7. Torsi dan tenaga yang disalurkan dari motor dianggap tidak mengalami *losses/magnet slip*.
8. Dimensi kendaraan yang digunakan adalah Bus Tugasanda ukuran $\frac{3}{4}$.

1.5 Manfaat Penelitian

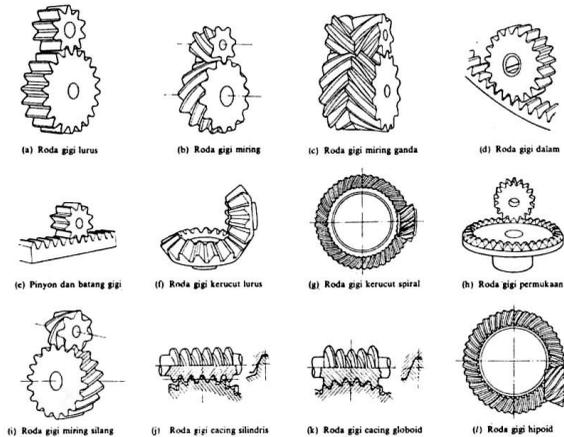
Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai inovasi yang dapat menjadi masukan bagi produsen roda gigi dan industri-industri dalam pengembangan serta penggunaan *coaxial magnetic gear*. Dengan inovasi ini diharapkan kedepannya dapat membantu masyarakat dalam mengurangi masalah yang sering terjadi pada *mechanical gear* serta meningkatkan efisiensi pada kendaraan mobil listrik.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Roda Gigi

Roda gigi adalah roda yang berguna untuk mentransmisikan daya besar atau putaran yang cepat. Rodanya dibuat bergerigi dan berbentuk silinder atau kerucut yang saling bersinggungan pada kelilingnya agar jika salah satu diputar maka yang lain akan ikut berputar (Foley, Vernard et al,1982). Bagian dari pasangan roda gigi yang berfungsi untuk menggerakkan roda gigi pasangannya disebut *pinion*. Sedangkan pasangan roda gigi yang digerakkan disebut *gear*.



Gambar 2.1 Jenis-Jenis Roda Gigi

Roda gigi biasa diaplikasikan pada mobil, *gear box*, mesin-mesin perkakas, mesin-mesin industri, mesin-mesin pertanian, *gear motor*, dan lain-lain. Roda gigi banyak dipilih karena memiliki kepadatan torsi yang tinggi, namun terdapat beberapa kekurangan seperti adanya gesekan antar komponen yang dapat menyebabkan keausan, kebisingan yang ditimbulkan, panas yang ditimbulkan bisa sangat tinggi, biasanya rusak apabila dikenai kondisi torsi yang berlebih, memerlukan pelumasan, perawatan

secara rutin, dimana getaran dan keandalan menjadi perhatian utama. (Mulyadi, 2011)

2.2 Magnet

Magnet adalah suatu obyek yang mempunyai suatu *density*. Magnet dapat dibuat dari bahan besi, baja, dan campuran logam serta telah banyak dimanfaatkan untuk industri otomotif dan lainnya. Setiap magnet memiliki dua kutub, yaitu: utara (N) dan selatan (S). Kutub magnet adalah daerah yang berada pada ujung-ujung magnet dan memiliki kekuatan magnet paling besar. Magnet akan saling tolak menolak jika bertemu dengan kutub yang sama, dan akan tarik menarik jika kutubnya berbeda.

Magnet juga dapat menarik benda yang memiliki sifat *ferromagnetic* dan *paramagnetic*. Namun untuk paramagnetic daya tariknya lemah. Besi dan baja adalah dua contoh materi yang mempunyai daya tarik yang tinggi oleh magnet. Sedangkan oksigen cair adalah contoh materi yang mempunyai daya tarik yang rendah oleh magnet. (S. Sutomo, 2012). Magnet dapat terbentuk secara alami dan buatan. Kebanyakan magnet yang ada saat ini adalah magnet Neodymium (NdFeB) yang termasuk dalam magnet permanen.

Jenis magnet permanen adalah magnet yang tidak memerlukan tenaga atau bantuan dari luar untuk menghasilkan daya magnet (elektromagnetik). Magnet jenis ini dapat mempertahankan kemagnetannya dalam waktu yang sangat lama. Kemampuan magnet akan hilang jika mengalami perlakuan panas pada suhu yang tinggi

2.2.1 Material Magnet Permanen

Magnet permanen dibagi menjadi beberapa jenis seperti ditunjukkan pada gambar 2.1. Jenis magnet permanen yang selama ini memiliki material-material sebagai berikut:

1. Neodymium Magnet

Magnet neodymium merupakan magnet permanen yang paling kuat. Magnet neodymium (juga dikenal sebagai NdFeB,

NIB, atau magnet Neo) merupakan sejenis magnet tanah jarang yang terbuat dari *Neodymium Alloy*, *Iron*, dan *Boron* membentuk dengan rumus Kimia $Nd_2Fe_{14}B$ *Tetragonal Crystalline Structure*. *Tetragonal $Nd_2Fe_{14}B$* memiliki struktur kristal yang sangat tinggi uniaksial *anisotropi magnetocrystalline* ($H_A \sim 7$ Tesla). Senyawa ini memberikan potensi untuk memiliki koersivitas (ketahanan mengalami kerusakan magnetik) tinggi. (Ruoho, 2007)

Bahan $Nd_2Fe_{14}B$ cenderung rentan terhadap korosi. Secara khusus, korosi sekecil apapun dapat menyebabkan kerusakan magnet. Masalah ini dibahas dalam banyak produk komersial dengan menyediakan lapisan pelindung. Pelapisan nikel atau dua pelapisan tembaga berlapis nikel digunakan sebagai metode standar, meskipun pelapisan dengan logam lainnya atau polimer dan lapisan pelindung pernis juga digunakan.

2. Magnet Samarium-Cobalt

Magnet Samarium-Cobalt adalah salah satu dari dua jenis magnet bumi yang langka, merupakan magnet permanen yang kuat yang terbuat dari paduan samarium dan kobalt. Mereka dikembangkan pada awal tahun 1970. Magnet ini kurang kuat dari magnet *Neodymium*, tetapi memiliki peringkat temperatur yang lebih tinggi dan lebih tinggi koersivitas. Mereka rapuh dan rawan terhadap retak dan *chipping*. Samarium-kobalt magnet memiliki produk-produk energimaksimum (BH_{max}) yang berkisar dari 16 oersteds megagauss-(MGOe) menjadi 32 MGOe; batas teoretis mereka adalah 34 MGOe. Jenis magnet ini dapat ditemukan di dalam alat-alat elektronik seperti VCD, DVD, VCR *player*, *handphone*, dan lain-lain. (Ruoho, 2007)

3. Keramik magnet

Keramik magnet atau *hard ferrite* adalah bahan magnet yang paling penting. Keunggulan dari bahan ini adalah murah dan memiliki *electrical resistivity* yang sangat tinggi. Namun karena induksi magnetnya (B_r) relatif rendah, magnet ini

biasanya tidak digunakan dalam aplikasi teknologi yang tinggi. (Ruoho, 2007)

Ferrite adalah senyawa kimia yang terdiri dari keramik bahan dengan besi (III)oksida (Fe_2O_3) sebagai komponen utama. Bahan ini digunakan untuk membuat magnet permanen, seperti *core* ferit untuk transformator, dan berbagai aplikasi lain. Ferit keras banyak digunakan dalam komponen elektronik, diantaranya motor-motor DC kecil, penguat suara (*loud speaker*), meteran air, KWH-meter, *telephone receiver*, *circulator*, dan *rice cooker*.

4. Bounded Magnet

Bounded-magnet dibuat dari campuran bahan plastik dan karet. Bounded magnet dibuat dengan menggulung atau metode ekstrusi. Magnet plastik dibuat karena keuntungan dari magnet ini fleksibilitas, biaya rendah, dan kemudahan dalam penggunaan. Magnet plastik biasanya diproduksi dalam bentuk lembaran strip atau yang banyak digunakan dalam mikro-motor, gasket dan lain-lain. Ferit bahan fleksibel berbasis sering dilaminasi dengan vinil dicetak putih atau berwarna. (Ruoho, 2007)

5. Alnico Magnet

Alnico magnet adalah magnet paduan yang mengandung Aluminium (Al), Nikel (Ni), Cobalt (Co). Karena dari tiga unsur tersebut magnet ini sering disebut Alnico. Sebenarnya magnet alnico ini tidak hanya mengandung ketiga unsur saja melainkan ada beberapa unsur mengandung besi dan tembaga, tetapi kandungan besi dan tembaga tersebut relatif sedikit. Alnico magnet dikembangkan pada tahun 1930-an dengan metode *sintering* atau lebih umum disebut metode *casting*

Magnet AlNiCo merupakan jenis magnet permanen paling tua yang masih digunakan. Keunggulan dari magnet AlNiCo adalah koefisien temperatur rendah dan suhu Curie yang sangat tinggi. Namun, koersivitas intrinsik yang sangat rendah (H_c)

dari magnet AlNiCo mengatasi penggunaan bahan-bahan ini di banyak aplikasi. Bahan AlNiCo menunjukkan perilaku non-linier sangat tinggi di kuadran kedua B_H -plane, sehingga membuat pemodelannya cukup sulit. (Ruoho, 2007)

Jenis magnet ini dapat ditemukan di dalam alat-alat motor (kipas angin, *speaker*, dan mesin motor). Magnet ini juga sering dijumpai dalam lab sekolah bahkan dapat ditemukan pada sepatu kuda yang berfungsi untuk meningkatkan daya lari kuda. Magnet ini kekuatannya relatif sedang dan kemampuan terapinya sangat lemah dan tidak dianjurkan untuk digunakan dalam terapi magnet. Magnet ini adalah magnet yang masih termasuk kategori berenergi rendah.



Gambar 2.2 Jenis-Jenis Material Magnet Permanen (a) Magnet Alnico, (b) Neodymium magnet, (c) Samarium-Cobalt magnet, (d) Keramik magnet, (e) Plastik magnet

2.2.2 Sifat Utama Magnet Permanen

Sifat magnet permanen tergantung pada material yang digunakan, volume, jarak antar *pole* maupun antar *gear*, dll. Sifat-

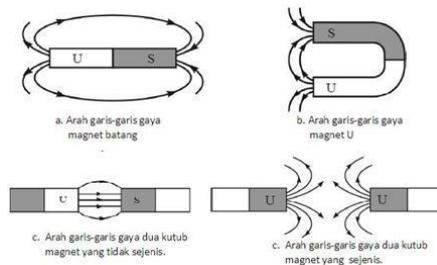
sifat yang terdapat dalam benda magnetik antara lain adalah sebagai berikut.

1. Medan magnet (H)

Medan magnet adalah ruang di sekitar magnet yang gaya tarik/tolakannya masih dirasakan oleh magnet lain. Arah magnet dapat ditunjukkan oleh beberapa vektor medan magnet. Medan magnet dilambangkan dengan H dan memiliki satuan A/m. Apabila dibuat suatu bentuk arus, maka arus tersebut akan menimbulkan medan magnet dengan kekuatan tertentu. Apabila medan magnet tersebut berada pada suatu ruang maka akan menyebabkan induksi magnet pada benda/medium di ruang tersebut dimana induksi tersebut merupakan medan yang terdiri dari garis-garis fluks magnetik imajiner.

Garis-garis gaya magnet selalu keluar dari kutub utara magnet dan masuk ke kutub selatan magnet. Garis-garis tersebut tidak pernah saling berpotongan. Kerapatan garis-garis gaya magnet menunjukkan kekuatan medan magnet.

Fluks magnetik adalah jumlah medan magnet (garis gaya magnet) yang dihasilkan sumber magnetik, dilambangkan dengan Φ (phi) dengan satuan weber (Wb). Kerapatan fluks magnet adalah jumlah total fluks yang menembus area yang tegak lurus dengan fluks tersebut. Fluks magnetic ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.3 Fluks Density (B) ^[7]

2. Torque Density

Torque density adalah sebuah kriteria unjuk kerja yang biasa digunakan pada mesin-mesin listrik dimana torsi dibagi dengan volume *gear* atau torsi dibagi dengan volume total. Kriteria ini dapat diaplikasikan untuk *coaxial magnetic gear*. Sebuah *coaxial magnetic gear* dengan magnet permanen memiliki volume *gear* tertentu. Perbandingan antara volume tersebut dengan torsi maksimum yang ditransmisikan biasa disebut dengan *active torque density*. (Joergensen & Thorlief, 2010)

Persamaan untuk *active torque density* adalah sebagai berikut:

$$\rho_A = \frac{T_{max}}{V_A} \quad (2.1)$$

dimana: ρ_A = *Active torque density* (Nm/m³)

T_{max} = Torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)

V_A = Volume *gear* (m³)

Membandingkan *torque density magnetic gear* dengan *mechanical gear* dibutuhkan untuk mengetahui keunggulan dari *magnetic gear*. Perhitungan *torque density* sebagai perbandingan untuk *magnetic gear* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\rho_T = \frac{T_{max}}{V_r} \quad (2.2)$$

dimana: ρ_T = *Total torque density* (Nm/m³)

T_{nom} = Torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)

V_r = Volume total (m³)

Sedangkan untuk *mechanical gear* menggunakan persamaan sebagai berikut:

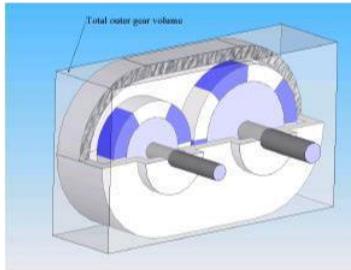
$$\rho_T = \frac{T_{nom}}{V_r} \quad (2.3)$$

dimana: ρ_A = *Total torque density* (Nm/m³)

T_{max} = *Rate nominal torque* (Nm)

V_A = Volume total (m³)

Volume total (V_T) adalah volume total *gear* terluar. Karena bentuk dari *gearbox* bermacam-macam, perhitungan untuk V_T menjadi lebih rumit. Maka dari itu, perhitungan volume total menggunakan pendekatan dimana volume total adalah volume sekitar *gearbox* kecuali as roda gigi. Gambar 2.3 adalah ilustrasi sederhana dari V_T . (Joergensen & Thorlief, 2010)



Gambar 2.4 Total Outer Gear Volume^[7]

3. Cogging Torque

Cogging torque adalah produk interaksi magnetik antara kutub magnet permanen rotor dan laminasi baja gigi stator. Ketika kutub rotor sejajar dengan gigi stator, diperlukan gaya untuk mematahkan tarikan, dan gaya ini disebut sebagai *cogging torque* dimana hal ini tergantung pada posisi, sesuai dengan lokasi gigi stator relatif terhadap magnet permanen, karena magnet secara konstan mencari posisi dengan keengganan minimum.

Profil *cogging torque* motor tergantung pada jumlah magnet permanen di rotor dan jumlah gigi di stator dan dapat diminimalkan melalui cara mekanis dengan mengoptimalkan jumlah kutub magnet dan gigi, atau dengan memiringkan atau membentuk magnet permanen untuk membuat transisi mereka di antara gigi stator lebih bertahap.

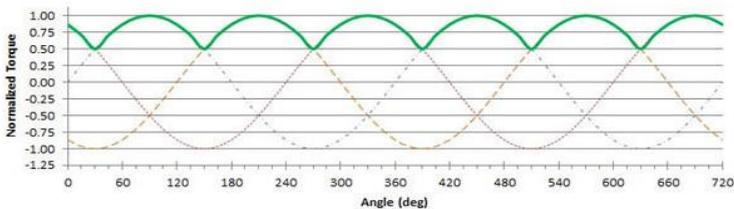
Cogging torque pada motor magnet permanen, termasuk motor DC *brushed* dan *brushless* dan motor AC sinkron.

Karena terjadi pada motor yang tidak berenergi, kadang-kadang disebut sebagai "torsi rangkaian terbuka".

4. *Ripple Torque*

Ripple torque adalah efek yang terlihat pada banyak desain motor listrik, mengacu pada peningkatan atau penurunan torsi output secara berkala ketika poros motor berputar. Ini diukur sebagai perbedaan dalam torsi maksimum dan minimum selama satu putaran penuh, umumnya dinyatakan sebagai persentase.

Hasil *cogging torque* adalah variasi dalam produksi torsi - disebut sebagai riak torsi - yang terjadi ketika motor diberi energi dengan arus konstan. Karena sifat interaksi antara medan magnet rotor dan stator (dijelaskan di atas), riak torsi bervariasi secara sinusoidal. Pada kecepatan tinggi, sering disaring oleh kelembaman sistem, tetapi pada kecepatan yang lebih rendah, riak torsi dapat menyebabkan fluktuasi kecepatan yang tidak diinginkan, getaran, dan suara bising.

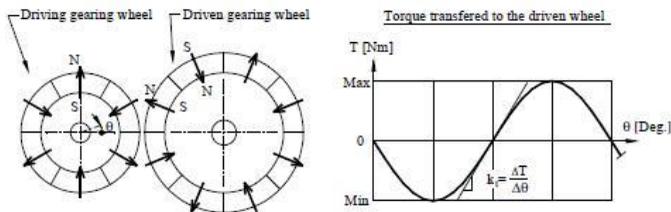


Gambar 2.5 Grafik Torsi Terhadap Posisi Sudut Magnet

5. Rasio Putaran

Pada roda gigi konvensional, transmisi daya terjadi menggunakan kontak antar gigi dari *gear* yang menimbulkan efek aus ketika terjadi kontak antar gigi. Pada *coaxial magnetic gear*, tidak terjadi kontak sehingga tidak ada keausan. Transmisi daya terjadi melalui magnet permanen pada dua buah roda. Karena tidak adanya kontak langsung antar roda, terjadi efek *fictive torsion spring* antara kedua roda. Efek *fictive torsion spring* adalah fenomena ketika roda pertama diam maka roda kedua akan berputar dengan sudut yang kecil.

Maka akan terjadi interaksi torsi tertentu antara kedua roda bergantung pada perpindahan sudut dari roda kedua. Fenomena ini dapat dijelaskan pada gambar 2.6 dimana terdapat *magnetic gear* penggerak dan yang digerakkan. (Joergensen & Thorlief, 2010)



Gambar 2.6 Magnetic Gear dan Diagram Torsi^[7]

Dapat dilihat dari gambar 2.6, *magnetic gear* memiliki batas torsi maksimal. Apabila torsi yang ditransmisikan lebih dari batasan tersebut, akan terjadi slip pada kedua *magnetic gear*. Oleh karena itu, pengoperasian *magnetic gear* harus berada di bawah batasan torsi tersebut. Hal ini juga terjadi pada *mechanical gear* yang biasa disebut *backlash* sedangkan pada *magnetic gear* akan terjadi *torsion spring* (kt). Persamaan untuk *torsion spring* adalah sebagai berikut:

$$k_t = \frac{\Delta \tau}{\Delta \theta} \quad (2.4)$$

Dimana: $k_t = \text{Torsion spring (Nm/rad)}$

$\Delta \tau = \text{Perubahan torsi (Nm)}$

$\Delta \theta = \text{Perubahan sudut (rad)}$

Rasio roda gigi (R_g) bergantung pada jumlah magnet (N_{pole1}) pada roda penggerak dan N_{pole2} pada roda penggerak.

Berikut adalah persamaan R_g :

$$R_g = \frac{N_{pole2}}{N_{pole1}} \quad (2.5)$$

Dimana: $R_g = \text{Rasio roda gigi}$

$$N_{pole1} = \text{Jumlah magnet pada Inner}$$

$$N_{pole2} = \text{Jumlah magnet pada Outer}$$

Kebanyakan sistem *gear* memiliki rasio lebih besar dari satu dimana pada poros *input* memiliki putaran tinggi dan putaran rendah pada poros *output*. Pada *mechanical gear*, besar rasio ditentukan dari jumlah gigi pada *gear*

6. Demagnetization

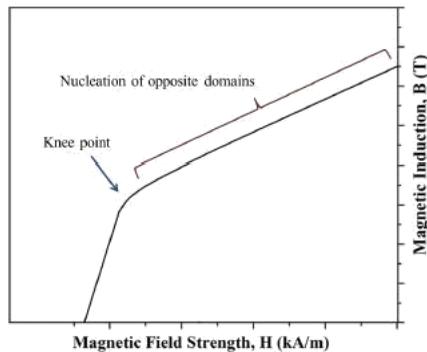
Demagnetisasi adalah fenomena dimana sebuah magnet kehilangan sifat kemagnetannya. Hal-hal yang dapat menyebabkan demagnetisasi adalah temperatur pengoperasian dan proses elektromagnet secara AC. Temperaaur memiliki efek yang signifikan terhadap sifat kemagnetan. Hal ini disebabkan karena meningkatnya temperatur mengakibatkan bergetarnya atom-atom sehingga *magnetic moment* memiliki orientasi yang acak. Magnetisasi sebuah material maksimal berada pada suhu -273°C (0 K) karena pergerakan atom menjadi kecil. Bagaimanapun, magnetisasi akan menurun seiring dengan bertambahnya temperatur, nilai magnetisasi akan menjadi nol. Temperatur ini disebut dengan temperatur *curie*. Ketika material ferromagnetik dipanaskan melebihi temperatur *curie*, material akan berubah sifat menjadi paramagnetik. Besar temperatur *Curie* pada setiap material berbeda seperti yang tertera pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Properties Utama pada Beberapa Jenis Magnet Permanen

Jenis magnet	Remenence (T)	Coercivity (kA/m)	Maximum energy product (kJ/m3)	Currie temperature ($^{\circ}\text{C}$)
Ferrite	0,23-0,29	150-250	8-28	450
Alnico	0,7-1,2	40-120	20-71	850
NdFeB	1,1-1,4	800-1100	235-430	310
SmCO	0,85-1,1	630-800	140-250	720

Sebuah magnet permanen utamanya beroperasi pada kuadran kedua dari *hysteresis loop*. Data dalam kuadran ini

biasa disebut kurva demagnetisasi yang dapat menjelaskan sifat magnet dalam medan demagnetisasi yang berbeda. Fenomena ini cukup rumit tapi proses yang paling utama adalah terbentuknya domain yang terbalik. Kurva demagnetisasi terdiri dari dua garis yang mendekati linear yang terpisahkan oleh daerah dengan lekukan kecil yang disebut dengan *kneepoint* seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.7 Kurva Demagnetisasi dan *Knee Point*

Demagnetisasi juga bisa terjadi karena adanya medan magnet dari luar dan pertambahan suhu. Di sisi lain, demagnetisasi dapat terjadi dengan sendirinya dikarenakan kutub utara dan selatan yang bebas pada ujung magnet menghasilkan medan magnet yang berlawanan dengan magnetisasi dari magnet tersebut. Namun karena nilainya yang kecil, diasumsikan nol. (Hamidizadeh, 2016)

7. Induksi magnetik (**B**)

Induksi magnet adalah pengaruh dari suatu ruang yang menghasilkan suatu gaya terhadap sebuah sumber arus di ruang itu. Jadi B dihitung dengan menghitung gaya yang dialami suatu sumber arus di suatu ruang. Ketika arus dialirkan pada sebuah kumparan yang melilit besi lunak maka terjadi orientasi pada partikel-partikel yang ada dalam besi. Orientasi ini mengubah/mengarahkan pada kutub utara dan selatan.

Hubungan antara fluks magnetik (Φ) dan kerapatan fluks (induksi) magnetik ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.6)$$

Dimana: B : induksi magnet (Tesla atau Wb/m²)
 Φ : Fluks magnet (Wb)
 A : Luas penampang (m²)

8. Saturasi Magnetisasi

Saturasi magnetisasi adalah keadaan dimana terjadi kejenuhan, nilai *density* B akan selalu konstan walaupun medan eksternal H dinaikkan terus. Remanensi bergantung pada saturasi magnetisasi. Untuk magnet permanen saturasi magnetisasi seharusnya lebih besar dari pada *soft magnet*. Kerapatan dari bahan ferit lebih rendah dibandingkan logam-logam lain dengan ukuran yang sama. Oleh karenanya nilai saturasi dari bahan ferit relatif rendah, hal ini menguntungkan untuk dapat dihilangkan.

9. Permeabilitas magnet (μ)

Daya hantar atau permeabilitas magnet (diberi lambang μ) merupakan parameter bahan yang menentukan besarnya fluks magnetik. Bahan feromagnetik memiliki permeabilitas yang tinggi.

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r \quad (2.7)$$

Dimana:

$$\mu_0 = 1,256 \text{ G.cm/A}$$

Untuk bahan feromagnetik, permeabilitas relatif μ_r jenis bahan tersebut lebih besar dari 1 Permeabilitas dari beberapa media yang hendak diukur pada prinsipnya adalah dengan menempatkannya dalam suatu kawat yang lurus dan panjang atau dalam gulungan yang melingkar atau solenoida, kemudian diukur resultan induksi kemagnetannya, sehingga diperoleh sebuah tetapan baru μ dan diturunkan menjadi suseptibilitas

relatif. Dengan nilai suseptibilitas inilah maka akan dapat diketahui jenis bahan magne. (Spaldin, N. A. 2010)

10. Koersivitas

Koersivitas adalah besarnya kuat medan magnet yang diperlukan untuk mengembalikan rapat fluk magnet atau induksi magnet, menjadi nol. Nilai koersivitas terjadi pada saat nilai rapat fluk magnet B sama dengan nol. Besarnya koersivitas dapat diketahui dari kurva histeresis masing masing FCD (*ferro casting ductile*).

11. Remenansi

Remanensi adalah besarnya rapat fluk magnet atau induksi magnet yang masih tertinggal ketika medan magnet menjadi nol atau tidak ada lagi. Besarnya Remanensi dapat diketahui langsung dari data kurva histeresis masing-masing FCD yaitu ketika medan magnet sama dengan nol. Remanensi sangat menentukan keras dan lunaknya magnet, semakin tinggi remanensi menunjukkan semakin tinggi rapat fluk yang tertinggal di dalam bahan, sehingga bahan dengan keadaan seperti ini merupakan magnet keras.

2.2.3 Kelebihan dan Kekurangan Magnet Permanen

Setiap material magnet permanen memiliki kelebihan dan kekurang masing-masing berdasarkan sifat-sifat kemagnetan yang ada pada Tabel 2.4.

Tabel 2.2 Simbol dan Deskripsi Simbol dalam *Magnetic Gear*

Symbol	Description	SI	CGS
H	Magnetic Field Strength	A/m	Oe
B	Flux Density	Tesla	Gauss
M	Magnetization	A/m	Emu/cm ³
Φ	Flux	Webers	<i>Maxwell</i>
B_r	Residual induction	Tesla	Gauss
H_c	Coercive force	A/m	Oe

H_{ci}	Intrinsic coersive force	A/m	Oe
$(BH)_{max}$	Maximum energy density	A/m	Oe
T_w	Maximum working temperatur	$^{\circ}C$	K
T_c	Curie temperature	$^{\circ}C$	K

Nilai koersivitas (H) suatu material magnet permanen akan mempengaruhi besarnya nilai fluks *density* (B) yang akan dihasilkan. Pada gambar 2.8 dapat dilihat bahwa permanen magnet berjenis Neodymium memiliki nilai koersivitas (H) dan menghasilkan fluks *density* (B) yang paling tinggi. Oleh karena itu, material berjenis Neodymium digunakan dalam Tugas Akhir ini karena material jenis ini yang paling cocok untuk digunakan. Dari Tabel 1 pada lampiran juga dapat dilihat perbandingan antar jenis material magnet permanen dilihat dari temperatur (T), *density* (B) yang dihasilkan, nilai koersiviti (H), dan *energy density* maksimal (BH) setiap bahan. Material Neodymium memiliki *density* (B), nilai koersiviti (H), dan *energy density* maksimal (BH) paling tinggi dibandingkan dengan yang lain, tetapi dapat bekerja pada temperatur (T) paling rendah.

Magnet berbahan Neodymium dibagi lagi dalam beberapa jenis berdasarkan kualitas kandungan magnet yang dimiliki. Jenis-jenis tersebut diantaranya yaitu N40, N42, N45, N48, N50 dan N52. Hal tersebut dijelaskan dalam tabel 2.3.

Tabel 2.3 Sifat magnetik dari magnet NdFeB (NdFeB Datasheet, Eclipse Magnetics)

Characteristic	Symbol	Unit	Value
Density	D	g/cm	7.5
Vickers Hardness	Hv	D.P.N	570
Compression Strength	C.S	N/mm ²	780
Coefficient of Thermal Expansion	C//	10 ⁻⁶ /°C	3.4
	C⊥	10 ⁻⁶ /°C	-4.8
Electrical Resistivity	ρ	μ Ω.cm	150
Temperature coefficient of resistivity	A	10 ⁻⁴ /°C	2
Electrical Conductivity	Σ	10 ⁶ S/m	0.667
Thermal Conductivity	K	kCal/(m.h.°C)	7.7
Specific Heat Capacity	c	kCal/(kg.°C)	0.12
Tensile Strength	σ or	kg/mm ²	8
Young's Modulus	λ / E	1011 N/m ²	1.6
Flexural Strength	β	10-12 m ² /N	9.8
Compressibility	σ	10-12 m ² /N	9.8
Rigidity	E.I	N/m ²	0.64
Poisson's Ratio	ν		0.24
Curie Temperature	Tc	°C	310

Magnet NdFeB memiliki karakteristik seperti ditunjukkan pada Tabel 2.3 dan diproduksi dengan menggunakan standar ISO9001 dan ISO14001 *Quality Control Standart*. Terdapat banyak versi dari magnet NdFeB yang dikodefikasi dengan spesifikasi berbeda berdasarkan kebutuhan penggunaannya seperti kekuatan, temperatur operasi, dan lain-lain. Kodefikasi magnet tersebut dapat dilihat pada *Magnets Datasheet* yang terdapat pada lampiran.

Magnet NdFeB mudah didemagnetisasi pada temperatur tinggi, ini artinya sifat kemagnetannya mudah hilang pada temperatur tinggi. Namun sifat kemagnetannya akan meningkat pada temperatur rendah. Pada tabel 2.7 dapat dilihat bahwa temperatur operasinya berada diantara 80⁰ - 200⁰ C. Hal lain yang mempengaruhi ketahanan magnet terhadap temperatur yaitu geometri. Magnet dengan bentuk yang lebih tipis akan lebih mudah didemagnetisasi daripada magnet yang tebal. Bentuk magnet piring datar dan yokes lebih direkomendasikan untuk digunakan pada temperatur yang tinggi. (N. Idayanti & Dedi, 2006)

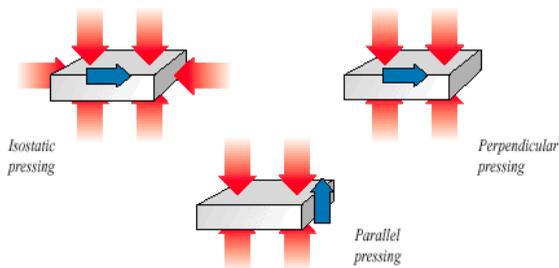
2.2.4 Proses Pembuatan Magnet

Magnet permanen diproduksi dengan salah satu metode berikut:

- *Sintering* (*Rare earth, Ferrit dan Alnicos*)
- Pressure Bonding atau injection molding (*Rare Earths dan Ferrites*)
- *Casting* (*Alnicos*)
- Ekstrusi (*Bonded Neodymium dan Fleksibel*)
- Calendar (*Fleksibel*)

Proses *sintering* melibatkan pemadatan serbuk halus pada tekanan tinggi dalam cetakan berbentuk persegi panjang, kemudian dilebur menjadi bentuk padat. Setelah disinter, bentuk magnetnya kasar, dan perlu dihaluskan lagi untuk didapat toleransi ukuran. Kerumitan bentuk yang dapat ditekan sangat terbatas atau bentuk yang bisa dibuat terbatas.

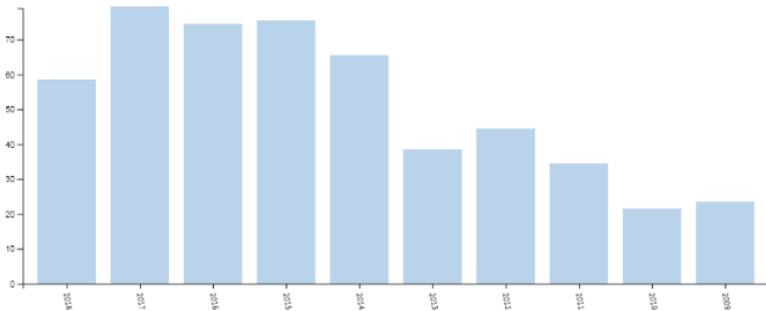
Magnet *Rare-Earth* dapat di *die-pressed* (dengan tekanan diterapkan dalam satu arah) atau ditekan secara isostatis (dengan tekanan yang sama diterapkan di semua arah). Magnet yang ditekan secara isostatis mencapai sifat magnetik yang lebih tinggi daripada magnet yang mati. Medan magnet pelurus untuk magnet yang ditekan dapat berupa paralel atau tegak lurus terhadap arah penekanan. Magnet yang ditekan dengan bidang penjajaran tegak lurus terhadap arah pengepresan mencapai sifat magnetik yang lebih tinggi daripada bentuk pengepresan paralel.



Gambar 2.8 Metode Pembuatan Magnet

2.3 *Magnetic Gear*

Magnetic gear merupakan inovasi terbaru dari para *engineer* dalam pengembangan teknologi pada roda gigi dimana gigi-gigi roda gigi digantikan dengan magnet permanen sehingga tidak adanya kontak antar gigi-gigi dalam hal meneruskan torsi (daya) dan perubahan tingkat putaran poros. Dalam beberapa tahun belakangan ini, *magnetic gear* (MG) banyak mendapat perhatian dari beberapa lembaga penelitian dan insutri-industri. Hal ini ditunjukkan dengan meningkatnya riset-riset yang dilakukan setelah tahun 2000, terutama dalam dekade terakhir seperti terlihat pada Gambar 2.9. Diperkirakan bahwa pengembangan teknologi yang berkelanjutan dari *magnetic gear* akan membuatnya lebih dekat menjadi aplikasi komersial.



Gambar 2.9 Riset pada *magnetic gear* [6]

Magnetic gear (MG) menawarkan solusi dari kekurangan-kekurangan yang ada pada *mechanical gear*. Beberapa kelebihan signifikan yang ada pada *magnetic gear* antara lain, tidak ada gesekan/kontak antar komponennya sehingga tidak ada keausan yang terjadi, pengurangan kebisingan yang ditimbulkan, pengurangan panas yang ditimbulkan, tidak terjadi kerusakan apabila dikenai kondisi torsi yang berlebihan, tidak memerlukan pelumasan, bebas perawatan, minim getaran dan keandalan yang lebih baik. Namun terdapat beberapa kekurangan pada *magnetic gear* dikarenakan *torque density* pada *magnetic gear* relatif rendah

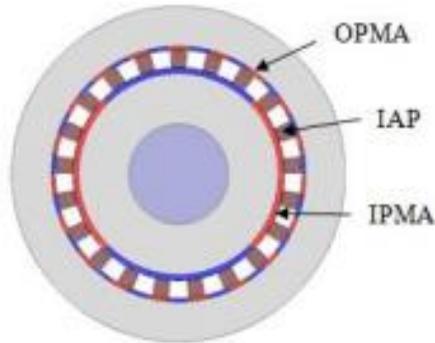
dan kompleksitas dari sistem magnetik. Maka dari itu, dilakukan riset-riset agar *torque density magnetic gear* dapat meningkat sehingga pengaplikasian *magnetic gear* dapat lebih luas lagi. (Raj, Varghese, Nair, & Vincent, 2016)

Dikarenakan tidak adanya kontak sehingga tidak terjadi aus pada *magnetic gear*, namun akan timbul *fictive torsion spring* antar kedua *gear*. *Fictive torsion spring* bisa dijelaskan dengan satu *gear* diam dan *gear* lainnya berputar dengan sudut yang kecil. Pada *mechanical gear* dikenal dengan nama *backlash*. Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar 2.4 dimana terdapat *magnetic gear* penggerak dan yang digerakkan.

2.3.1 *Coaxial Magnetic Gear (CMG)*

Coaxial magnetic gear ini pertama kali dicetuskan oleh Atallah dan Howe D pada tahun 2001. Karena dirasa penggunaan roda gigi konvensional terlalu banyak *losses*, maka ia merancang roda gigi tanpa ada kontak saat berputar. Bentuk awal dari desain mereka seperti CMG yang ada saat ini dengan komponennya antara lain; *inner rotor*, *low-speed rotor*, dan *stationary steel pole pieces*. Dari simulasi yang dilakukan, didapat *torque density* sebesar 100 kNm/m³

Coaxial magnetic gear merupakan salah satu jenis *magnetic gear* yang paling lazim digunakan karena kemampuan dalam mentransmisikan daya dari 2 sistem rotasi yang berbeda dan kepadatan torsi yang tinggi (Rasmusen, 2005). Kepadatan torsi terjadi karena medan magnet yang dihasilkan oleh gaya tolak menolak magnet terjadi secara simultan (Atallah, 2001). *Coaxial magnetic gear (CMG)* sebenarnya sama seperti *spur gear* namun letak dua *gear*nya berada dalam 1 poros yang terdiri dari *outer permanent magnetic array (OPMA)* atau *low speed rotor*, *inner permanent magnetic array (IPMA)* atau *high speed rotor*, dan IAP atau *static modulator* (Carlos 2017).



Gambar 2.10 Struktur *Coaxial Magnetic Gear*^[4]

Dilihat dari strukturnya, CMG dapat terintegrasi dengan *high speed outer rotor PM brushless motor* bernama *Magnetic Gear Permanent Magnet (MGPM)*, dimana mesin ini dapat menghasilkan torsi yang besar pada putaran rendah dengan kepadatan torsi yang tinggi. Mesin MGPM ini sudah umum digunakan pada turbin angin dan kendaraan listrik.

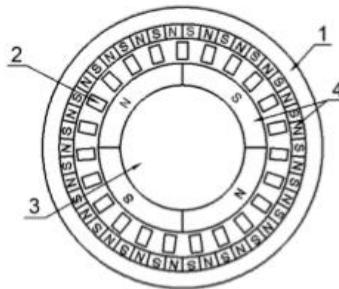
2.4 Perhitungan Rasio Transmisi

Transmisi merupakan komponen penggerak dalam kendaraan yang berfungsi untuk menghasilkan torsi dan kecepatan yang berbeda-beda. Rasio transmisi dibedakan berdasarkan kebutuhan kendaraan, akan tetapi pada umumnya rasio transmisi yang perlu diperhitungkan adalah mengenai rasio pada tingkat pertama yang berfungsi mengenai kemampuan kendaraan dalam menanjak, dan yang kedua adalah rasio pada tingkat akhir yang berfungsi mengenai kemampuan kendaraan untuk melaju maksimum. Pada perhitungan rasio transmisi *coaxial magnetic gear* hanya ada 1 tingkat percepatan karena sumber tenaga dari kendaraan ini adalah listrik. Berikut adalah rumus perhitungannya ;

$$i_1 = \frac{F_t \times r}{T_m \times I_d \times \eta_t} = \frac{(W \sin \theta_{\max} + f_r \cdot W + Ra)r}{T_m \times I_d \times \eta_t} \quad (2.7)$$

Dimana, F_t = gaya torsi kendaraan, W = berat kendaraan, T_m = torsi mesin, η_t = efisiensi dari transmisi, r = jari-jari roda, f_r = koefisien rolling ban, I_d = perbandingan gigi diferensial, R_a = hambatan angin. Pada perumusan di atas gaya hambat *drag* dapat diabaikan ketika kendaraan menanjak pada sudut tersebut, karena kecepatan kendaraan saat menanjak umumnya terjadi pada kecepatan rendah. Untuk gaya torsi kendaraan

Sedangkan untuk menentukan banyaknya magnet dan *stationary pole piece* menggunakan rasio yang sudah dihitung sebelumnya. Berikut adalah struktur *coaxial magnetic gear* :



Gambar 2.11 Konstruksi *Coaxial Magnetic Gear Stator* (1), *Outer Rotor* (2), *Radial Magnetized Pole Magnet* (3), *Inner and Stator Magnet* (4) ^[9]

Untuk mencapai torsi yang stabil juga harus memenuhi syarat berikut :

$$n_{pp} = p_i + p_o \quad (2.8)$$

Dimana p_o = jumlah *outer stator magnet*, n_{pp} = jumlah *ferromagnetic pole pieces* dan p_i = jumlah pasangan *inner magnet*. Rasio transmisi menentukan banyaknya jumlah magnet yang akan dipakai dalam CMG. Berikut adalah rumus perhitungan rasio CMG :

$$Gr = \frac{n_{pp}}{p_i} \quad (2.9)$$

Dimana : Gr = rasio transmisi CMG

n_{pp} = jumlah *ferromagnetic pole pieces*

p_i = jumlah pasangan *inner magnet*

2.5 Perhitungan Torsi

Akibat dari gaya tolak menolak magnet rotor dan stator, maka *inner rotor* dan *outer rotor* berputar secara berlawanan arah, hal ini menyebabkan timbulnya perbedaan torsi pada *inner* dan *outer*-nya. Maka torsinya dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

Torsi *inner rotor* :

$$T_{m_in} = \frac{L_{ef} R_{in}^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{r_in} B_{\theta_in} d\theta \quad (2.10)$$

Torsi *outer rotor* :

$$T_{m_out} = \frac{L_{ef} R_{out}^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{r_out} B_{\theta_out} d\theta \quad (2.11)$$

Dimana : L_{ef} = *effective axial length*
 B_r = *radial flux density*
 B_{θ} = *tangential flux density*
 R_{in} = *Radius inner gap*
 R_{out} = *radius outer gap*

Besar kecilnya torsi yang dihasilkan tergantung pada *flux density* yang dihasilkan dan harus memenuhi syarat bahwa kutub-kutubnya memiliki pasangan dan tidak boleh ganjil. Rumus di atas dapat digunakan untuk membandingkan hasil perhitungan teori dengan simulasi yang dilakukan dalam *software ANSYS Maxwell 3D*.

2.6 Perbandingan *Magnetic gear* dengan *Mechanical Gear*

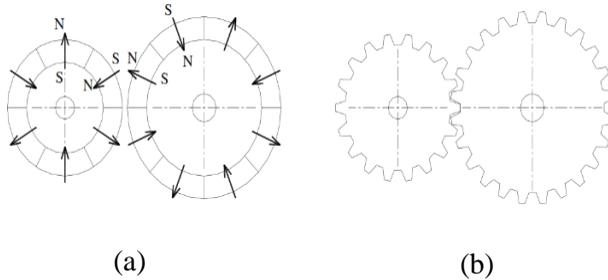
Roda gigi dapat di definisikan sebagai mekanisme transmisi yang digunakan untuk memindahkan torsi dari suatu poros ke poros lain dengan menggunakan magnet atau gigi-gigi. Roda gigi digunakan pula untuk sistem pengatur pada pemindah putaran, untuk merubah gerak lurus menjadi gerak putar atau sebaliknya. Beberapa roda gigi mekanik sangat mirip dengan roda gigi magnetik misalnya spur *gear* magnetik. Kesamaan kedua jenis roda gigi ditunjukkan pada Gambar 2.14. (Joergensen & Thorlief, 2010)

Masing-masing jenis *gear* memiliki kelebihan dan kekurangan, kelebihan dan kekurangan tersebut diantaranya disebutkan dalam Tabel 2.4

Tabel 2.4 Perbandingan *Magnetic Gear* dan *Mechanical Gear*
(Wang, 2015)

No	<i>Magnetic gear</i>	<i>Mechanical Gear</i>
1	(+) <u>Contactless, sehingga tidak membutuhkan pelumasan, tidak ada gesekan sehingga tidak terjadi keausan, dan meminimalkan perawatan.</u>	(-) <u>Terjadi kontak antar roda gigi, sehingga membutuhkan pelumasan, ada gesekan sehingga mungkin terjadinya keausan, dan membutuhkan perawatan.</u>
2	(+) <u>Zero backlash karena tidak ada kontak antar roda gigi</u>	(-) <u>Dapat terjadi backlash</u>
3	(+) <u>Minim getaran</u>	(-) <u>Getaran yang dihasilkan cukup besar</u>
4	(+) <u>Ketika terjadi slip tidak akan merusak sistem</u>	(-) <u>Ketika terjadi slip dapat merusak sistem</u>
5	(+) <u>Proses manufaktur lebih mudah</u>	(-) <u>Proses manufaktur sulit</u>
6	(-) <u>Torsi yang dihasilkan jauh lebih rendah dari mechanical gear untuk volume yang sama.</u>	(+) <u>Torsi yang dihasilkan lebih besar dari magnetic gear untuk volume yang sama.</u>
7	(-) <u>Mahal dalam manufakturnya</u>	(+) <u>Murah dalam manufakturnya</u>
8	(-) <u>Bahan baku cukup susah didapat</u>	(+) <u>Bahan baku lebih mudah didapat</u>

Dari tabel 2.4 dapat dilihat kelebihan-kelebihan *magnetic gear* dibandingkan *mechanical gear*, hal tersebut menjadi alasan kami mengambil judul TA tentang *magnetic gear* untuk dapat terus dikembangkan sebagai energi terbarukan.



Gambar 2. 12 (a) Magnetic spur gear (b) Mechanical gear

Roda gigi mekanik dan roda gigi magnetic ditunjukkan pada gambar 2.13 dimana roda gigi akan memanfaatkan gigi/pole untuk mentransfer torsi. Gigi pada roda gigi melakukan kontak fisik satu sama lain, dan akan terjadi keausan pada bagian gigi-giginya. Roda gigi magnet tidak akan mengalami keausan, karena tidak ada kontak langsung. Magnet permanen pada roda gigi akan mentransfer torsi diantara kedua gigi. Oleh karena roda gigi magnet tidak memiliki kontak langsung, maka akan ada efek pegas torsi fiktif antara roda gigi. Efek pegas torsi dapat dijelaskan dengan penggambaran satu roda tetap dan roda lainnya diputar dengan sudut kecil. Lalu akan ada interaksi torsi tertentu antara kedua roda gigi tergantung sudut perpindahan roda kedua.

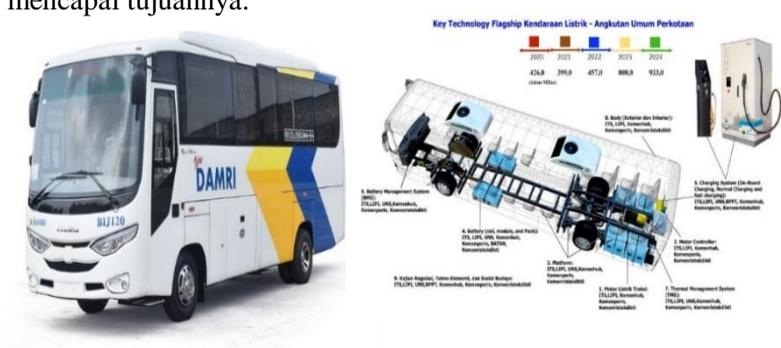
Sebuah gigi magnetik akan mencapai batas torsi pada saat roda gigi akan mencapai torsi maksimal. Jika torsi yang ditetapkan ditingkatkan lebih jauh dari titik ini akan ada masalah, karena roda gigi akan mengalami slip. Oleh karena itu, roda gigi magnetik harus beroperasi sedikit di bawah batasan T_{max} , karena efek slip tidak diizinkan untuk sebagian besar pengaplikasian *magnetic gear*.

Hubungan antar *gear* (R_g) tergantung dari jumlah magnet N_{pole1} pada roda penggerak dan N_{pole2} pada roda yang digerakkan. Hubungan ini dapat ditunjukkan sebagai persamaan (2.5). Sebagian besar sistem roda gigi memiliki hubungan antar *gear* (R_g) yang lebih besar dari satu, sehingga akan diperoleh putaran tinggi

pada poros input dan putaran rendah pada poros output. Persamaan hubungan antar *gear* sesuai untuk *gear* mekanik juga apabila jumlah kutub magnet diganti dari jumlah gigi pada masing-masing roda gigi. (Joergensen & Thorlief, 2010)

2.7 Kendaraan Bus Listrik

Kendaraan yang akan dipakai sebagai bahan penelitian dan pengujian *coaxial magnetic gear* adalah Bus dari karoseri Tugas Anda. Karoseri ini bekerja sama dengan ITS untuk mengembangkan kendaraan massal ramah lingkungan yang ditenagai oleh listrik. Sebenarnya bus listrik bukan lah hal baru di zaman ini. Dulu ITS juga sudah pernah membuat bus listrik namun belum efektif karena suatu alasan tertentu. Maka dari itu, proyek tersebut digantikan oleh kerjasama Tugas Anda agar dapat mencapai tujuannya.



Gambar 2.13 Bus TugasAnda

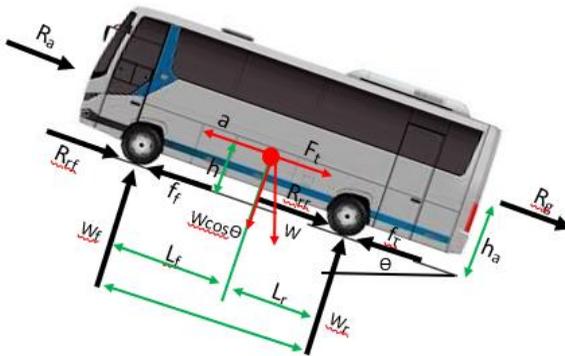
Tujuan dari dilanjutkannya proyek ini adalah krisis energi yang kian hari semakin menipis dan dibutuhkan energi alternatif selain bahan bakar fosil. Efisiensi juga perlu ditingkatkan mengingat *energy loss* yang timbul cukup merugikan. Salah satu fokus yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah *drivetrain* yaitu transmisi. Seperti yang dibahas pada bab 1 bahwa pada transmisi dengan roda gigi konvensional memiliki banyak kelemahan seperti mudah aus, rawan patah gigi, timbul gesekan,

membutuhkan pelumasan dan perawatan yang lebih intens. Maka dari itu diperlukan inovasi agar kekurangan tersebut dapat teratasi dan efisiensi tertinggi dapat tercapai.

Untuk bagian sumber penggeraknya akan digunakan motor BLDC 50 kW yang nantinya akan diintegrasikan dengan *coaxial magnetic gear* (CMG). Diharapkan torsi yang dapat dikeluarkan dari CMG ini adalah 150 Nm.

2.8 Gaya Hambat Kendaraan

Ketika kendaraan bergerak baik itu lurus atau menanjak akan timbul gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan tersebut. Adapun gaya-gaya yang bekerja dan posisi kerjanya pada kendaraan dua poos saat berjalan lurus adalah:



Gambar 2.14 Dinamika Kendaraan Bus Tugasanda ^[11]

Gaya yang bekerja pada kendaraan ketika bergerak adalah gaya hambat. Gaya hambat pada kendaraan terbagi menjadi tiga, yaitu : gaya hambat angin (R_{AE}), gaya hambat *rolling* (R_R), dan gaya hambat tanjakan (R_G). Selain ketiga gaya hambat di atas, kendaraan akan menerima gaya inersia (F_i) yang melawan arah gerak kendaraan saat kendaraan mengalami.

Gaya hambat angin (R_{AE}) adalah gaya hambat yang disebabkan oleh aliran udara disekitar bodi kendaraan. Efek dari

aliran udara tersebut adalah terjadinya perbedaan tekanan antara bagian depan dan bagian belakang kendaraan. Tekanan udara yang lebih besar di bagian depan dibanding bagian belakang kendaraan menyebabkan terjadinya gaya hambat angin. Gaya hambat angin dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$R_{AE} = 0.5 \times \rho \times A_f \times C_D \times V_A^2 \quad (2.12)$$

Dengan : ρ = Densitas udara (kg/m^3)
 A_f = Luasan frontal kendaraan (m^2)
 C_D = Koefisien *drag*
 V_A = Kecepatan relative udara dengan kendaraan (m/s)

Gaya hambat *rolling* (R_R) adalah gaya hambat yang terjadi pada antara ban dan jalan. Gaya hambat ini terjadi akibat adanya defleksi pada roda yang berputar. Besarnya f_r dapat dicari menggunakan persamaan hasil eksperimen J.J Taborek. Arah gaya hambat *rolling* berlawanan dengan arah dari percepatan kendaraan. Gaya hambat rolling dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_R = N \cos \alpha \times f_R \quad (2.13)$$

Apabila kendaraan melaju pada jalan dengan keadaan datar, gaya hambat *rolling* dirumuskan menjadi:

$$R_R = N \times f_R \quad (2.14)$$

Dimana: R_r = gaya hambatan *rolling* (N)
 f_r = koefisien hambatan *rolling*
 N = gaya normal kendaraan (N)

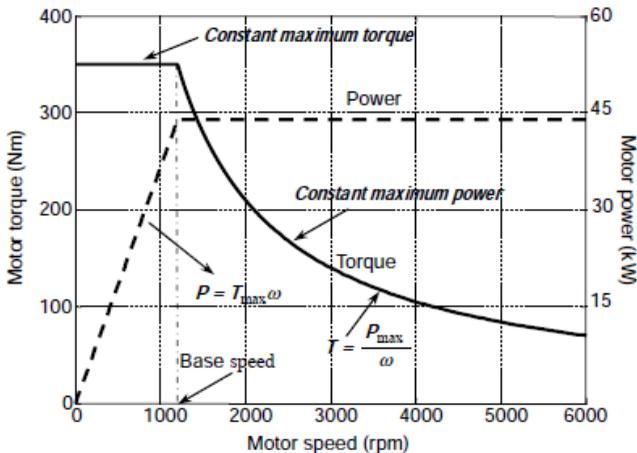
Gaya hambat tanjak (*Gradient Resistance*) adalah gaya hambat yang disebabkan oleh dua faktor yaitu berat kendaraan dan sudut tanjakan jalan. Gaya hambat tanjak dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$R_G = W \times \sin \alpha \quad (2.15)$$

Dimana: R_g = gaya hambat tanjakan (N)
 W = berat kendaraan (N)
 θ = sudut tanjakan

2.9 E-drivetrain pada Kendaraan Listrik

Pada kendaraan listrik, sistem transmisinya berbeda dengan kendaraan ICE (*Internal combustion engine*) dimana transmisi pada kendaraan listrik tidak memiliki tingkat percepatan. Hanya ada maju dan mundur hal ini karena kinerja motor listrik dengan teknologi kontrol terbaru menghasilkan daya yang relatif merata untuk tiap putaran.

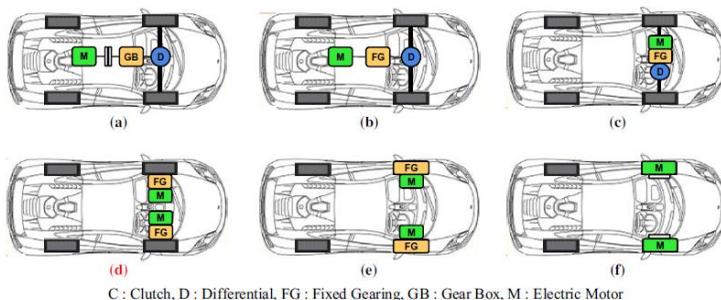


Gambar 2.15 Karakteristik Motor Listrik ^[12]

Kurva karakteristik dari motor listrik seperti diatas ditentukan oleh besarnya kecepatan dasar dan besarnya rasio kecepatan (x). Rasio kecepatan merupakan perbandingan antara kecepatan maksimum dan kecepatan dasar. Torsi yang dihasilkan oleh motor listrik pada kondisi dibawah kecepatan dasar merupakan tenaga dibagi dengan kecepatan. Jadi torsi maksimum adalah tenaga maksimum yang dihasilkan dibagi dengan kecepatan dasar. Perbandingan kecepatan maksimum yang dihasilkan motor listrik dengan kecepatan dasar disebut rasio kecepatan (x). Torsi

maksimum yang dihasilkan oleh motor listrik akan lebih besar dengan rasio kecepatan yang lebih besar (Sutantra & Sampurno, 2010).

Desain teknologi actor motor listrik dapat membuat suatu motor listrik sangat efisien pada tiap putaran, bahkan diatas 90%. Mempunyai torsi besar pada putaran rendah yang bermanfaat untuk jalan menanjak dan power yang cukup pada putaraan tinggi untuk menghasilkan kecepatan maksimum, namun tetap pada penggunaan listrik yg efisien. Dalam perkembangan mobil listrik dengan tujuan konservasi energi, mengharapkan powertrain yang paling efisien. Diantaranya dengan memangkas transmisi/tidak menggunakan transmisi. Sehingga actor pengkali efisiensi daya untuk transmisi sdh dapat dihilangkan. Hasil yang ada misalnya Mitsubishi MIEV (*Mitsubishi In-wheel Electric Vehicle*), sudah membuat motor listrik *brushless* putaran rendah dengan torsi besar, dan meletakkan motor listrik langsung pada kaki-kaki mobil tanpa transmisi. Hasilnya efisiensi energy total kendaraan lebih tinggi daripada yang menggunakan transmisi. Tentu saja berdampak pada penghematan listrik baterai.



Gambar 2.16 Jenis-Jenis Konfigurasi Drivetrain pada Mobil Listrik^[12]

Dari keenam konfigurasi di atas, terdapat kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Konfigurasi kelas *one motor based* memiliki *cost* yang lebih murah daripada kelas *two motor based* dan juga sistem kontrol yang lebih rumit. Hal tersebut

dikarenakan kebutuhan akan baterai yang bertambah sehingga menambah komponen-komponen elektrik kendaraan. Adapun pada sistem kontrol yang lebih rumit dikarenakan perlunya pemrograman pada *controller* agar pergerakan kendaraan antara kedua roda selaras. Namun kelebihan dari *two motor based* tersebut ialah mengurangi *losses* pada kendaraan akibat *powertrain*. Motor yang langsung dihubungkan pada roda memungkinkan penurunan *losses*.

2.10 Desain Sistem Transmisi

Dalam sistem transmisi menentukan besar dari rasio transmisi perlu diperhatikan beberapa hal antara lain kemampuan output gaya traksi kendaraan dan yang kedua adalah menentukan ukuran dari komponen transmisi supaya dimensi dari transmisi terlihat ideal dengan kendaraan. Maka yang pertama harus diperhitungkan adalah rasio transmisi pada tingkat gigi pertama. Hal ini karena pada tingkat pertama dibutuhkan torsi maksimum supaya kendaraan bergerak, serta dengan diperhitungkannya torsi maksimum dapat diketahui seberapa besar sudut tanjakan jalan yang dapat dicapai dengan menggunakan rasio transmisi pertama. Dibawah ini merupakan rumus untuk menentukan besar rasio transmisi pertama sesuai persamaan (2.16).

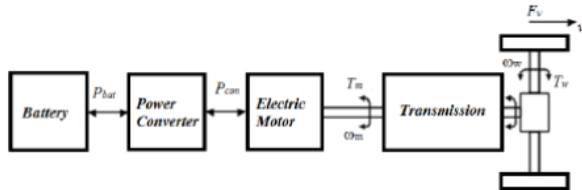
$$I_1 = \frac{F_t \times r}{T_m \times i_d \times \eta_t} = \frac{(W \sin \theta_{\max} + f_r \cdot W \cos \theta + R_a) r}{T_m \times i_d \times \eta_t} \quad (2.16)$$

dimana, F_t = gaya torsi kendaraan, W = berat kendaraan, T_m = torsi mesin, η_t = efisiensi dari transmisi, r = jari-jari roda, f_r = koefisien rolling ban, i_d = perbandingan gigi diferensial, R_a = hambatan angin. Gaya hambat drag dapat diabaikan ketika kendaraan menanjak pada sudut tersebut, karena kecepatan kendaraan saat menanjak umumnya terjadi pada kecepatan rendah.

$$I_m = \frac{F_t \times r}{T_m \times i_d \times \eta_t} = \frac{\left(f_r \cdot W + \frac{1}{2} \rho \cdot C_d \cdot A_f \cdot v_m\right) r}{T_m \times i_d \times \eta_t} \quad (2.17)$$

2.11 Karakteristik Traksi Kendaraan

Skema aliran energi dari kendaraan listrik dengan motor BLDC, transmisi dan gardan dapat dilihat pada gambar 2.17



Gambar 2.17 Skema Aliran Energi Kendaraan Listrik Motor BLDC ^[12]

Berdasar gambar di atas, prinsip system *drivetrain* pada kendaraan listrik indentik dengan kendaraan dengan mesin hampir sama, perbedaan mencolok hanya pada mesin listrik dan mesin berbahan bakar fosil. Maka dapat disimpulkan bahwa perhitungan karakteristik *drivetrain* kendaraan listrik sama dengan kendaraan mesin biasa. Sehingga untuk melakukan perancangan *drivetrain* pada kendaraan listrik dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$T_p = I_t \times I_g \times T_m \times Edt \quad (2.18)$$

Dimana : T_p = torsi poros

I_t = rasio transmisi

I_g = rasio gardan

T_m = torsi motor

Edt = efisiensi kendaraan listrik

Gaya dorong atau gaya traksi yang terjadi pada roda (F_t) dengan efisiensi transmisi (Edt) dapat dihitung dengan perumusan seperti dibawah ini:

$$F_t = \frac{I_t \times I_g \times T_m}{R} Edt \quad (2.19)$$

dengan

$$I_t = \frac{N_e}{N_t}, I_g = \frac{N_t}{N_p}$$

Fungsi dari karakteristik traksi kendaraan adalah sebagai penggambaran besar gaya traksi yang dapat dihasilkan kendaraan pada setiap kecepatan, serta dapat mengetahui kecepatan, percepatan dan sudut tanjakan maksimum yang dapat dilalui kendaraan. Untuk mendapatkan karakteristik traksi kendaraan terlebih dahulu dicari kecepatan dasar untuk setiap tingkat transmisi (V_{bn}), gaya traksi untuk setiap tingkat transmisi (F_{tn}), hambatan rolling kendaraan (R_r), hambatan angin yang terjadi (R_a) dan hambatan tanjakan yang dilalui kendaraan (R_g). Setelah mengetahui data-data di atas maka karakteristik traksi kendaraan dapat diketahui.

Untuk mengetahui besar dari kecepatan dasar (V_{bn}) dan kecepatan maksimum (V_{nmax}) kendaraan dengan tingkat transmisi n (V_{bn}) dapat dihitung dengan perumusan sebagai berikut:

$$V_{bn} = \frac{\pi \times R \times N_b}{30 \times I_{tn} \times I_g} \quad (2.20)$$

$$V_{nmax} = \frac{\pi \times R \times N_{m_{max}}}{30 \times I_{tn} \times I_g} \quad (2.21)$$

Dimana, N_b = putaran dasar motor listrik, $N_{m_{max}}$ = putaran maksimum motor listrik, I_{tn} = rasio transmisi ke “n”.

Setelah mengetahui kecepatan dasar dan kecepatan maksimum pada tiap tingkat transmisi selanjutnya adalah menentukan gaya traksi maksimum dan minimum yang dapat dihasilkan pada tingkat transmisi. Gaya traksi maksimum yang dihasilkan motor terjadi ketika putaran 0 sampai pada putaran dasar, hal ini karena torsi yang terjadi adalah konstan sesuai dengan grafik sedangkan setelah kecepatan konstan maka torsi motor akan turun begitu juga dengan gaya traksi kendaraan. Konsep ini sangat sesuai dengan kebutuhan kendaraan, dimana kebutuhan traksi sangat diperlukan saat kecepatan awal, sedangkan untuk kecepatan yang

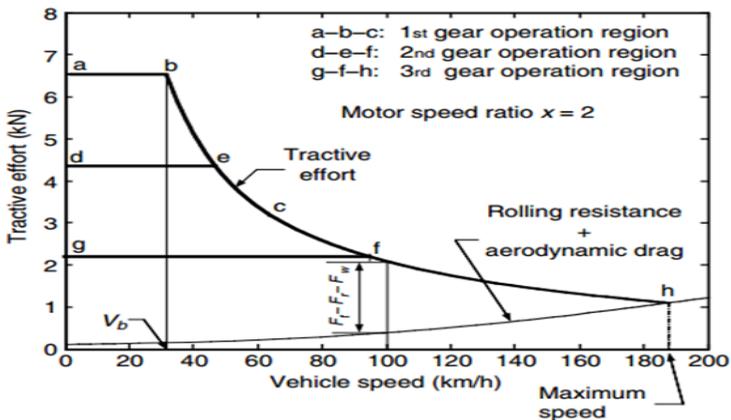
terus bertambah kebutuhan traksi kendaraan akan berkurang. Dibawah ini merupakan perumusan untuk mencari besar gaya traksi maksimum dan minimum yang dapat dihasilkan pada tingkat transmisi “n”:

$$F_{t_{\max}} = \frac{I_{tn} \times I_g \times T_{m_{\max}}}{R} \text{ Edt} \quad (2.22)$$

$$F_{t_{\min}} = \frac{I_{tn} \times I_g \times T_{m_{\min}}}{R} \text{ Edt} \quad (2.23)$$

dimana, T_{\max} = torsi motor listrik maksimum, T_{\min} = torsi motor listrik minimum

Untuk lebih jelasnya dibawah ini merupakan gambar karakteristik traksi kendaraan listrik dengan 3 tingkat kecepatan dan dengan rasio kecepatan ($x=2$).

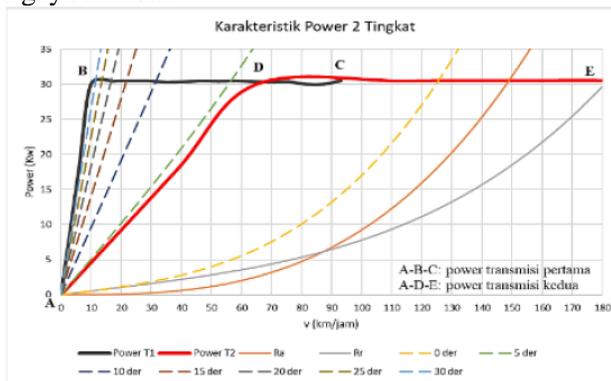


Gambar 2.18 Karakteristik Traksi Kendaraan Listrik ^[10]

Berdasarkan gambar 2.18, dapat diketahui bahwa kendaraan menggunakan 3 tingkat transmisi. Kecepatan maksimum yang dapat dicapai pada tingkat transmisi 1 adalah 70 km/jam, sedangkan kecepatan maksimum yang dapat dicapai pada tingkat transmisi 2 adalah 98 km/jam. Lalu dengan transmisi ketiga kendaraan dapat mencapai 185 km/jam.

2.12 Karakteristik *Power* dan Traksi Kendaraan

Karakteristik *power* suatu kendaraan menunjukkan seberapa besar *power* yang dapat diberikan sistem transmisi untuk memenuhi kebutuhan *power* kendaraan akibat dari gaya-gaya hambat yang terjadi. Karakteristik *power* kendaraan listrik terdiri dari grafik *power* dari masing-masing tingkat transmisi yang nantinya akan diplot dengan grafik daya yang dibutuhkan akibat adanya gaya hambat.



Gambar 2.19 Grafik Karakteristik *Power* Kendaraan listrik Ezyy II ITS [8]

Pada gambar 2.19 terlihat karakteristik *power* kendaraan listrik dengan dua tingkat kecepatan. Grafik tersebut menjelaskan tentang besar *power* yang dibutuhkan oleh kendaraan akibat adanya gaya hambat dibandingkan dengan *power* yang dihasilkan oleh motor listriknya. Pada transmisi tingkat pertama, *power* maksimum dari motor listrik digunakan seluruhnya pada sudut 30 derajat sedangkan pada transmisi berikutnya *power* yang dihasilkan hanya dapat dilalui oleh jalan datar dengan kecepatan maksimum yang lebih besar hingga perpotongan gaya hambat kendaraan. Semakin besar kecepatan kendaraan, maka semakin besar pula *power* yang dibutuhkan hingga pada nilai *power*

maksimum yang dapat dihasilkan oleh motor listrik, kemudian kendaraan akan bertambah kecepatannya dengan *power* maksimum dengan nilai konstan. Setelah mengetahui berbagai gaya hambat yang terjadi pada kendaraan, diperlukan perhitungan untuk menentukan kebutuhan tenaga dan torsi kendaraan yang dibutuhkan untuk melawan gaya hambat tersebut sehingga kendaraan dapat melaju. Penentuan kebutuhan tenaga dari motor yang digunakan untuk kendaraan ini yaitu dengan menentukan besar sudut tanjakan maksimum dan kecepatan yang diinginkan saat kendaraan melalui jalan dengan sudut tanjakan maksimum, sehingga didapatkan gaya hambat kendaraan sesuai dengan persamaan.

Untuk menghitung *power* yang didapat dari masing-masing tingkat transmisi adalah dengan rumus sebagai berikut:

$$P_t = F_t \times V \quad (2.24)$$

dimana : P_t = power yang diberikan oleh transmisi (kW)

F_t = gaya dorong tiap transmisi (N)

V = kecepatan kendaraan (m/s)

Sedangkan untuk menentukan besarnya power yang dibutuhkan oleh adanya gaya hambat dapat dilihat berdasarkan rumus:

$$P_r = F_r \times V \quad (2.25)$$

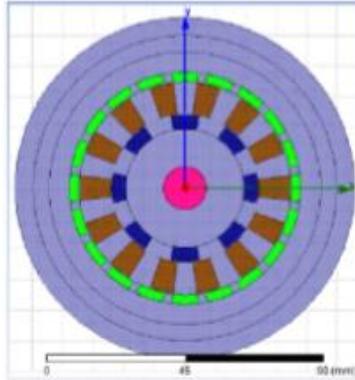
dimana P_r : power yang dibutuhkan oleh gaya hambat (KW), F_r : gaya hambat (N), V : kecepatan kendaraan (m/s).

2.13 Kajian Pustaka

Penelitian sebelumnya yang dapat dijadikan sebagai referensi dalam mengerjakan Tugas Akhir ini yaitu milik Carlos Guilherme Da Costa Neves dan Aly Ferreira Flores Filho dari *Universidade Federal do Rio Grande do Sul* berupa *Coaxial Magnetic Gear Analysis and Optimization*. Penelitian ini berupa prinsip kerja *coaxial magnetic gear* dengan metode Analisis menggunakan *finite element methode* (FEM) dan *Fast Fourier Transform* (FFT) dimana gelombang *flux density* pada kedua *air-gap* (*inner rotor* dan *outer rotor*) didapatkan dari FEM dan *harmonic spectrum* didapat dari FFT. Spesifikasi yang *Coaxial*

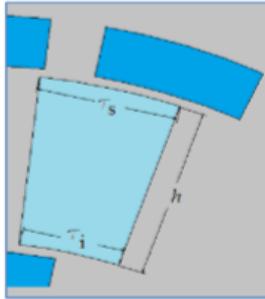
Magnetic Gear mereka pakai adalah sebagai berikut :

Inner rotor magnet = 4 pasang
Outer rotor magnet = 10 pasang
Ferromagnetic pole pieces = 14 pasang



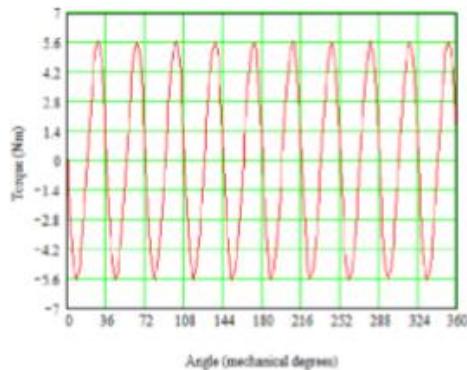
Gambar 2.20 Coaxial Magnetic Gear ^[4]

Tujuan utama dari penelitian tersebut adalah untuk mengetahui perilaku *modulator* (besi diantara *inner magnet* dan *outer magnet*) pada CMG untuk mengoptimalkan desainnya. *Modulator* ini berfungsi untuk memodulasi medan magnet yang dihasilkan oleh interaksi *inner* dengan *outer magnet*. Dimensi dari *modulator* nya juga mempengaruhi performa dari CMG. Salah satu parameter dimensi yang berpengaruh adalah *h*. *h* menentukan jarak antara modulator dengan *inner* dan *outer magnet*. Ini bertujuan untuk meminimalkan *torque ripple* yang sering terjadi pada motor listrik dengan magnet permanen.



Gambar 2.21 Dimensi Modulator^[4]

Dari simulasi yang telah dilakukan, didapat nilai h agar *modulator* dapat bekerja secara optimal yaitu $h = 10$ mm, $\tau_i = 5.12$ mm dan $\tau_s = 7.57$ mm didapat setelah iterasi sebanyak 84 kali. Torsi maksimal yang dihasilkan adalah 5.6 Nm.



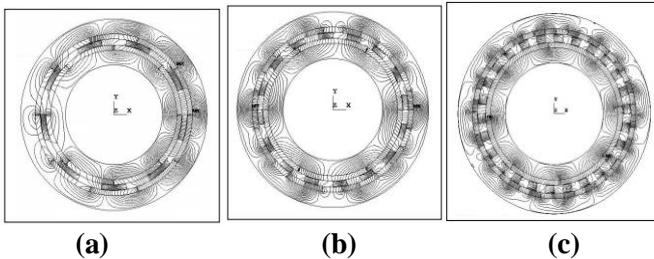
Gambar 2.22 Grafik Torsi yang Dihasilkan setelah Optimasi *Modulator*^[4]

Penelitian kedua adalah penelitian yang dilakukan oleh A.Rotondale, M.Villani dari *Dept. of Industrial and Information Engineering and Economics, University of L'Aquila L'Aquila, Italy* dan L.Castellini dari *Umbra Cuscinetti Research Center Albanella (SA), Italy*. Penelitian ini berupa menganalisis dan mensimulasikan

CMG pada kendaraan mobil listrik dengan metode Elemen Hingga (FEM). Variasi yang dilakukan adalah dengan mengubah rasio gigi dengan rincian sebagai berikut :

1. CMG1 with *low gear ratio* ($G=1.25$); $p_i=4$, $p_o=5$, $n_b=9$.
2. CMG2 with *medium gear ratio* ($G=4.3$); $p_i=3$, $p_o=13$, $n_b=16$.
3. CMG3 with *high gear ratio* ($G=5.5$); $p_i=4$, $p_o=22$, $n_b=26$.

Dimana p_i = jumlah *inner magnet*, p_o = jumlah *outer magnet* dan n_b = jumlah *ferromagnetic pole pieces*. Ketiga CMG ini memiliki dimensi diameter yang sama.

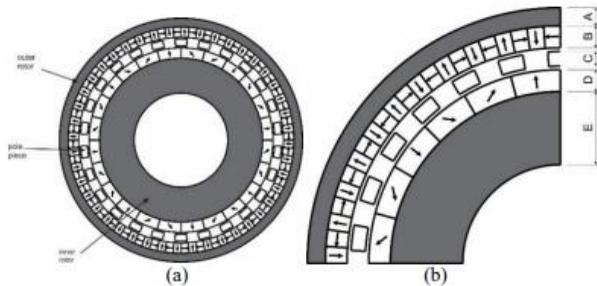


Gambar 2.23 Flux line distribution dari hasil Analisis CMG1 (a), CMG2 (b), CMG3 (c) [5]

Dari gambar (a) CMG1 tampak bahwa *flux line* yang dihasilkan tidak simetris dikarenakan pilihan jumlah *pole pieces* yang kurang tepat karena terdapat ruang kosong pada *outer rotor* akibat dari jumlah *outer rotor magnet* yang terlalu sedikit. Sedangkan untuk gambar (b) CMG2 dan (c) CMG3 hasil *flux line* nya terlihat simetris karena magnet pada *outer rotor* lebih banyak dan tidak ada ruang kosong. Pada CMG2 didapat kepadatan torsinya yaitu 80 KNm/m^3 sedangkan pada CMG3 didapat kepadatan torsinya yaitu lebih dari 100 KNm/m^3 dan rata-rata torsinya adalah 183 Nm pada *inner rotor* dan 1000 Nm pada *outer rotor*. Ini membuktikan bahwa CMG dapat diterapkan pada kendaraan mobil listrik yang memiliki putaran rpm yang tinggi dan torsi yang besar dengan catatan memiliki komposisi magnet *pole*

pieces dan *ferromagnetic* yang tepat. Analisis elemen hingga ini sangat berguna untuk menyempurnakan desain CMG dan dapat dilanjutkan dengan penyesuaian dimension atau pengoptimalan algoritmanya untuk mengurangi fenomena *cogging torque*.

Penelitian ketiga adalah penelitian yang dilakukan oleh Saian Nur Fajri , Ibnu Siswanto, dan Ahmad Mustamil Khoiron dari Universitas Negeri Semarang dan Universitas Negeri Yogyakarta. Penelitian ini menganalisis desain *coaxial magnetic gear* dengan *Halbach permanent-magnetic array* yang berupa *inner magnet rotor* medannya terkonsentrasi keluar sedangkan *outer magnet rotor* medannya terkonsentrasi ke dalam



Gambar 2.24 (a) Halbach Permanent Magnet Array (b) Parameter Desain^[6]

CMG ini memiliki 1 *input* dan 1 *output* dan berputar secara berlawanan arah. Rotational speed pada inner rotor (w_1) ditentukan oleh rasio *gear* dan rotational speed pada outer rotor ditentukan oleh:

$$Gr = \frac{w_1}{w_2} = \frac{p_1}{p_2} \quad (2.26)$$

$$Ns = p_1 + p_2 \quad (2.27)$$

Dimana : P_1 = jumlah *inner rotor magnet*

P_2 = jumlah *outer rotor magnet*

Ns = jumlah stationary pole pieces.

Dalam melakukan perancangan desain CMG, perlu

dipertimbangkan jumlah magnet di *inner* dan *outer rotor* agar CMG dapat bekerja secara optimal. Analisis dilakukan dalam software ANSYS Maxwell 2D dengan parameter sebagai berikut :

Tabel 2.5 Parameter Simulasi

Parameter	Value
Number of outer rotor pole pairs (P_1)	26
Number of inner rotor pole pairs (P_2)	4
Number of pole piece (N_s)	22
Diameter of outer rotor	140 mm
Diameter of inner rotor	62 mm
Air-gap length	1 mm
Radial length of outer rotor iron part (A)	5 mm
Radial length of outer rotor Permanent Magnet (B)	6 mm
Radial length of pole piece (C)	4 mm
Radial length of inner rotor Permanent Magnet (D)	7 mm
Radial length of inner rotor iron part (E)	15 mm

Sedangkan untuk spesifikasi material yang digunakan adalah Steel 1008 untuk *pole pieces* nya dan NdFeB35 untuk magnetnya. Untuk *rotational speed* nya yaitu 150 rpm untuk *inner rotor* dan -27,7 rpm untuk *outer rotor* karena berlawanan arah. Hasil dari simulasi tidak hanya torsi namun medan magnet dan *flux density*. Torsi yang dihasilkan sekitar 2261,55 Nm pada *outer rotor* dan 420,15 Nm untuk *inner rotor*.



Gambar 2.25 Grafik Torsi yang Dihasilkan^[6]

Grafik di atas menunjukkan torsi cenderung konstan karena putaran yang diberikan tidak bertahap sehingga torsi yang keluar juga besar. Sedangkan untuk medan magnet dan *flux density* dapat dilihat pada gambar dibawah ini

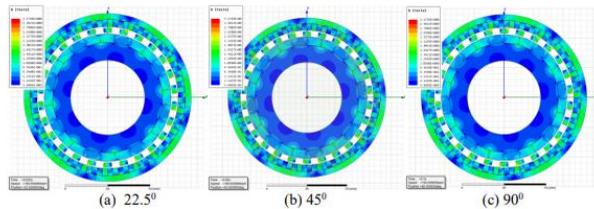


Figure 4. Magnetic flux density distribution at different angular position of magnetic gear

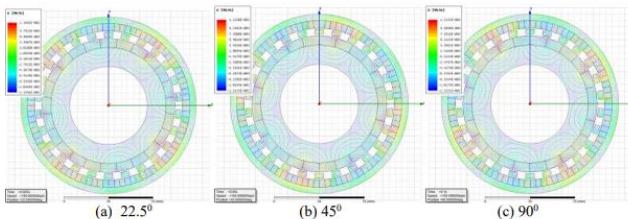


Figure 5. Magnetic field distribution at different angular position of magnetic gear

Gambar 2.26 Medan Magnet dan *Flux Density* pada Simulasi CMG^[6]

Gambar pertama menunjukkan distribusi *flux density* pada 3 variasi sudut yang berbeda. Perbedaan warna menunjukkan perubahan distribusi diantara magnet tersebut. Gambar kedua menunjukkan distribusi medan magnet pada 3 variasi sudut yang berbeda. Semakin gelap warna pada hasil simulasi magnet maka semakin sedikit *flux density* dan medan magnet yang timbul dalam CMG itu. Warna paling terang timbul diantara *inner* dan *outer rotor*.

2.14 Software Penelitian

2.14.1 Ansys Maxwell 3D

Finite element analysis (FEA) telah digunakan untuk mensimulasikan variasi pergerakan gear yang berbeda. *Maxwell* oleh *Ansoft*, digunakan dalam proyek ini. *Maxwell* menggunakan metode kerja virtual untuk menghitung torsi untuk benda bergerak dalam simulasi *transient*-nya. *Ansoft maxwell* juga salah satu program hebat untuk analisis elektromagnetik 2D dan 3D. Dengan menggunakan *maxwell package* kita dapat menghitung medan listrik statis, gaya, torsi, dan kapasitansi yang disebabkan oleh distribusi dan muatan voltase, medan magnet Statis, gaya, torsi, dan induktansi yang disebabkan oleh arus DC, medan magnet eksternal statis, dan magnet permanen, variasi waktu medan magnet, gaya, torsi, dan impedansi yang disebabkan oleh arus AC dan medan magnet eksternal yang berosilasi dan medan magnet transien yang disebabkan oleh sumber listrik dan magnet permanen.

2.14.2 SolidWorks Premium 2019

Software ini sudah sangat familiar dengan para mahasiswa terutama mahasiswa Teknik mesin yang sering menggunakannya untuk melakukan desain suatu produk. *Software* ini cukup simple dan tidak terlalu ribet ketika digunakan. Fiturnya juga cukup lengkap untuk mendesain *coaxial magnetic gear* secara detail. Hasil dari gambar CMG juga dapat diimport ke ANSYS Maxwell 3D kemudian disimulasikan medan magnet dan gerakannya dan disimpan dalam bentuk file STEP atau STL. Walaupun terkadang filenya mengalami *corrupt* karena keterbatasan dari ANSYS Maxwell 3D dalam mengolah datanya. Dalam perancangan desain CMG, peneliti dibantu oleh mahasiswa S2 Teknik Mesin ITS yaitu Idabagus Putu Putra Mahartana.

2.14.3 MATLAB Sinscape

MATLAB adalah kependekan dari MATrix LABoratory dikarenakan setiap data pada MATLAB menggunakan dasar matriks. MATLAB adalah bahasa pemrograman tinggi, tertutup,

dan *case sensitive* dalam lingkungan komputasi numerik yang dikembangkan oleh MathWorks. Salah satu kelebihanannya yang paling populer adalah kemampuan membuat grafik dengan visualisasi terbaik. MATLAB mempunyai banyak *tools* yang dapat membantu berbagai disiplin ilmu. Ini merupakan salah satu penyebab industri menggunakan MATLAB. Selain itu MATLAB mempunyai banyak *library* yang sangat membantu untuk menyelesaikan permasalahan matematika seperti membuat simulasi fungsi, pemodelan matematika dan perancangan GUI.

Software ini digunakan untuk membuktikan torsi yang dihasilkan oleh *coaxial magnetic gear* (CMG) mampu menerima beban dari bus listrik dan dapat menggerakkan bus tersebut tanpa terjadi *slip*. Disusun *block-block* yang terdiri dari komponen *drivetrain* bus listrik meliputi baterai, motor listrik, transmisi CMG, differential, dan roda yang nantinya akan dimasukan parameter-parameter di tiap komponen tersebut. Setelah dimasukan semua maka akan keluar hasil grafik untuk membuktikan bahwa penggantian transmisi gear konvensional ke CMG efektif atau tidak.

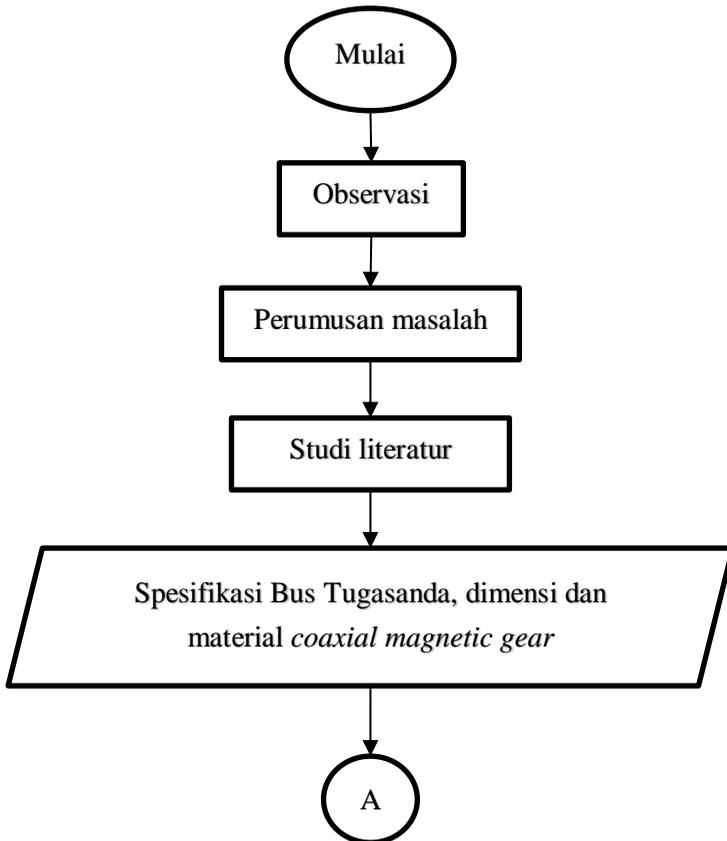
(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

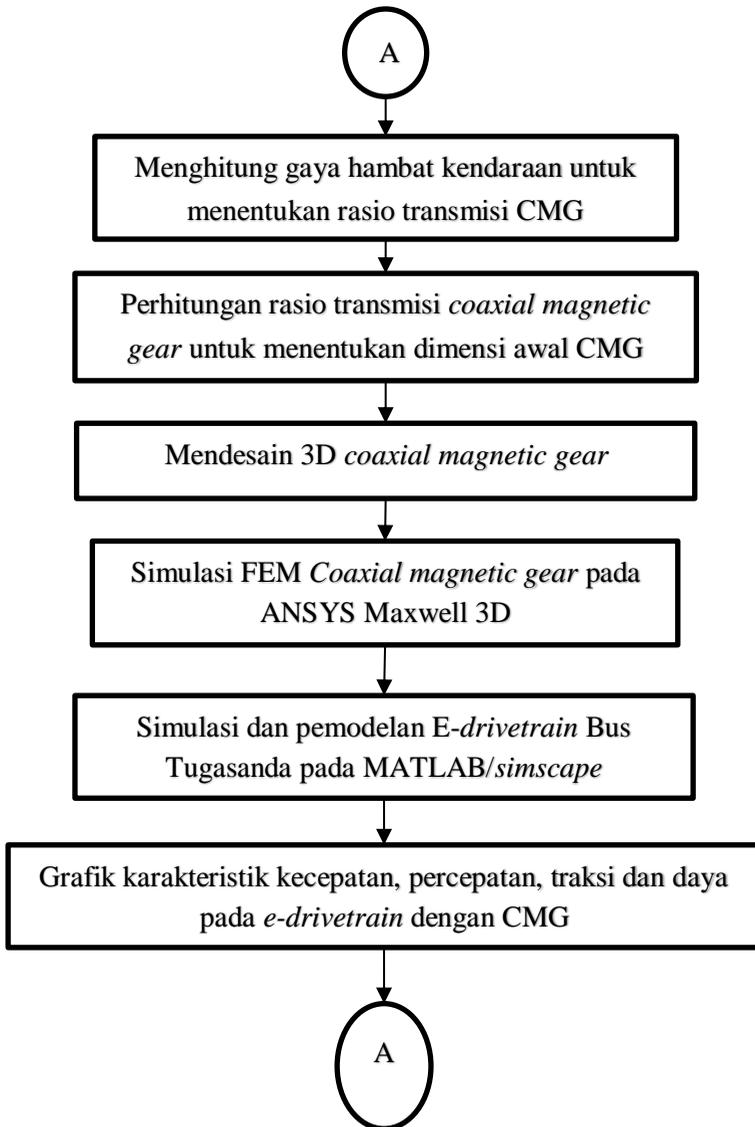
METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini terdapat beberapa tahapan yang dilakukan. Pada bab ini akan dibahas tahapan-tahapan yang dilakukan beserta detailnya dalam melakukan penelitian ini.

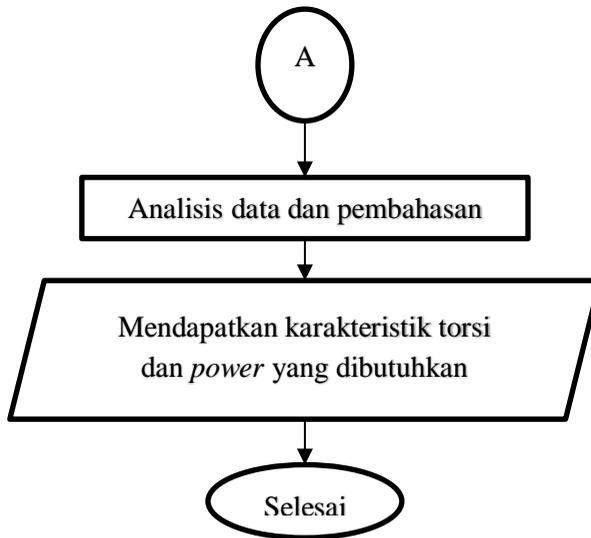
3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir (sambungan)



Gambar 3.1 Flowchart Pengerjaan Tugas Akhir (sambungan)

Gambar 3.1 merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan penulis dalam penulisan laporan ini. Penjelasan secara lebih rinci bagian dari flowchart diatas adalah sebagai berikut:

3.1.1 Observasi

Observasi merupakan langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini. Tujuan dilakukan observasi adalah menentukan ruang lingkup permasalahan yang akan dijadikan penelitian. Dalam hal ini, observasi dilakukan pada lingkup *Coaxial Magnetic Gear*.

3.1.2 Perumusan Masalah

Setelah observasi dilakukan, dilakukan perumusan masalah yang terdapat pada lingkup observasi yang dilakukan. Permasalahan yang akan diteliti adalah potensi yang dimiliki oleh *coaxial magnetic gear* untuk menggantikan roda gigi konvensional. Untuk itu, rumusan masalah yang telah ditentukan adalah Rancang

Bangun Model *Coaxial Magnetic Gears* Pada Sistem Transmisi Daya Bus Listrik Tugasanda.

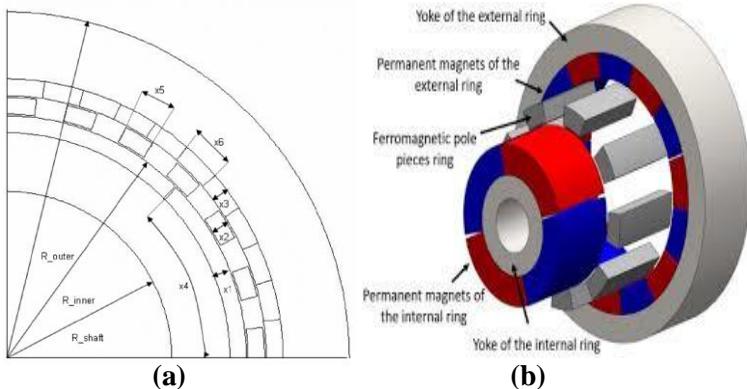
3.1.3 Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan informasi yang lebih detail untuk menunjang penelitian yang akan dilakukan. Informasi yang dicari berupa dasar teori roda gigi, *magnetic gear*, karakteristik magnet permanen, metode elemen hingga dan penelitian terdahulu yang telah dirangkum.

3.1.4 Penentuan Data Awal

3.1.4.1 *Coaxial Magnetic Gear*

Data awal yang digunakan berasal dari spesifikasi *Coaxial Magnetic Gear* desain dari paper *Rotonlande*. Dari spesifikasi tersebut, diambil parameter dimensi dan torsi yang mampu ditransmisikan. Spesifikasi tersebut yang menjadi dasar perancangan *coaxial magnetic gear*.



Gambar 3.2 Dimensi *Coaxial Magnetic Gear* (a) Struktur Dasar *Coaxial Magnetic Gear* (b)

Tabel 3.1 Spesifikasi Coaxial Magnetic Gear

Shaft radius (R_{shaft})	mm	16
PM thickness inner rotor (x_1)	mm	10
Pole pieces thickness (x_2)	mm	10
PM thickness outer rotor (x_3)	mm	10
PM widthness inner rotor (x_4)	mm	8
Pole pieces widthness (x_5)	mm	20
PM widthness outer rotor (x_6)	mm	25
Airgap length	mm	1
Permanent magnet – NdFeB		800-50A
Electrical steel		$B_r = 1.16T, H_c = 900 \text{ kA/m}$ at 20°C

3.1.4.2 Bus Tugasanda

Data awal mobil Toyota adalah sebuah bus ukuran $\frac{3}{4}$ yang dirancang oleh karoseri Tugasanda. Kerja sama ITS dengan karoseri ini adalah dengan mengonversi dari bus bertenaga bahan bakar fosil menjadi mobil listrik seperti ditunjukkan pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Data Spesifikasi Bus Tugasanda

DIMENSI / DIMENSION (MM)		NQR 71		REM / BRAKE		NQR 71	
Panjang / Overall Length (OAL)	mm	7,445		Tipe / Type Hydraulic Brake Booster			
Lebar / Overall Width (OW)	mm	2,100		Depan / Front			
Tinggi / Overall Height (OH)	mm	1,630		Lebar / Width mm 120			
Jarak Sumbu / Wheel Base (WB)	mm	4,175		Diameter mm 320			
Tinggi Min dari Tanah / Min. Clearance (HH)	mm	215		Belakang / Rear			
Jarak Pijak Depan / Front Tread	mm	1,670		Lebar / Width mm 120			
Jarak Pijak Belakang / Rear Tread	mm	1,650		Diameter mm 320			
Jalur Depan / Front Over Hang (FOH)	mm	1,170		BERAT / WEIGHT			
Jalur Belakang / Rear Over Hang (ROH)	mm	2,100		Berat Bruto / Gross Vehicle Weight (GVW) kg 8,000			
MESIN / ENGINE				RODA / TYRE			
Model		4HG1-T		Ban Depan / Front Tyre Single 7.50-16-14PR			
Diameter x Langkah / Bore x Stroke	mm	115 x 110		Ban Belakang / Rear Tyre Double 7.50-16-14PR			
Isi Silinder / Piston Displacement	cc	4,570		Velg / Disc Wheel Size 16 x 6,00			
Tenaga / Max. Power	PS/rpm	125 / 2,900		LAIN-LAIN / OTHERS			
Torsi / Max. Torque	Kgm/rpm	35 / 1,200 - 2,200		Kapasitas Tangki / Fuel Tank Capacity lt 100			
TRANSMISI / TRANSMISSION				Radius Putar / Min. Turning Radius m 7,7			
Model		MYYST		Max. Gradeability % 31			
Perbandingan Gigi / Gear Ratio		1st 5,315		Kecepatan Maksimum / Max. Speed Km/h 110			
		2nd 3,053		Aki / Accu V-AH 12-60 x 2			
		3rd 1,655		Alternator V-A 24-60			
		4th 1,000		Power Steering Ada			
		5th 0,721		Exhaust Brake Ada			
		Rev. 5,068		Suspension soft spring Ada			
Perbandingan Gigi Akhir / Final Gear Ratio		6,142		Regulasi Emisi Euro-2			

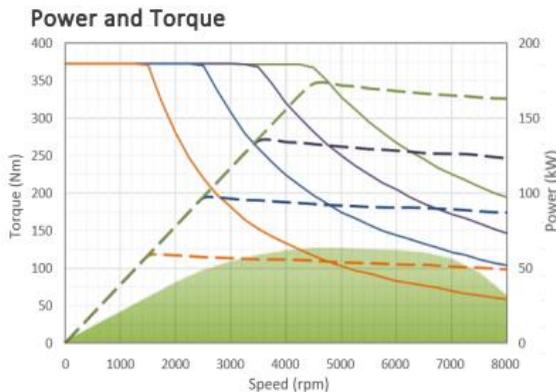
3.1.4.3 Motor Listrik BLDC

Pada era sekarang ini motor DC atau arus searah dikembangkan tanpa menggunakan sikat yang dikenal dengan Motor BLDC (*Brushless Direct Current Motor*). Motor arus searah adalah sebuah motor yang membutuhkan tegangan searah untuk menjalankannya yang terlihat pada gambar 3.3. Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya *brush*. Berikut ini adalah data spesifikasi motor BLDC yang dipakai dalam penelitian ini;

Tabel 3.3 Data spesifikasi BLDC Motor Yasa 400

Charateristic Yasa P400	Performance
<i>Peak Torque</i>	370 Nm
<i>Peak Power</i>	160 kW
<i>Speed</i>	0-8000 rpm
<i>Peak Efficiency</i>	96%
<i>Voltage for 50 kW</i>	250 V
<i>Dry Mass</i>	28,2 Kg

Adapun karakteristik torsi pada setiap *range* putaran rpm motor BLDC Yasa P400 adalah sebagai berikut :





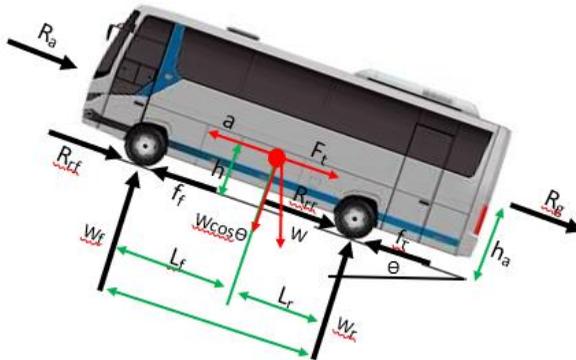
Gambar 3.3 Grafik Torsi terhadap Kecepatan BLDC Motor Yasa P400^[13]

3.1.5 Menghitung Gaya Hambat Kendaraan

Langkah pertama adalah menentukan variasi kecepatan kendaraan dan menghitung luas frontal kendaraan, langkah kedua adalah menentukan koefisien drag yang sesuai berdasarkan parameter awal, langkah ketiga adalah menghitung gaya hambat aerodinamis kendaraan, langkah keempat adalah menentukan koefisien rolling resistance ban berdasarkan tekanan ban kendaraan, langkah kelima adalah menghitung gaya hambat tanjakan kendaraan berdasarkan variasi sudut yang ditentukan, langkah keenam adalah menghitung gaya hambat total yang terjadi pada kendaraan. Berikut adalah dinamika kendaraan bus beserta rumus untuk perhitungan gaya hambatnya:

$$R_{AE} = \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V_A^2 \quad (3.1)$$

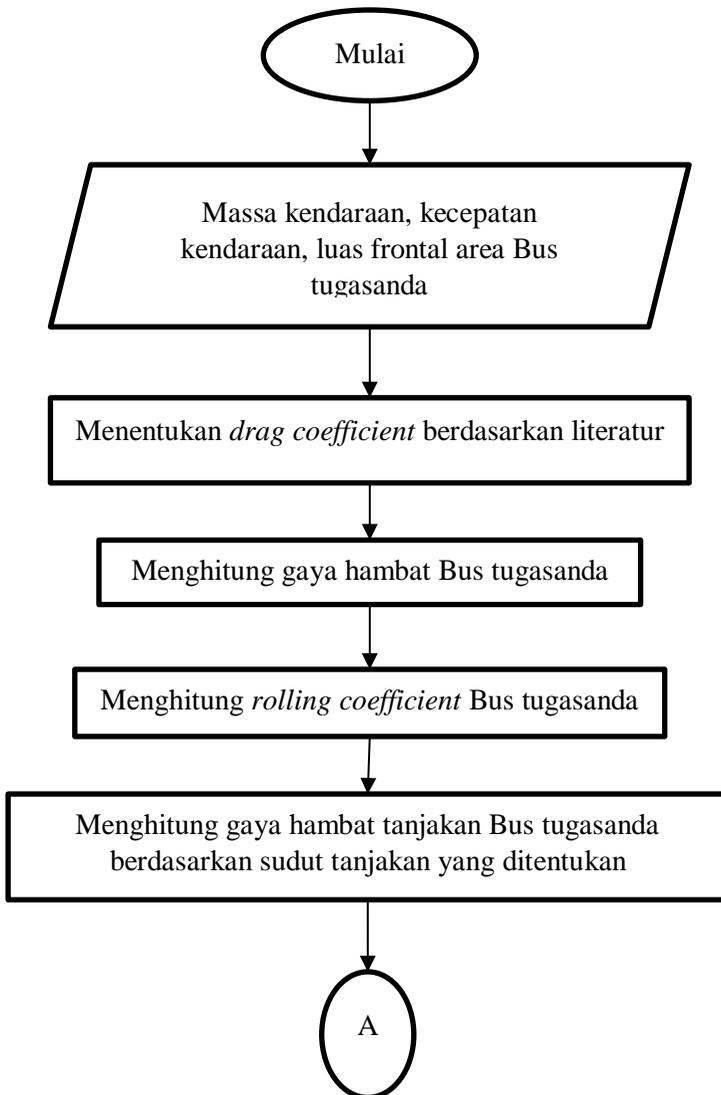
Dimana: ρ = densitas udara
 A_f = luasan frontal kendaraan
 C_D = koefisien gaya hambat aerodinamika (*Drag Coefficient*)
 V_A = kecepatan relatif udara dengan kendaraan



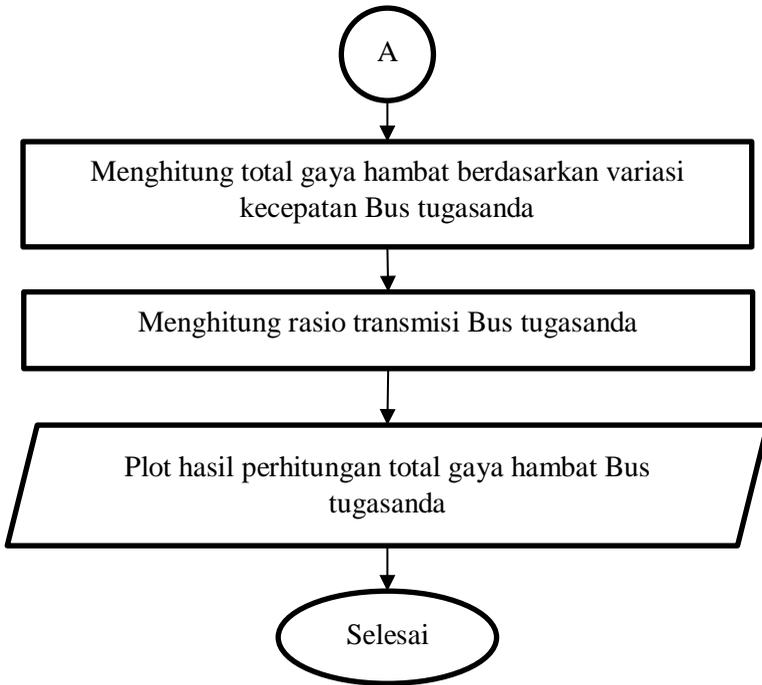
Gambar 3.4 Dinamika Kendaraan Bus Tugasanda^[11]

3.1.6 Menghitung Rasio Gigi Kendaraan

Sebelum dilakukan pemodelan 3D *coaxial magnetic gear*, terlebih dahulu dilakukan perhitungan rasio gigi transmisinya agar dapat diketahui dimensi totalnya. Dimensi total sangat mempengaruhi efisiensi ruang dan massa dimana dua hal tersebut juga mempengaruhi performanya. Berikut adalah diagram alir perhitungan rasio gigi untuk transmisi *coaxial magnetic gear*:



Gambar 3.5 Diagram Alir Perhitungan Gaya Hambat Kendaraan



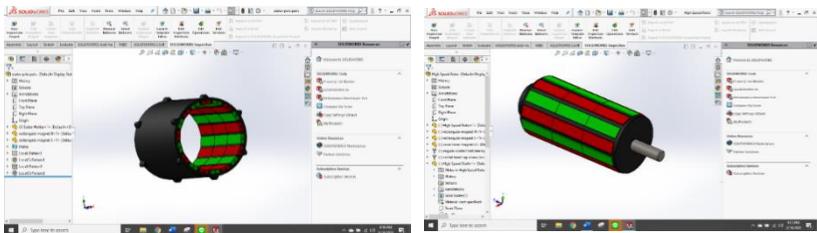
Gambar 3.5 Diagram Alir Perhitungan Gaya Hambat Kendaraan (lanjutan)

Sebelum dilakukan perancangan 3D *coaxial magnetic gear*, harus diketahui rasionya terlebih dahulu. Untuk menghitung rasio maka perlu dilakukan perhitungan gaya hambat kendaraan. Langkah-langkah yang digunakan dalam perhitungan gaya hambat kendaraan ini adalah sebagai berikut: Menentukan variasi kecepatan kendaraan, menentukan koefisien drag yang sesuai, menghitung gaya hambat aerodinamis, menentukan koefisien rolling resistance, menghitung gaya hambat rolling kendaraan berdasarkan variasi sudut, menghitung gaya hambat tanjakan yang

terjadi pada kendaraan, menghitung gaya hambat total yang terjadi pada kendaraan. Langkah tersebut sesuai dengan gambar 3.6.

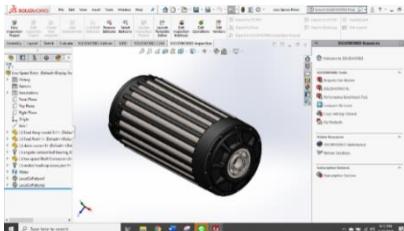
3.1.7 Pemodelan 3D *Coaxial Magnetic Gear*

Setelah ditemukan rasio transmisinya, Langkah selanjutnya adalah dilakukan perancangan model 3D *Coaxial Magnetic Gear* dengan program *SolidWorks* 2019 Terdapat bagian-bagian yang dibuat yaitu *Inner Rotor*, *Outer rotor*, *pole piece* dan *stationary pole pieces*. Berikut penjelasan lebih detail dari pemodelan 3D:



(a)

(b)



(c)

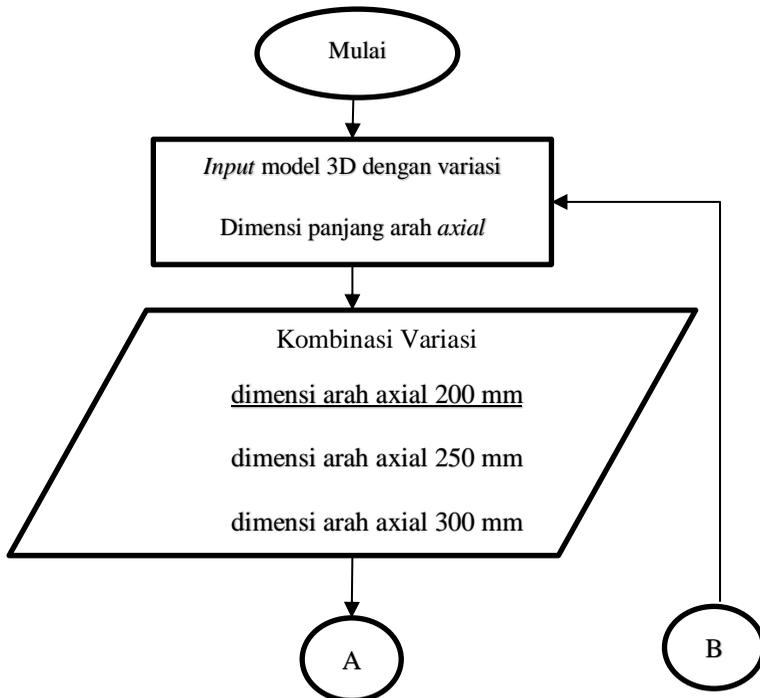


(d)

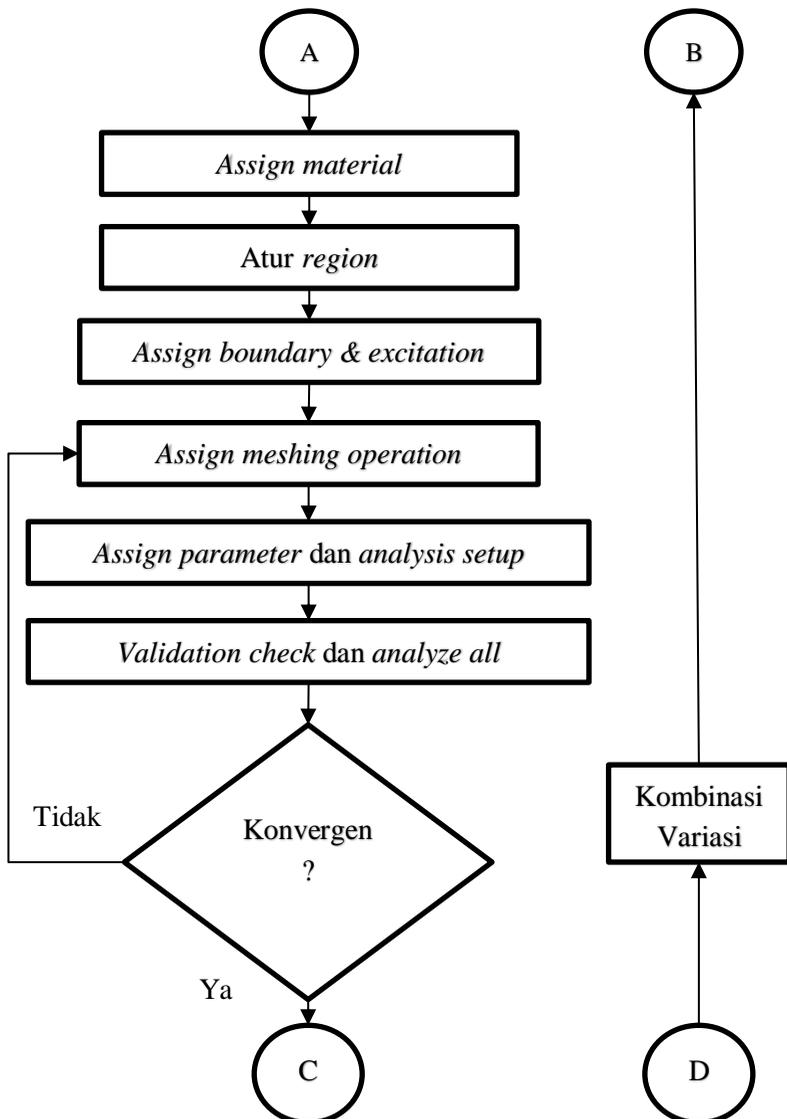
Gambar 3.6 Komponen CMG (a) *Outer Rotor* (b) *Stationary Pole Pieces* (c) *Inner Rotor* (d) CMG diaplikasikan pada Bus

3.1.8 Pemodelan FEM (*Finite Element Methode*)

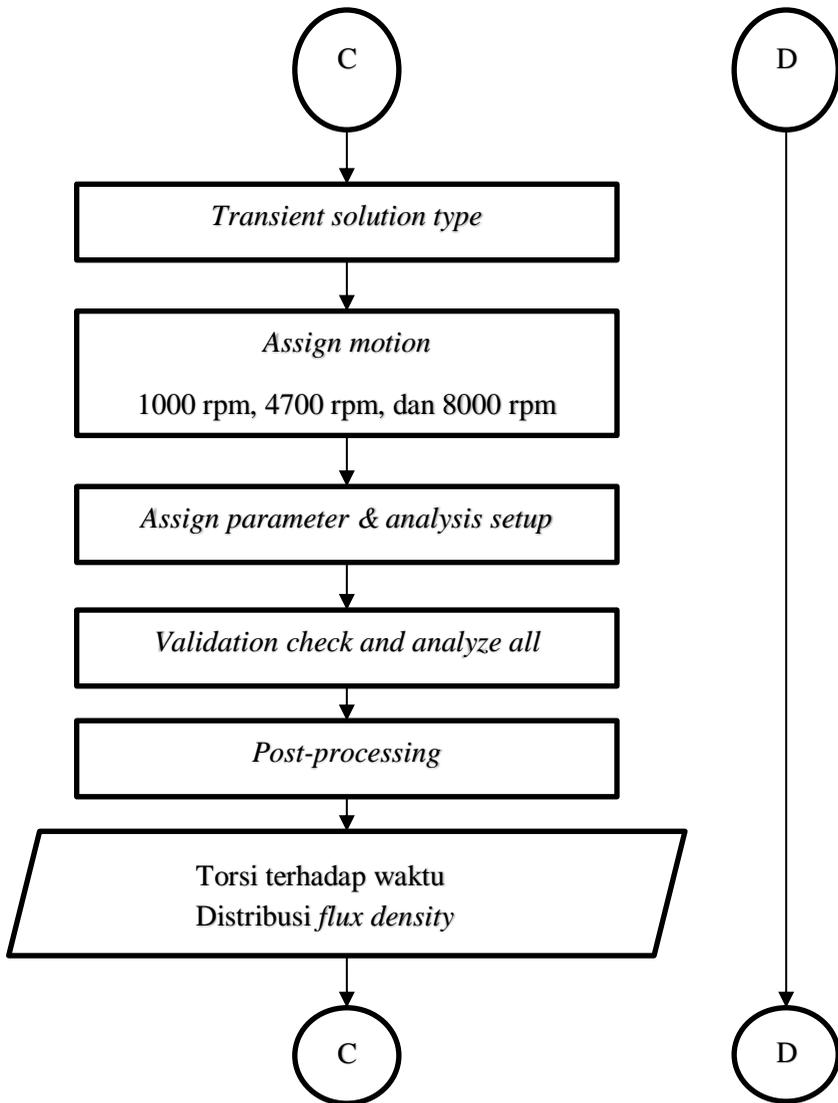
Setelah desain 3D *coaxial magnetic gear* selesai, dilakukan simulasi 3D FEM pada *software ANSYS Maxwell 3D* dengan metode *transient* dan *magentostatic*. Penyelesaian *transient* dilakukan dengan basis waktu. Dari simulasi ini akan didapatkan hasil berupa *static magnetic field (H)*, *current density (J)* dan *magnetic flux density (B)*. Selain itu, didapatkan juga besaran turunan seperti gaya dan torsi. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan pada simulasi FEM akan dijelaskan sebagai berikut :



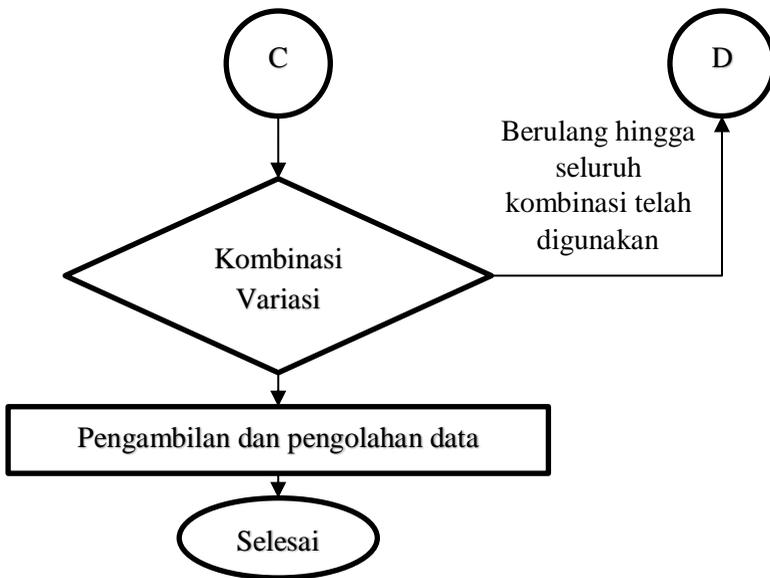
Gambar 3.7 Diagram Alir Tahapan Simulasi Penelitian



Gambar 3.7 Diagram Alir Tahapan Simulasi Penelitian (lanjutan)



Gambar 3.7 Diagram Alir Tahapan Simulasi Penelitian (lanjutan)



Gambar 3.7 Diagram Alir Tahapan Simulasi Penelitian (lanjutan)

Gambar 3.7 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan simulasi penelitian ini. Simulasi menggunakan *software* ANSYS Maxwell v19. Penjelasan tentang tiap tahapan adalah sebagai berikut:

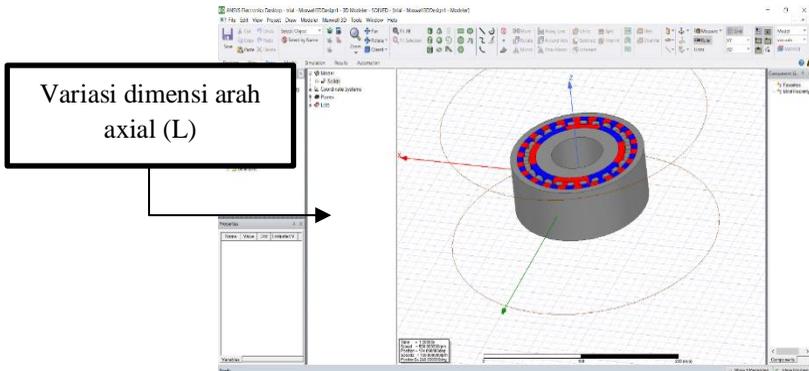
3.1.8.1 Input Model 3 Dimensi

Untuk melakukan *input* model 3 dimensi, hal yang pertama dilakukan adalah membuka *software* ANSYS Electronics v19 kemudian pilih *project* Maxwell 3D Design. *Input* model 3 dimensi terdapat pada *menu* Modeler. Bagian *coaxial magnetic gear* yang harus dimasukkan adalah *inner rotor*, *outer rotor*, *stationary pole piece* dan magnet permanen. Penyusunan model dilakukan dengan variasi jumlah magnet permanen seperti pada tabel 3.1. Penyusunan dilanjutkan dengan mengatur variasi yaitu dimensi

arah axial atau panjang CMG dengan rasio yang sama pada setiap variasi. Untuk jumlah magnet pada *inner* dan *outer rotor* serta *stationary pole piece* menyesuaikan dengan rasio dan diameter CMG. Berikut adalah tabel input variasi dimensi arah axial CMG:

Tabel 3.4 Variabel simulasi rasio gigi dan dimensi arah *axial*

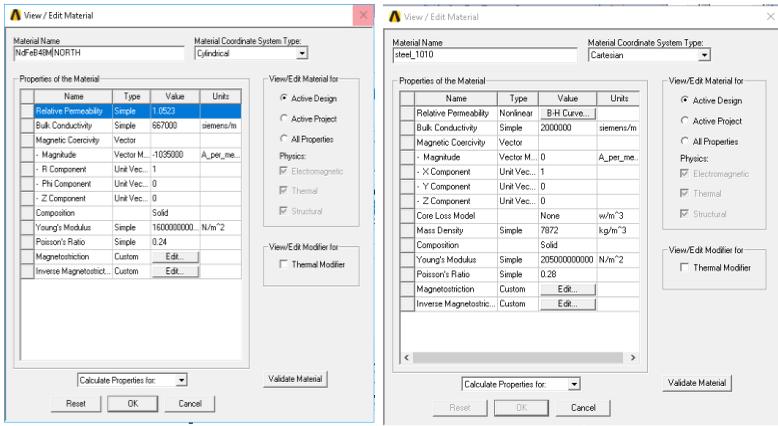
No	Rasio Gigi	Jumlah Total Magnet	Jumlah <i>Pole Piece</i>	Dimensi arah axial (mm)
1				200
2				250
3				300



Gambar 3.8 Hasil *Input* dan *Assembly 3D Model*

3.1.8.2 Assign Material

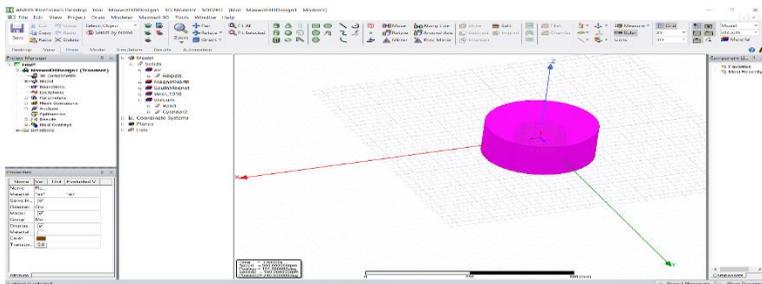
Setelah memasukkan model ke dalam *project*, dilakukan *assign material* yang berfungsi memberikan material pada model. Material yang digunakan berasal dari *library* ANSYS Electronics v19. Material *pole piece* adalah *steel 1010*, sedangkan magnet *Inner rotor*, *outer rotor* menggunakan NdFeB35. *Properties* untuk tiap material terdapat pada gambar 3.9.



Gambar 3.9 Material Properties (a) Steel 1010 (b) NdFeB35

3.1.8.3 Atur Region

Region adalah daerah di sekitar *coaxial magnetic gear* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. Pembuatan *region* dilakukan dengan membuat model 3D berbentuk silinder dengan ukuran tertentu dan diatur sebagai daerah berisikan udara seperti pada gambar 3.10.



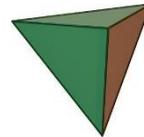
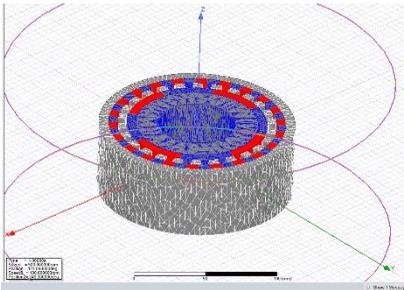
Gambar 3.10 Pembuatan Region

3.1.8.4 Assign Boundary & Excitation

Kemudian pengaturan *Eddy Current Boundaries* pada *excitation*. *Excitation* yang diatur yaitu pada bagian *set eddy effect* ke mode *default* dimana seluruh komponen magnet dianggap tidak mengalami *eddy effect*. Hal ini berarti komponen magnet tersebut merupakan magnet permanen yang memiliki medan magnet (H) yang secara kontinu melewati batas *boundary*.

3.1.8.5 Assign Meshing Operation

Selanjutnya, pengaturan *mesh* pada setiap model 3 dimensi. Bentuk *meshing* volume yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe tetrahedra. Sedangkan metode *mesh* yang digunakan yaitu *Mesh inside selection, length based*.

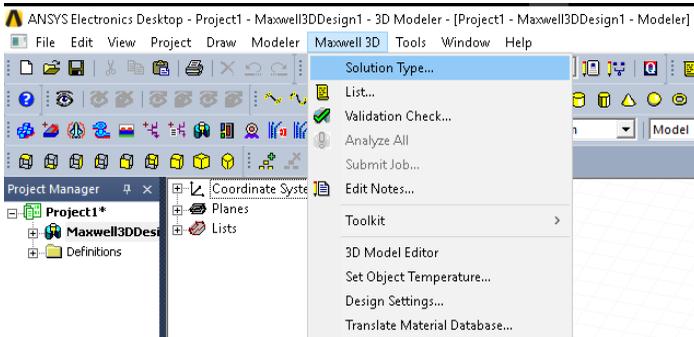


Gambar 3.11 Bentuk Meshing

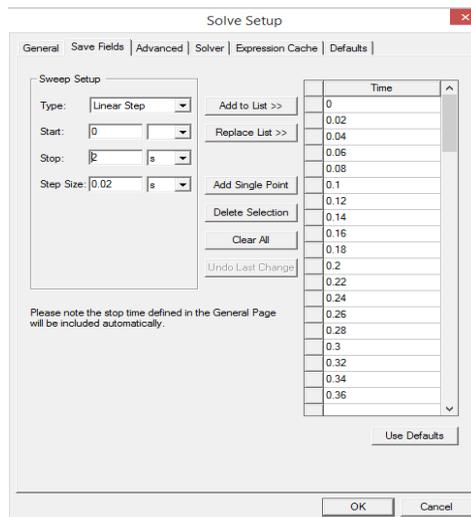
3.1.8.6 Assign Parameter dan Analysis Setup

Assign Parameter berfungsi untuk menentukan parameter yang nantinya dihasilkan dari simulasi. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah torsi. Selanjutnya adalah pengaturan analisis yang dilakukan *software*. Pada penyelesaian *magnetostatic*, pengaturan ini bertujuan untuk mencapai hasil analisis yang konvergen. Metode yang digunakan adalah *adaptive*

passes sebanyak 10 dengan *error* sebesar 1% sedangkan pada penyelesaian *transient*, pengaturan ini berfungsi untuk mengatur lama pengambilan data dan *timeframe* pengambilan data. Lama pengambilan data sebesar 2 detik dan pengambilan data setiap 0,02 detik sesuai dengan arahan dari penelitian milik Saian Nur Fajri^[6]



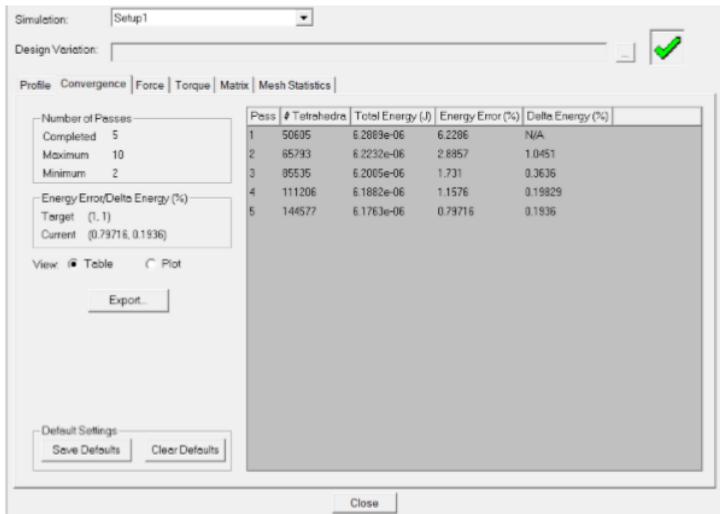
Gambar 3.12 Pemilihan Solusi Simulasi *Menu Maxwell 3D*



Gambar 3.13 Pengaturan Analisis *Transient*

3.1.8.7 Iterate

Setelah menentukan *Setup Analysis* langkah berikutnya adalah *iterate*, yang bertujuan untuk mengetahui apakah panjang mesh yang ditentukan telah mencapai kriteria konvergen. Jika hasil analisis tidak mencapai kriteria untuk dianggap konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada meshing yang telah dibuat ditunjukkan dengan gambar 3.14.



Simulation: [Setup]

Design Variation: [] [✓]

Profile: Convergence | Force | Torque | Matix | Mesh Statistics

Number of Passes:
 Completed: 5
 Maximum: 10
 Minimum: 2

Energy Error(Delta Energy (%))
 Target: (1, 1)
 Current: (0.79716, 0.1936)

View: Table Plot

Export: []

Default Settings:
 Save Defaults [] Clear Defaults []

Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)
1	50605	6.2089e-06	6.2286	N/A
2	65793	6.2232e-06	2.8957	1.0451
3	85535	6.2005e-06	1.731	0.3636
4	111206	6.1862e-06	1.1576	0.19829
5	144577	6.1763e-06	0.79716	0.1936

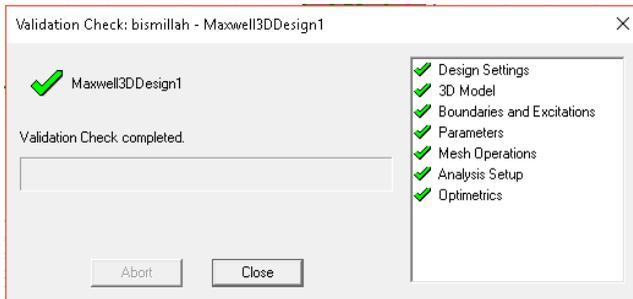
Close []

Gambar 3.14 Hasil Analisis Mesh

3.1.8.8 Validation Check & Analyze All

Sebelum dilakukan analisis, terdapat proses validasi apakah model sudah siap untuk dianalisis. Apabila telah memenuhi seluruh kriteria yang ada, maka simulasi dapat dilanjutkan ke tahap analisis. Pada penyelesaian magnetostatic, *software* akan melakukan iterasi seperti yang sudah kita atur sebelumnya hingga hasil analisis yang konvergen tercapai. Jika hasil analisis tidak mencapai konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada

meshing yang telah dibuat. Pada penyelesaian *transient*, hasil analisis akan diambil dari *timeframe* yang telah ditentukan dengan salah satu *coaxial magnetic gear* diatur berputar pada kecepatan tertentu.



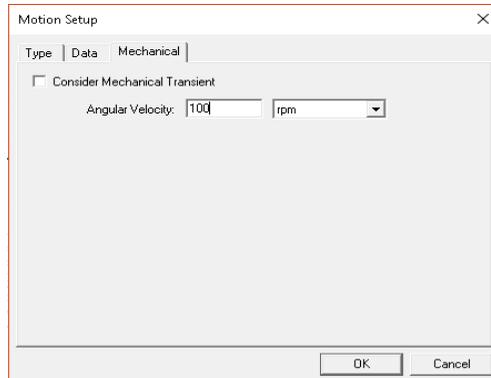
Gambar 3.15 Tahap Validation Check

3.1.8.9 Transient Solution Type

Setelah hasil analisis mencapai konvergen, maka langkah selanjutnya adalah simulasi dengan penyelesaian *transient*. Penyelesaian *transient* diatur melalui *sub menu* Solution Type pada *menu* Maxwell 3D.

3.1.8.10 Assign Motion

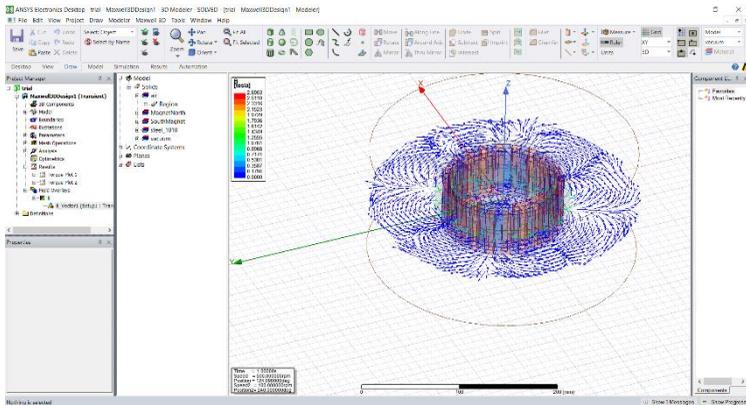
Untuk melanjutkan simulasi dengan penyelesaian *transient*, dibutuhkan satu buah *angular magnetic bevel gear* sebagai *driver* dan pasangannya sebagai *driven*. *Assign motion* berfungsi untuk mengatur pergerakan model. Pada penelitian ini, dibutuhkan gerak rotasi dengan kecepatan sudut yaitu 1000 rpm untuk putaran bawah, 4700 rpm untuk putaran menengah dan 8000 rpm untuk putaran atas. Ini didapat dari grafik rpm terhadap daya motor listrik Yasa P400 75 kW.



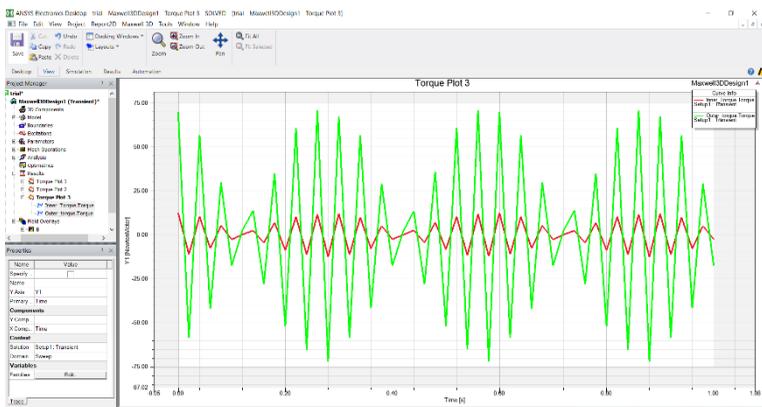
Gambar 3.16 Assign Motion

3.1.8.11 Post Processing

Tahap *post-processing* merupakan tahap pengambilan hasil simulasi. Setelah proses simulasi dan analisis 3D *finite element* selesai, kita akan mendapatkan data mengenai *flux density* (B) untuk penyelesaian *magnetostatic* dan torsi yang dihasilkan *coaxial magnetic gear* untuk penyelesaian *transient*. Pada gambar 3.15, terlihat anak panah yang menunjukkan vektor dari *flux density* disertai warna yang menunjukkan besar *flux density*. Setelah mendapatkan hasil ini, akan dibandingkan besar *flux density* tiap variasi untuk melihat perbedaan yang ada dan dihubungkan dengan hasil torsinya. Pada gambar 3.16, terdapat dua grafik dimana warna merah mewakili *source magnetic gear* dan warna hitam mewakili *drive magnetic gear*.



Gambar 3.17 Nilai dan Arah Vektor Flux Density



Gambar 3.18 Grafik Torsi terhadap Waktu

3.1.8.12 Pengambilan dan Pengolahan Data

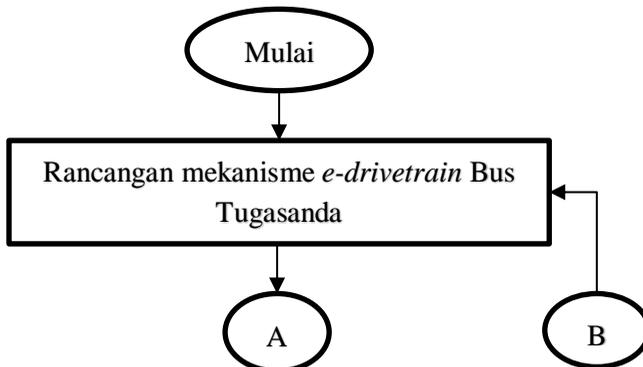
Setelah tahap *post-processing* selesai, data dari simulasi kemudian dikumpulkan dari semua variasi dan diolah sebelum dilakukan analisis dan pembahasan

Tabel 3.5 Perancangan Simulasi *Coaxial Magnetic Gear* dengan Variasi Dimensi Arah Axial (mm) dan Kecepatan Angular (rpm)

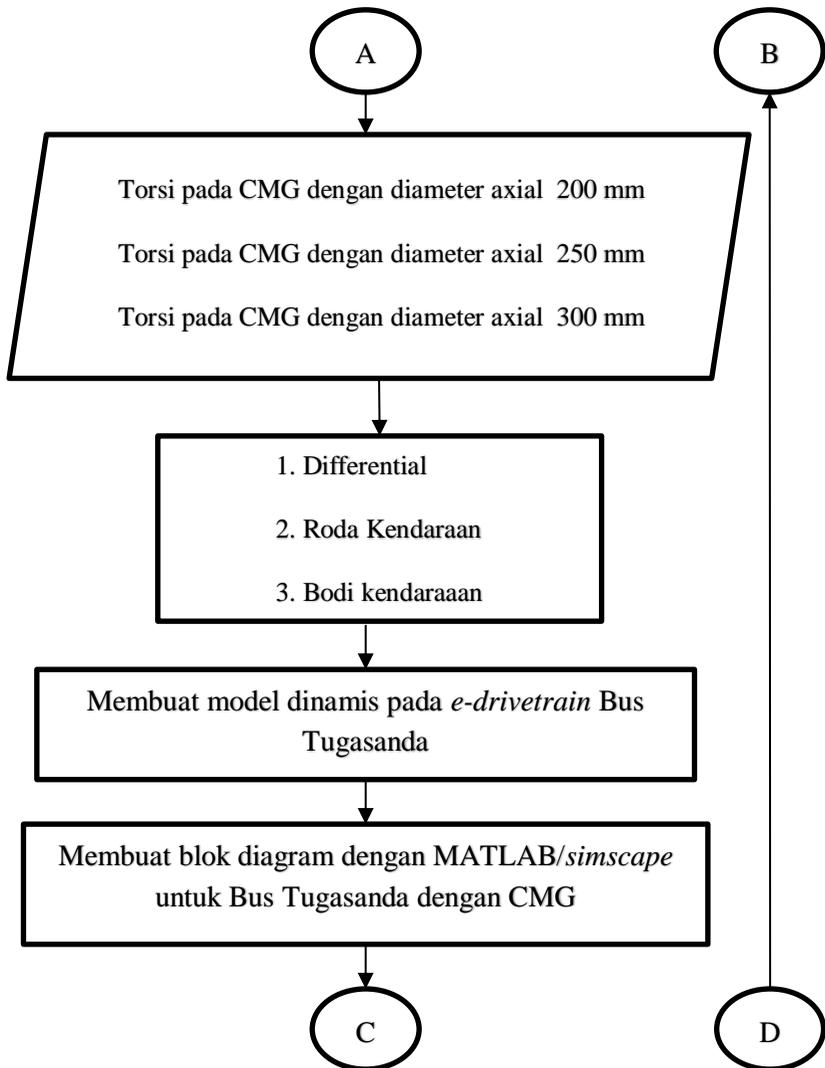
No	Rasio gigi	Dimensi arah axial (mm)	Kecepatan Angular (rpm)	Torsi yang mampu ditransmisikan (Nm)
1		200	1000	
2			4700	
3			8000	
4		250	1000	
5			4700	
6			8000	
7		300	1000	
8			4700	
9			8000	

3.1.9 Simulasi dan Pemodelan *E-drivetrain*

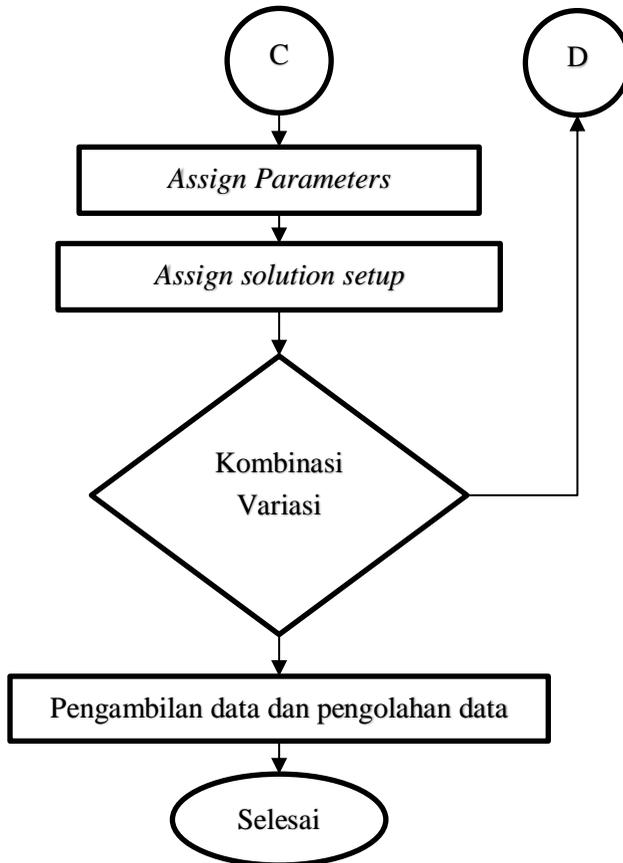
Output dari simulasi pada 3D FEM software ANSYS Maxwell 3D berupa torsi output *coaxial magnetic gear* kemudian hasil tersebut dijadikan sebagai parameter dalam melakukan simulasi dan pemodelan *E-drivetrain* Bus tugasanda. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan pada simulasi e-drivetrain akan dijelaskan sebagai berikut :



Gambar 3.19 Diagram Simulasi *Drivetrain Coaxial Magnetic Gear*



Gambar 3.19 Diagram Simulasi *Drivetrain Coaxial Magnetic Gear* (lanjutan)



Gambar 3.19 Diagram Simulasi *Drivetrain Coaxial Magnetic Gear* (lanjutan)

Flowchart di atas merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan simulasi penelitian ini. Simulasi menggunakan *software* MATLAB/Simscape. Penjelasan tentang tiap tahapan adalah sebagai berikut:

3.1.9.1 Rancangan *E-Drivetrain* Bus Tugasanda

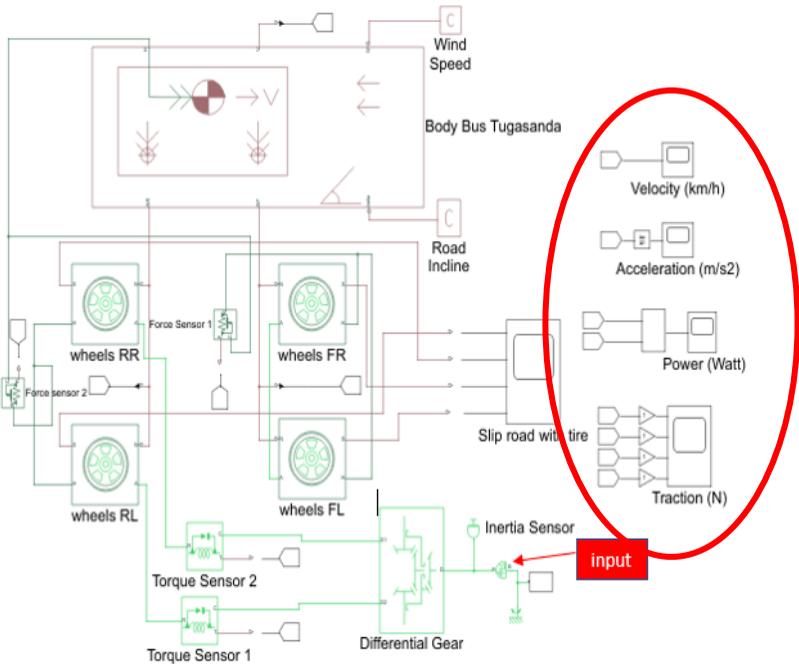
Penentuan konsep rancangan dilakukan untuk menentukan konfigurasi awal dalam perancangan kendaraan yang akan dibangun seperti gambar 3.20.

3.1.9.2 Input FEM Torsi *Coaxial Magnetic Gear*

Setelah didapat hasil torsi dari simulasi sebelumnya, maka perlu dibuat persamaan *block diagram* yang merepresentasikan *E-drivetrain* pada Bus Tugasanda. Kemudian hasil dari simulasi pada ANSYS Maxwell 3D di input ke dalam Blok diagram pada MATLAB/*simscape*.

3.1.9.3 Blok Diagram MATLAB/*Simscape E-Drivetrain* Bus Tugasanda

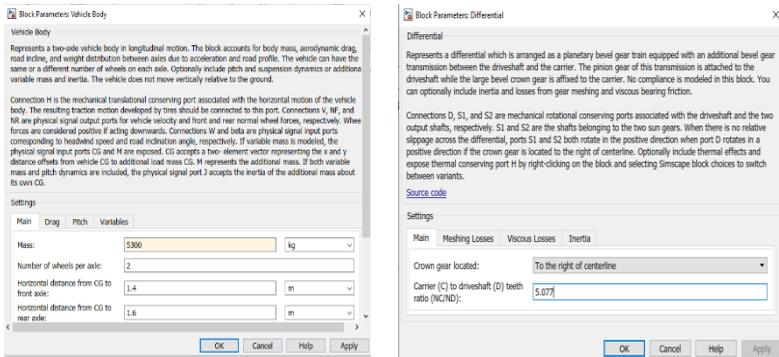
Hasil FEM torsi *coaxial magnetic gear* kemudian diinput ke *block diagram*. *Block diagram* terdiri *differential*, roda kendaraan, dan bodi kendaraan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan software MATLAB/*Simscape*. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian dari pemodelan *E-drivetrain* Bus Tugasanda. Struktur utama dari blok diagram ini adalah *differential*, roda belakang, dan bodi bus Tugasanda.



Gambar 3.20 Blok Diagram MATLAB/Simulink

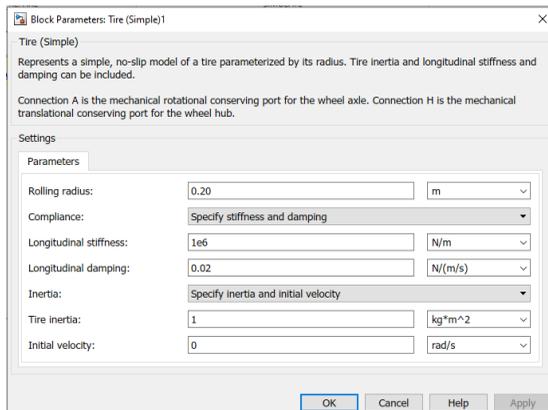
3.1.9.4 Assign Parameter

Assign Parameter berfungsi untuk menentukan parameter yang nantinya dihasilkan dari simulasi. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah bodi Bus Listrik Tugasanda, *differential*, dan, roda kendaraan.



(a)

(b)



(c)

Gambar 3.21 Input Parameter (a) Parameter Bodi Bus Tugasanda (b) Parameter Differential dan (c) Parameter Roda

3.1.9.5 Pengambilan dan Pengolahan Data

Grafik hasil simulasi yang didapatkan kemudian dilakukan analisis data dan pembahasan sesuai dengan dasar teori yang ada

sebelumnya. Sehingga dapat diketahui karakteristik dinamis berupa respon kecepatan, percepatan, torsi, dan power kendaraan listrik. Hasil grafik tersebut dapat digunakan sebagai acuan penelitian serupa.

3.1.10 Pengambilan dan Pengolahan Data

Setelah semua simulasi telah selesai, data pokok yang diambil adalah torsi dan *power* yang ditransmisikan. Data yang didapat adalah hasil variasi dimensi panjang arah *axial coaxial Magnetic Gear*. Setelah itu, data tersebut dikelompokkan menjadi sesuai jumlah magnet dan dibuat grafik. Kemudian, grafik tersebut dianalisis.

3.1.11 Analisis Data dan Pembahasan

Tahap selanjutnya yaitu dilakukan analisis dan pembahasan mengenai hasil dari simulasi. Analisis meliputi bagaimana pengaruh dimensi panjang arah *axial coaxial magnetic gear* terhadap karakteristik torsi dan *power* Bus Tugasanda

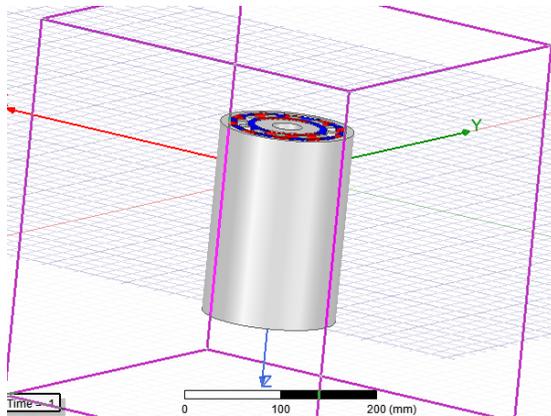
3.1.12 Kesimpulan Penelitian

Dari analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan yang menjawab tujuan dari penelitian ini. Hasil yang diharapkan adalah karakteristik torsi, *power*, percepatan dan kecepatan dengan menggunakan transmisi *coaxial magnetic gear* pada Bus Tugasanda. Hasil grafik torsi, daya, kecepatan dan percepatan dari simulasi pada kedua *software* akan dibandingkan karakteristiknya dengan hasil perhitungan secara matematis.

3.2 Proses Verifikasi

Proses verifikasi perlu dilakukan untuk mengevaluasi suatu simulasi pada *software* apakah langkah-langkah dan hasil sesuai dengan yang sudah ada dan hasilnya sesuai dengan yang diharapkan. Langkah ini berguna untuk membuktikan bahwa

software ANSYS Maxwell 3D yang akan digunakan memiliki data kinerja yang sama dengan *software* yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Verifikasi dilakukan dengan cara membandingkan data hasil simulasi yang telah dilakukan oleh A.Rotondale dan M.Villani pada tahun 2015 menggunakan *software Finite Element Analysis* dengan data hasil simulasi *software Ansys Maxwell 3D*. Untuk langkah-langkah simulasinya sama dengan yang dilakukan oleh A.Rotondale dan M.Villani, perbedaannya hanya pada penelitian ini dilakukan pada simulasi 3D. Desain yang digunakan sebagai obyek simulasi ditunjukkan pada gambar 3.24.



Gambar 3.22 Coaxial Magnetic Gear Disimulasikan secara 3D

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

PERHITUNGAN DAN PEMBAHASAN

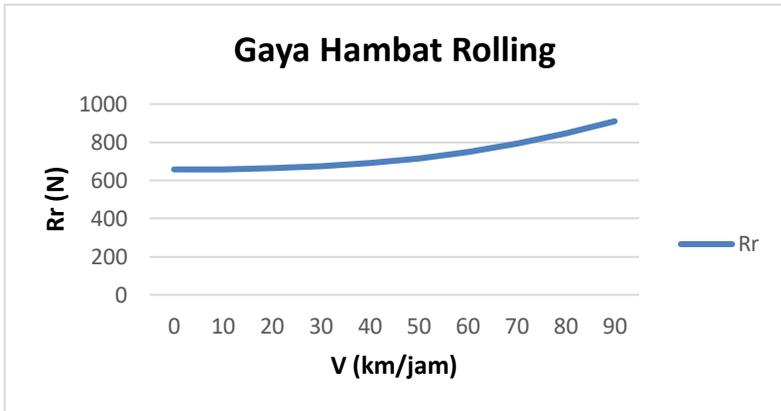
Dalam bab iv ini akan dijelaskan bagaimana merancang sebuah *coaxial magnetic gear* yang disimulasikan pada *software ANSYS Maxwell 3D* dan *MATLAB/simscape*. Kemudian hasil dari setiap simulasi tersebut yang berupa grafik akan dibahas mengenai karakteristiknya. Berikut adalah pembahasannya.

4.1 Perhitungan Rasio Coaxial Magnetic Gear

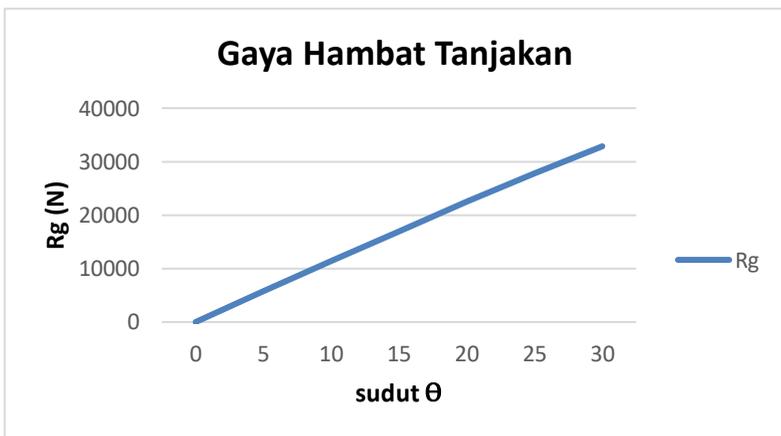
Sebelum dilakukan simulasi pada *software ANSYS Maxwell 3D*, terlebih dahulu menentukan rasio transmisi CMG dengan 1 tingkat percepatan. Perhitungan rasio ini mempertimbangkan gaya *rolling* (R_r), gaya *drag* (R_a), dan gaya hambat tanjakan pada 30° (R_g). Gaya hambat *drag* dapat diabaikan ketika kendaraan menanjak pada sudut tersebut, karena kecepatan kendaraan saat menanjak umumnya terjadi pada kecepatan rendah. Berikut adalah perhitungan rasio transmisinya;

$$I_1 = \frac{F_t \times r}{T_m \times I_d \times \eta_t} = \frac{(R_r + R_a + R_g) \times r}{T_m \times I_d \times \eta_t} \quad (4.1)$$

dimana, F_t = gaya torsi kendaraan, W = berat kendaraan, T_m = torsi motor, η_t = efisiensi dari transmisi, r = jari-jari roda, f_r = koefisien rolling ban, I_d = perbandingan gigi diferensial, R_r = gaya hambat *rolling*, R_g = gaya hambat tanjakan dan R_a = hambatan angin. Untuk nilai setiap parameternya didapat dari perhitungan yang sudah dilakukan. Berikut adalah nilai tiap parameternya yang didapat dari perhitungan di *MS. Excel*:



(a)



(b)

Gambar 4.1 Grafik Gaya (a) Hambat *rolling* dan (b) Tanjakan

Maka diperoleh gaya hambat *rolling* dan gaya hambat tanjakan

$$\begin{aligned} F_t &= R_r + R_g = 732 \text{ N} + 32864 \text{ N} \\ &= 33596 \text{ N} \end{aligned}$$

$$T_m = 370 \text{ Nm}$$

$$I_d = 6$$

$$\eta_t = 80\%$$

$$r = 0.3 \text{ m}$$

parameter yang diasumsikan :

$$\begin{aligned} \text{Massa total} &= \text{massa bus} + \text{massa full penumpang} \\ &= 5100 \text{ kg} + 30 \times 60 \text{ kg} = 6900 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{Kecepatan kendaraan saat melaju} = 80 \text{ km/jam}$$

$$\text{Sudut tanjakan} = 30^\circ$$

$$I_1 = \frac{F_t \times r}{T_m \times I_d \times \eta_t} \quad (4.2)$$

$$I_1 = \frac{33596 \text{ N} \times 0,3}{370 \text{ Nm} \times 6 \times 0.80} \quad (4.3)$$

$$I_1 = 5,675 \sim 6$$

Jadi rasio transmisi 1 tingkat percepatan yang tepat sesuai dengan parameter-parameter yang dimasukkan dalam perhitungan gaya hambatnya adalah sebesar 6. Setelah diketahui rasio tersebut maka dapat diketahui untuk jumlah magnet permanen dan *pole pieces* yang digunakan dalam CMG penelitian ini. Berikut adalah komposisi magnet permanen dan *pole pieces*nya :

$$\text{Inner magnet} = 3 \text{ pasang}$$

$$\text{Outer magnet} = 15 \text{ pasang}$$

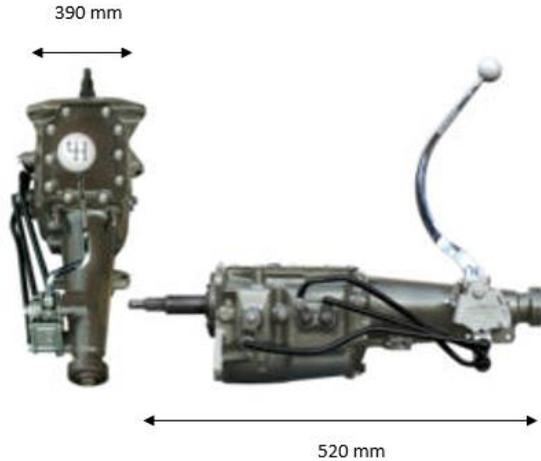
$$\text{Pole pieces} = 18 \text{ buah}$$

dengan rasio yaitu;

$$r = \frac{n_{pp}}{p_i} \quad (4.4)$$

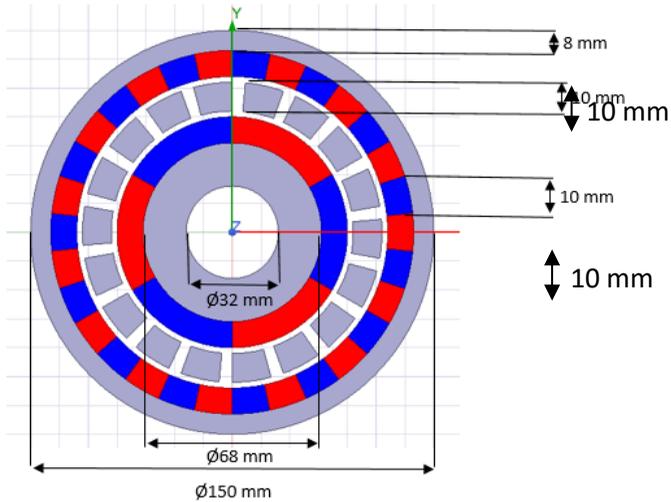
$$r = \frac{18}{3} = 6 \quad (4.5)$$

Dengan pertimbangan dimensi untuk *coaxial magnetic gearnya* berdasarkan ukuran transmisi Bus konvensional. Berikut adalah transmisi Bus konvensionalnya:

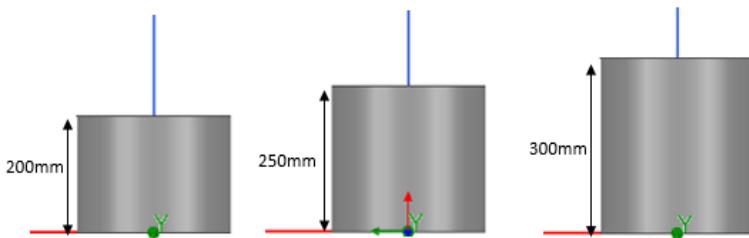


Gambar 4.2 Transmisi Bus Konvensional

Kemudian didapat dimensi untuk *coaxial magnetic gear* berdasarkan kebutuhan rasio dan ukuran transmisi bus konvensional. Pada gambar di bawah ini terlihat ukuran *coaxial magnetic gear* lebih kecil daripada transmisi Bus konvensional karena CMG ini hanya terdiri dari 1 tingkat percepatan sehingga dapat menghemat ruang transmisi. Berikut adalah dimensi CMG:

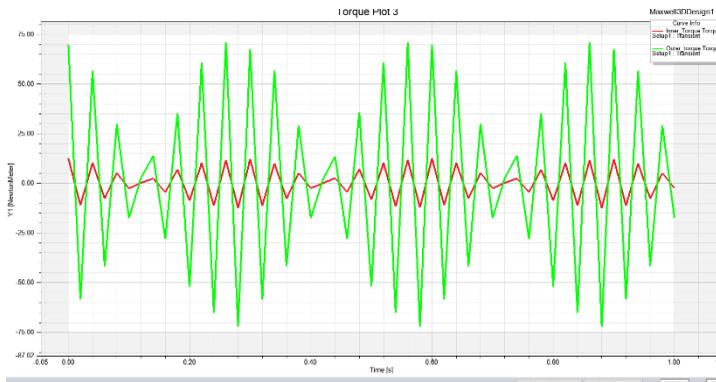


Gambar 4.3 Dimensi Coaxial Magnetic Gear



Gambar 4.4 Variasi Panjang Arah Aksial

Setelah melakukan proses verifikasi sesuai dengan langkah-langkah simulasi menggunakan *software Ansys Maxwell*, maka diperoleh hasil torsi seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik torsi hasil verifikasi pada penelitian terdahulu

Dari hasil yang didapat tersebut kemudian dilakukan proses verifikasi dengan membandingkan data hasil dari *A.Rotondale* dan *M.Villani* pada tahun 2019 menggunakan software *ANSYS Maxwell 3D* yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Proses verifikasi

Material magnet	Struktur CMG			Hasil Torsi Max (Nm)		Verifikasi	
	<i>Inner magnet</i>	<i>Outer magnet</i>	<i>Pole Pieces</i>	<i>Finite Element Analysis</i>	<i>Maxwell 3D</i>	Sesuai	Tidak sesuai
NdFeB35	4	22	26	1000 Nm	954 Nm	√	-

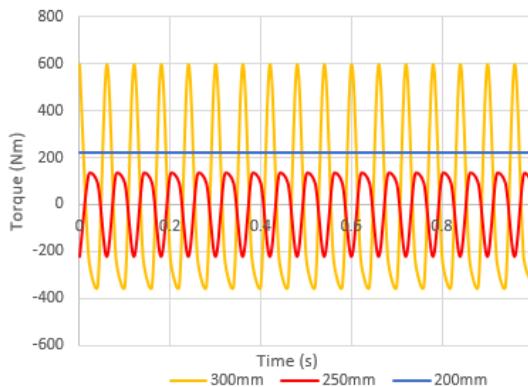
Dari tabel 4.1 tersebut diketahui bahwa nilai Tmax yang didapat menggunakan *software ANSYS Maxwell 3D* memiliki nilai yang hampir sama dengan hasil dari *software FEA*. Error antara hasil *software ANSYS Maxwell 3D* dan *FEA* sebesar 2,4%. Error tersebut dapat dianggap error yang rendah sehingga dapat dinyatakan bahwa verifikasi *software* yang sudah dilakukan sesuai atau valid. Dengan demikian, artinya langkah-langkah yang dilakukan menggunakan *software Ansys Maxwell 3D* ini sudah

sesuai dan penelitian dapat dilanjutkan dengan melakukan simulasi pada masing-masing variasi yang telah ditentukan.

4.2 Data Hasil Penelitian pada Simulasi ANSYS Maxwell 3D

Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software ANSYS Maxwell 3D* untuk didapatkan data berupa grafik torsi terhadap waktu. Variasi yang dilakukan dalam simulasi ini adalah variasi dimensi panjang arah aksial pada *coaxial magnetic gear* dengan ukuran 200 mm, 250 mm dan 300 mm. dengan spesifikasi CMG terdiri dari *inner magnet* berjumlah 3 pasang, *outer magnet* berjumlah 15 pasang, dan *pole pieces* sebanyak 18 buah. Untuk parameter inputnya adalah putaran motor listrik pada putaran bawah, putaran menengah dan putaran atas masing-masing yaitu 1000 rpm, 4700 rpm, dan 8000 rpm. Berikut adalah pembahasan dari tiap putaran rpm pada 3 variasi yang berbeda..

4.2.1 Hasil Torsi Coaxial Magnetic Gear pada Putaran 1000 rpm



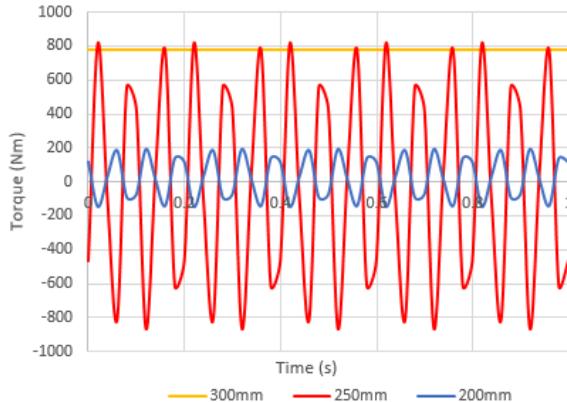
Gambar 4.6 Grafik torsi CMG dengan Variasi Panjang pada Putaran 1000 rpm

Grafik di atas menunjukkan *trendline* torsi yang dihasilkan pada setiap variasi yaitu 200 mm, 250 mm, dan 300 mm dengan spesifikasi jumlah magnet dan *pole pieces* yang sama. Terlihat pada CMG_300 mm memiliki torsi maksimal yang paling besar kemudian diikuti oleh CMG_250 mm lalu CMG_200 mm yang cenderung konstan *trendline* torsinya.

Pada CMG_300 mm dan 250 mm mengalami fenomena *ripple torque* dimana torsinya mengalami naik turun yang cukup besar walaupun dalam waktu yang singkat. *Ripple torque* ini terjadi karena adanya interaksi antara magnet permanen dengan *pole pieces* dimana magnet permanen memberikan gaya tarik pada *pole pieces* yang bersifat *ferromagnetic*, karena adanya gaya tarik menarik maka diperlukan gaya yang digunakan untuk memutuskan tarikan tersebut. Dari penjelasan tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin panjang dimensi arah axial CMG, maka *ripple torque* yang terjadi juga akan semakin besar.

Pada CMG_200 mm *ripple torque* yang terjadi sangat kecil sehingga torsi yang dihasilkan cenderung konstan. Ini berarti bahwa kerugian akibat fenomena *ripple torque* seperti getaran berlebih, suara yang bising, serta energi *loss* akan minim terjadi. Sehingga pada CMG_200 mm ini cocok jika diintegrasikan motor listrik yang dipakai untuk putaran rendah. Sedangkan untuk CMG_300mm dan CMG_250 mm masih perlu penyesuaian pada ukuran dan jumlah magnet dan *pole pieces* nya agar torsi yang dihasilkan tidak fluktuatif.

4.2.2 Hasil Coaxial Magnetic Gear Torsi pada Putaran 4700 rpm



Gambar 4.7 Grafik Torsi CMG dengan Variasi Panjang pada Putaran 4700 rpm

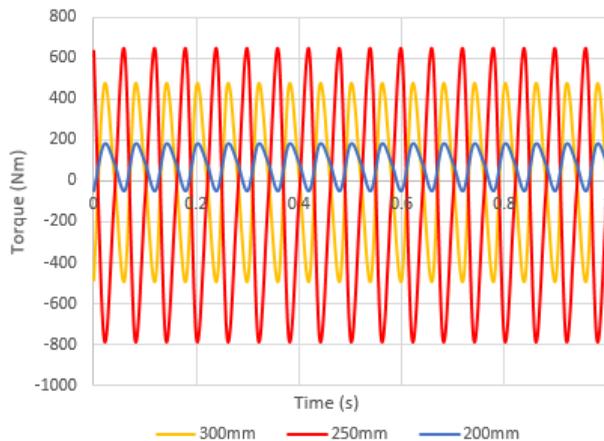
Grafik di atas menunjukkan *trendline* torsi yang dihasilkan pada setiap variasi yaitu 200 mm, 250 mm, dan 300 mm dengan spesifikasi jumlah magnet dan *pole pieces* yang sama. Terlihat pada CMG_300 mm memiliki torsi maksimal dan cenderung konstan *trendline* torsinya kemudian diikuti oleh CMG_250 mm dan CMG_200 mm yang memiliki karakter torsi yang fluktuatif.

Jika pada putaran 1000 rpm grafik torsi pada CMG_300 mm menghasilkan karakteristik torsi yang fluktuatif dengan diikuti fenomena *ripple torque*, pada putaran 4700 rpm, CMG_300 mm ini karakter torsinya mulai konstan pada 781 Nm. Ini terjadi karena putaran yang masuk pada inner rotor CMG semakin cepat sehingga gaya untuk memutuskan gaya tarik antara magnet permanen dengan *pole pieces* menjadi besar sedangkan gaya tarik menarik yang terjadi tidak terlalu besar, sehingga poros output (*pole pieces*) dapat mentransmisikan daya dari poros input (*inner magnet*) tanpa mengalami *ripple torque*. Sedangkan pada CMG_300 mm masih mengalami *ripple torque* karena semakin panjang variasi arah

axialnya, maka magnet yang digunakan akan semakin panjang yang berpengaruh pada gaya tarik magnet semakin besar. Pada CMG_200 mm juga mengalami *ripple torque* namun cukup kecil sehingga masih bisa dikatakan tidak berpengaruh karena dari putaran 1000 rpm dihasilkan torsi maksimalnya 210 Nm dan pada putaran 4700 rpm dihasilkan torsi maksimal 200 Nm sehingga dapat dikatakan torsinya masih konstan saat 4700 rpm.

Dapat disimpulkan bahwa pada CMG_300 mm memiliki torsi maksimal dan konstan pada 4700 rpm, sehingga CMG_300 mm ini cocok digunakan untuk motor listrik yang sering dipakai untuk putaran menengah, untuk CMG_200 mm juga masih bisa walaupun torsinya masih konstan pada 200 Nm. Sedangkan pada CMG_250 mm masih mengalami *ripple torque* yang cukup besar.

4.2.3 Hasil Torsi *Coaxial Magnetic Gear* pada Putaran 8000 rpm



Gambar 4.8 Grafik Torsi CMG dengan Variasi Panjang pada Putaran 8000 rpm

Grafik di atas menunjukkan *trendline* torsi yang dihasilkan pada setiap variasi yaitu 200 mm, 250 mm, dan 300 mm dengan

spesifikasi jumlah magnet dan *pole pieces* yang sama. Terlihat semua variasi memiliki trendline torsi yang fluktuatif. Torsi maksimal terjadi pada CMG_250 mm dengan torsi maksimal sebesar 624 Nm.

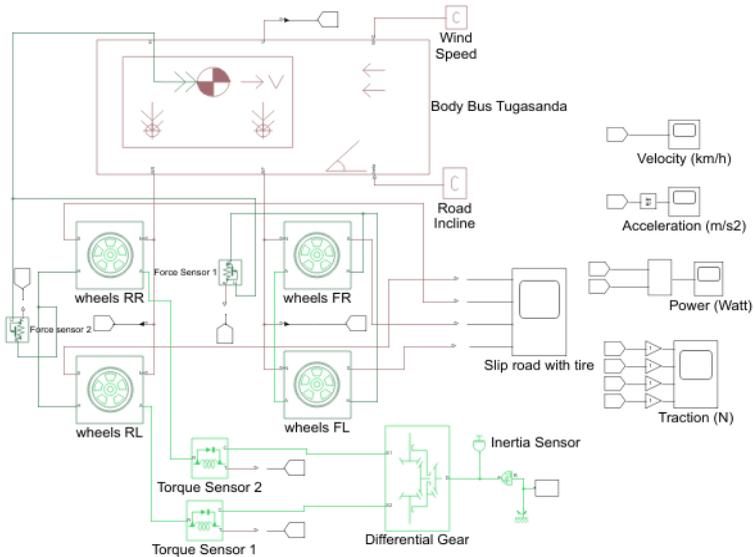
Putaran 8000 rpm ini adalah putaran maksimal dari motor yang diinputkan pada CMG, dan penjelasan tiap *trendline* grafiknya adalah sebagai berikut. Pada CMG_200 mm torsi yang dihasilkan masih konstan di sekitar 200 Nm dengan *ripple torque* yang minim, sedangkan pada CMG_250 mm masih terjadi *ripple torque* namun terjadi secara konstan sehingga tidak terlalu menimbulkan getaran yang berlebih. Kemudian CMG_300 mm juga memiliki karakter torsi yang hampir sama dengan CMG_250 mm namun memiliki torsi maksimal sekitar 521 Nm.

Dari grafik diatas terlihat bahwa semua variasi mengalami *ripple torque* secara konstan sehingga tidak menimbulkan getaran yang berlebih ketika beroperasi, namun pada CMG_200 mm ini *ripple torque* yang terjadi paling kecil. Sedangkan pada CMG_250 mm dan 300 mm masih mengalami *ripple torque* yang cukup besar. Ini terjadi karena magnet yang digunakan juga memiliki ukuran yang lebih besar daripada magnet CMG_200 mm sehingga semakin besar ukuran magnet maka akan semakin besar gaya tarik menarik yang terjadi antara magnet dengan *pole pieces* nya. Akan tetapi, *ripple torque* yang terjadi pada CMG_250 mm dan CMG_300 mm saat putaran 8000 rpm tidak sebesar yang terjadi saat putaran 1000 rpm dan 4700 rpm. Hal demikian terjadi karena putaran tinggi dari motor listrik dapat mengurangi *ripple torque* yang terjadi pada kedua CMG tersebut.

4.3 Data Hasil Penelitian pada Simulasi *e-drivetrain* MATLAB/simscape

Setelah simulasi pada ANSYS Maxwell 3D selesai dan didapatkan hasil berupa torsi pada setiap variasi dimensi panjang dan putaran motor listrik, maka langkah selanjutnya adalah menginput-kan data hasil tersebut ke dalam blok diagram *simscape*

untuk disimulasikan secara lengkap sistem penggerak bus listriknya, berikut ini adalah blok diagram *simscape*:



Gambar 4.9 Blok Diagram *e-drivetrain* pada MATLAB/*simscape*

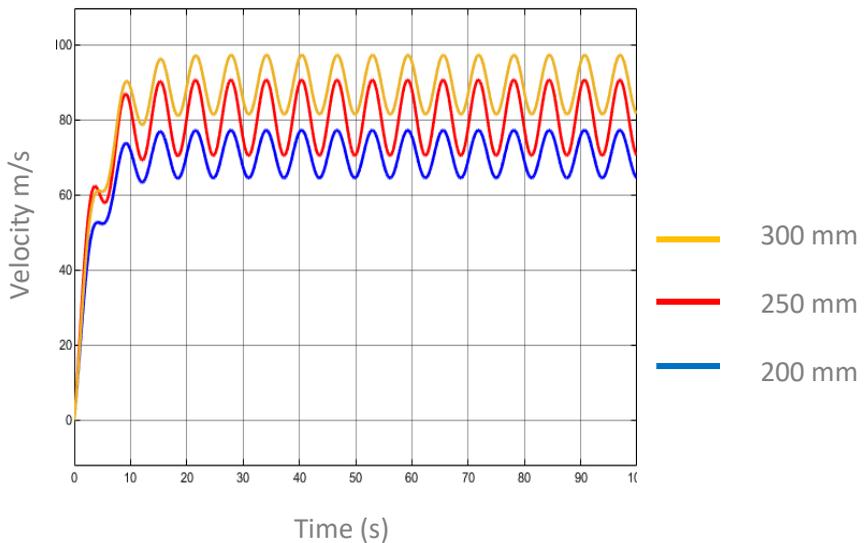
Parameter-parameter dalam simulasi tersebut diinputkan sesuai dengan yang sudah ditentukan. Berikut adalah parameternya pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Parameter Bus pada *e-drivetrain*

Massa bus full penumpang	6900 kg
Rasio differential	5
Rasio CMG	6
Road incline	30°
Drag coefficient	0.4
Frontal area	4.5 m ²
Radius wheels	0.3 m
Wind speed	5 m/s

Kemudian setelah simulasi dilakukan, hasil yang didapat berupa grafik kecepatan, percepatan, *power* dan traksi. Berikut adalah pembahasan setiap grafik yang didapat:

4.3.1 Karakteristik Kecepatan Bus dengan *e-drivetrain* pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm



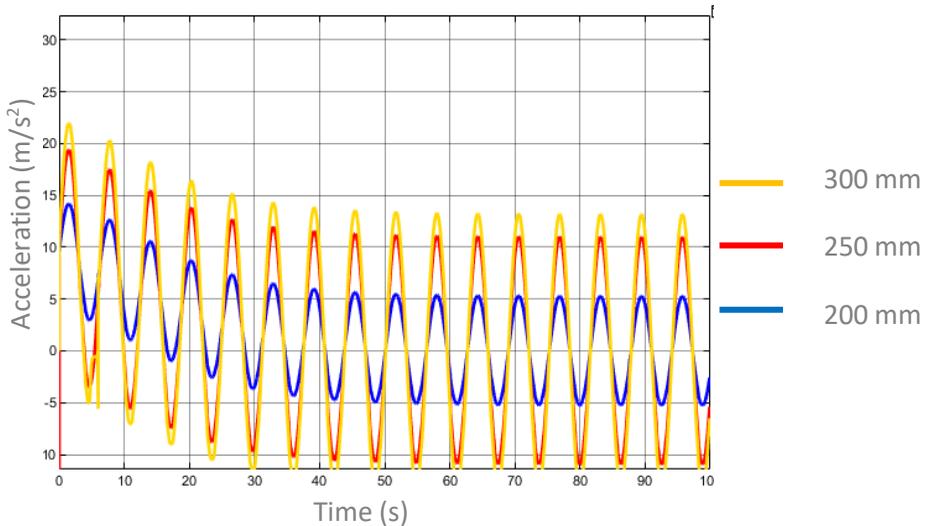
Gambar 4.10 Grafik Kecepatan terhadap Waktu pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm

Gambar 4.10 Adalah grafik kecepatan terhadap waktu pada putaran 0 rpm – 8000 rpm yang dihasilkan dari simulasi *e-drivetrain* dengan 3 variasi *coaxial magnetic gear* (CMG). Grafik dengan warna biru menunjukkan *trendline* kecepatan pada CMG_200 mm, warna merah menunjukkan *trendline* kecepatan pada CMG_250 mm, dan warna kuning menunjukkan *trendline* kecepatan pada CMG_300 mm.

Dari ketiga grafik di atas terlihat karakteristik dari putaran 0 rpm mengalami kenaikan secara fluktuatif hingga 8000 rpm kemudian mencapai *trend* fluktuatif yang konstan. Kecepatan yang dihasilkan pada CMG_200 mm saat putaran bawah sekitar 47 km/h, lalu saat putaran menengah sekitar 65 km/h dan saat putaran atas kecepatan maksimalnya sebesar 78 km/h. Pada CMG_250 mm saat putaran bawah kecepatannya sekitar 61 km/h kemudian saat putaran menengah sebesar 82 km/h dan kecepatan maksimalnya sebesar 90 km/h. Untuk CMG_300 mm, kecepatan saat putaran bawah sebesar 60 km/h lalu saat putaran menengah 84 km/h dan kecepatan maksimalnya sebesar 96 km/h. Kecepatan saat putaran bawah pada CMG_300 mm lebih kecil daripada CMG_250 mm karena dibutuhkan waktu untuk magnet-magnet pada transmisinya saling mengalami gaya tolak dan menolak mengingat magnet yang ada pada CMG_300 mm ini lebih besar dan lebih panjang yang mengakibatkan gaya yang dihasilkan magnetnya menjadi lebih besar.

Dari grafik diatas terlihat bahwa CMG yang cocok untuk putaran bawah adalah CMG_200 mm karena memiliki kecepatan awal saat putaran bawah yang cukup untuk sebuah bis listrik. Apabila kecepatan awal sudah terlalu besar maka akan mengakibatkan berkurangnya kenyamanan dan keamanan bagi penumpang karena mudahnya bus untuk mencapai kecepatan yang cukup tinggi saat putaran bawah.

4.3.2 Karakteristik Percepatan Bus dengan *e-drivetrain* pada Putaran 0 rpm- 8000 rpm



Gambar 4.11 Grafik Percepatan terhadap Waktu pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm

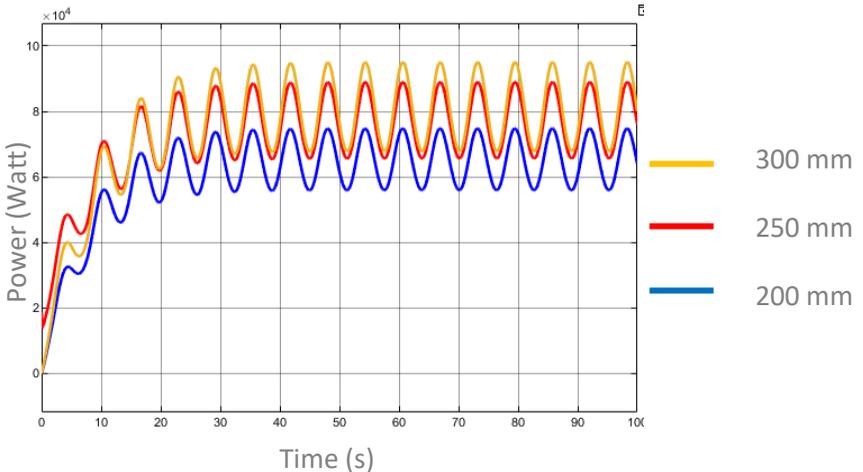
Gambar 4.11 Adalah grafik percepatan terhadap waktu pada putaran 0 rpm – 8000 rpm yang dihasilkan dari simulasi *e-drivetrain* dengan 3 variasi *coaxial magnetic gear* (CMG). Grafik dengan warna biru menunjukkan *trendline* percepatan pada CMG_200 mm, warna merah menunjukkan *trendline* percepatan pada CMG_250 mm, dan warna kuning menunjukkan *trendline* percepatan pada CMG_300 mm.

Dari ketiga grafik di atas terlihat karakteristik dari putaran 0 rpm mengalami kenaikan secara fluktuatif sekitar 5 detik pada putaran 1000 rpm kemudian mulai turun pada putaran 4700 rpm hingga 8000 rpm kemudian mencapai *trend* fluktuatif yang konstan. Percepatan pada CMG_200 mm saat putaran bawah sekitar 14 m/s² kemudian beranjak turun hingga percepatannya 0 saat putaran atas. Pada CMG_250 mm, percepatan saat putaran bawah sekitar 19

m/s^2 kemudian beranjak turun perlahan hingga percepatannya 0 saat putaran atas. Sedangkan Pada CMG_300 mm, percepatan pada putaran bawah sekitar 23 m/s^2 kemudian beranjak turun perlahan hingga percepatannya 0 saat putaran atas.

CMG yang cocok untuk digunakan untuk transmisi Bus sebaiknya adalah yang mempunyai karakteristik percepatan yang tidak terlalu besar namun tetap mampu menggerakkan bus dengan penumpang penuh. Dari ketiga grafik di atas, CMG yang cocok adalah CMG_200 mm yang memiliki percepatan sekitar 14 m/s^2 . CMG ini dipilih karena percepatan awal yang tidak terlalu besar sehingga tidak menyebabkan penumpang tertarik ke belakang saat bus mulai berakselerasi dari berhenti.

4.3.3 Karakteristik Daya Bus dengan *e-drivetrain* pada Putaran 0 rpm- 8000 rpm



Gambar 4.12 Grafik Daya terhadap Waktu pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm

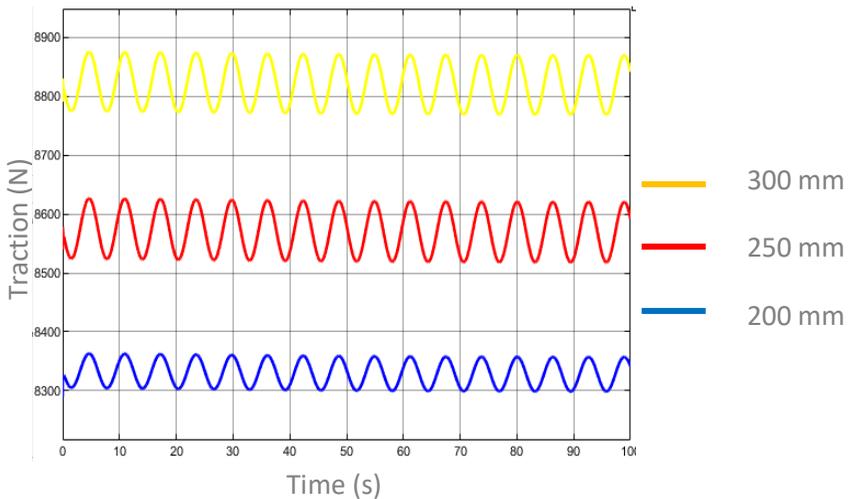
Gambar 4.12 Adalah grafik Daya terhadap waktu pada putaran 0 rpm – 8000 rpm yang dihasilkan dari simulasi *e-drivetrain* dengan 3 variasi *coaxial magnetic gear* (CMG). Grafik

dengan warna biru menunjukkan *trendline* daya pada CMG_200 mm, warna merah menunjukkan *trendline* daya pada CMG_250 mm, dan warna kuning menunjukkan *trendline* daya pada CMG_300 mm.

Dari ketiga grafik di atas terlihat karakteristik dari putaran 0 rpm mengalami kenaikan secara fluktuatif hingga 8000 rpm kemudian mencapai *trend* fluktuatif yang konstan. Daya yang dihasilkan CMG_200 mm saat putaran bawah sekitar 30 kW kemudian saat putaran menengah sekitar 54 kW dan daya maksimalnya sebesar 75 kW. Pada CMG_250 mm, daya yang dihasilkan saat putaran bawah sebesar 52 kW, lalu saat putaran menengah dayanya sebesar 81 kW dan daya maksimalnya sebesar 93 kW. Untuk CMG_300 mm pada putaran bawah memiliki daya sebesar 40 kW lalu saat putaran menengah dayanya sebesar 83 kW dan daya maksimalnya sebesar 97 kW. Daya yang dihasilkan saat putaran bawah pada CMG_300 mm lebih kecil daripada CMG_250 mm dikarenakan pada CMG_300 mm membutuhkan waktu untuk menyesuaikan magnet-magnet agar menciptakan gaya tarik menarik dan tolak menolak mengingat magnet yang digunakan pada CMG_300 mm lebih besar dan lebih panjang yang menyebabkan gaya tolak menolak semakin besar. Terbukti bahwa saat putaran atas, daya yang dihasilkan pada CMG_300 mm ini memiliki daya yang paling besar.

Maka CMG yang cocok untuk diaplikasikan pada Bus adalah CMG_200 mm karena tidak terlalu memerlukan daya yang besar untuk membuat bus melaju dan juga dapat menghemat ruang transmisi dan daya baterai dengan daya yang dihasilkan.

4.3.4 Karakteristik Traksi Bus dengan *e-drivetrain* pada Putaran 0 rpm- 8000 rpm



Gambar 4.13 Grafik traksi terhadap Waktu pada Putaran 0 rpm - 8000 rpm

Gambar 4.13 Adalah grafik traksi terhadap waktu pada putaran 0 rpm – 8000 rpm yang dihasilkan dari simulasi *e-drivetrain* dengan 3 variasi *coaxial magnetic gear* (CMG). Grafik dengan warna biru menunjukkan *trendline* traksi pada CMG_200 mm, warna merah menunjukkan *trendline* traksi pada CMG_250 mm, dan warna kuning menunjukkan *trendline* traksi pada CMG_300 mm.

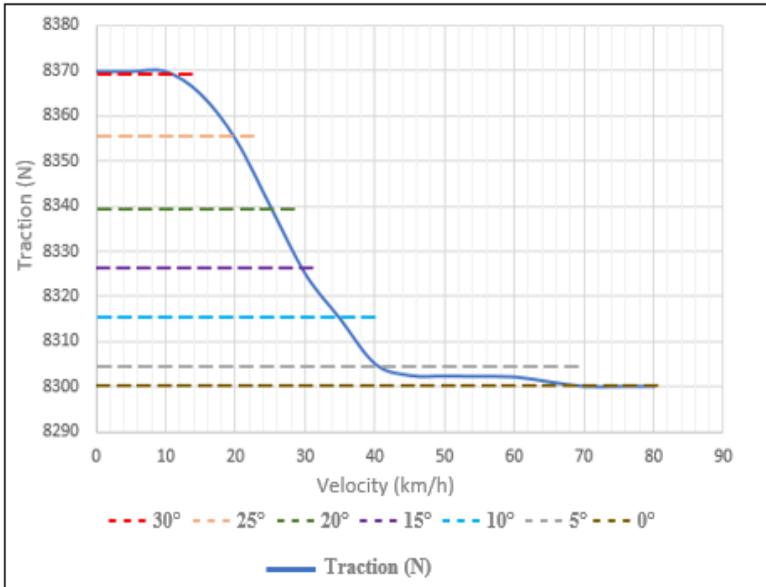
Dari ketiga grafik di atas terlihat karakteristik dari putaran 0 rpm mengalami naikan sekitar 5 detik kemudian mulai turun perlahan saat 4700 rpm hingga 8000 rpm kemudian mencapai *trend* fluktuatif yang konstan. Traksi pada CMG_200 mm diawal sebesar 8370 N kemudian beranjak turun sekitar 8300 N secara konstan sampai putaran atas. Hal yang sama juga terjadi pada CMG_250 mm dimana traksi awal sebesar 8610 N kemudian beranjak turun

pada 8530 N secara konstan sampai pada putaran atas. Pada CMG_300 mm traksi yang dihasilkan cukup konstan dari awal hingga putaran atas. Ini diindikasikan bahwa torsi yang ditransmisikan hingga ke roda tidak mengalami *losses* sehingga traksi yang dihasilkan konstan.

Mengacu pada ketiga grafik di atas, maka CMG yang cocok untuk digunakan pada Bus adalah CMG_200 mm karena traksi awal yang dihasilkan besar karena memberikan gaya dorong yang cukup untuk melaju kemudian traksinya turun saat bus sudah berjalan. Sedangkan CMG_300 mm traksinya relatif konstan yang menunjukkan gaya dorong yang dibutuhkan dari saat awal bus akan melaju dan saat sudah berjalan, memiliki traksi yang sama. Ini menyebabkan pemborosan daya dari baterai dan daya yang dibutuhkan menjadi besar.

4.3.5 Penentuan *Coaxial Magnetic Gear*

Berdasarkan simulasi dari *ANSYS Maxwell 3D* dan *MATLAB/simscape* beserta variasi yang sudah diterapkan pada tiap simulasi, maka dapat diputuskan bahwa untuk rancangan *coaxial magnetic gear* yang tepat dan cocok untuk diterapkan dalam *e-drivetrain* Bus Tugasanda adalah CMG dengan variasi panjang arah aksial 200 mm. CMG ini dipilih karena pada hasil simulasi *ANSYS Maxwell 3D* didapat torsi yang relative konstan pada 200 Nm dan *ripple torque* yang terjadi tidak sebesar variasi CMG 250 mm dan 300 mm. Kemudian pada hasil simulasi *MATLAB/simscape* terlihat untuk karakteristik daya nya tidak membutuhkan daya motor yang terlalu besar untuk mengoperasikan CMG-nya sedangkan untuk karakteristik dinamis ketika kendaraan berjalan adalah sebagai berikut :



Gambar 4.14 Karakteristik Traksi Bus Tugasanda dengan *e-drivetrain* CMG 200 mm

Pada grafik di atas menjelaskan kemampuan dari Bus Tugasanda dengan *e-drivetrain* CMG 200 mm, transmisi didesain menggunakan 1 tingkat percepatan. Pada putaran awal traksi yang dibutuhkan untuk bus mulai berjalan adalah 8370 N sampai bus melaju pada kecepatan 15 km/jam. Kemudian traksi mulai turun ketika kecepatan naik sampai sekitar 40 km/h. lalu traksi mulai konstan pada 8300 N saat kecepatan 50-80 km/h.

Pada saat bus melaju pada tanjakan 30°, traksi yang dibutuhkan sekitar 8370 N agar bus dapat melaju dan maksimal kecepatan saat menanjak pada 30° adalah 16 km/h. lalu pada tanjakan 25°, traksi yang dibutuhkan sekitar 8355 N agar bus dapat melaju dan maksimal kecepatan saat menanjak pada 25° adalah 25 km/h. untuk tanjakan 15° dan 10° traksi yang dibutuhkan tidak terpaut jauh yaitu 8325 N dan 8315 N, sedangkan pada 5° dan 0° traksi yang

dibutuhkan adalah sekitar 8300 N dengan kecepatan maksimal masing-masing 70 km/h dan 80 km/h.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan analisis data dan pembahasan dari karakteristik grafik pada setiap simulasi, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Rancangan *coaxial magnetic gear* untuk diintegrasikan dengan motor listrik 75 kW pada Bus Tugasanda memiliki diameter luar 150 mm dengan diameter poros 32 mm dengan komposisi *inner magnet* sebanyak 3 pasang, *outer magnet* 15 pasang, dan *pole pieces* 18 buah serta rasio transmisi 1 tingkat percepatan 1:6.
2. Pada CMG_200 mm ketika disimulasikan pada MATLAB/*simscape* menunjukkan bahwa CMG ini cocok untuk diaplikasikan dalam *e-drivetrain* Bus Tugasanda karena torsi yang dihasilkan cukup konstan pada sekitar 200 Nm. Daya maksimal motor listrik yang dibutuhkan CMG_200 mm untuk bekerja adalah 75 kW dimana daya tersebut sesuai dengan motor listrik yang telah ditentukan.
3. Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan, pengaruh dari variasi panjang arah aksial pada *coaxial magnetic gear* memberikan efek meningkatnya torsi ketika panjang CMG bertambah karena semakin panjang CMG, maka magnet yang digunakan pun akan semakin besar sehingga akan menimbulkan gaya magnet atau energi maksimal yang dapat dihasilkan magnetnya juga semakin besar serta luas penampang magnet yang semakin besar yang menimbulkan gaya kontak magnet semakin kuat. Namun fenomena *torque ripple* juga akan semakin besar jika tidak diimbangi dari putaran motor, karena sebuah CMG yang

memiliki dimensi panjang yang cukup besar, maka dibutuhkan putaran motor yang cukup tinggi untuk memutus *torque ripple* yang terjadi.

5.2 **Saran**

Saran dari penulis untuk kedepannya mengenai tugas akhir ini adalah sebagai berikut;

1. Perlu dilakukan analisis ketika magnet mengalami *slip* saat simulasi *e-drivetrain* agar lebih mendekati kondisi nyata.
2. Dibutuhkan *software* yang lebih *credible* untuk melakukan simulasi *e-drivetrain* dengan parameter-parameter yang belum bisa dimasukkan pada MATLAB/*simscape*.
3. Untuk tugas akhir selanjutnya mungkin perlu dilakukan eksperimen dengan skala kecil agar lebih mudah dalam melakukan validasi data.

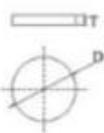
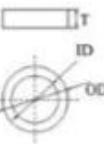
DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Atallah, D. Howe.(2003). “High-Performance Magnetic Gears”, **Department of Electronic and Electrical Engineering**, The University of Sheffield, UK.
- [2] Atallah, K. and D. Howe, “A *novel high-performance magnetic gear*,” **IEEE Transactions on Magnetics**, Vol. 37, No. 4, 2844-2846, 2001
- [3] N. Niguchi, K. Hirata, M. Muramatsu, Y. Hayakawa, “*Transmission torque characteristics in a magnetic gear*,” in **Proc. ICEM**, pp. 1–6, 2010.
- [4] Neves, C.G.D.C., and A.F.F. Filho, “*Coaxial Magnetic Gear Analysis and Optimization*,” Proceedings of the **3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications**, United States, October 2014.
- [5] A.Rotondale, M.Villani and L.Castellini, “*Analysis of high-performace magnetic gears for electric vehicle*” **IEEE**, 2015
- [6] S. Fajri, Ibnu. S dan Ahmad M khoiron, “*Design and Analysis of Coaxial Magnetic Gear Mechanism with Halbach Permanent-Magnet Array*” **IOP publishing**, 10.1088/1742-6596/1273/1/012062, 2019.
- [7] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Joergensen, and O. Nielsen, “*Development of a high performance magnetic gear*” in **IEEE Industry Applications Conference**, vol. 3, 2003, pp. 1696-1702.
- [8] Yoga, N. B., & Sutantra, I. N. (2019). **Desain dan Analisis Sistem Tenaga dan Transmisi pada Mobil Bertenaga Listrik Ezzy ITS II**. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- [9] Miladinovic, S., Lozica, I., Biagojevic, M., dan Stojanovic, B.”*The Development of Magnetic Gears for Transportations Applications*” in **Researchgate**. 2017.
- [10] Prasetyo, D. B. (2017). “*Desain dan Analisa Sistem Tenaga dan Transmisi pada Mobil Angkut Multiguna Pedesaan Bertenaga Listrik*”. Surabaya: **Teknik Mesin FTI ITS**.
- [11] Sutantra, M. P., & Sampurno, M. D. (2010). **Teknologi Otomotif Edisi Kedua**. Surabaya: Guna Widya.
- [12] Sutantra, M.Sc, Ph.D, P. (2015). **Teknologi Otomotif Hybrid Edisi Pertama**. Surabaya: Guna Widya.
- [13] Yasa Co., Ltd. 2018. **Product Guides & Technical Data BLDC Yasa P400**
- [14] Verma, Monica., Mini, S., & Singh, M., (2011).” *Performance Evaluation of Conventional and Electric powertrain*”. India: **Electrical Engineering Department Delhi Technological University New Delhi**.

LAMPIRAN A

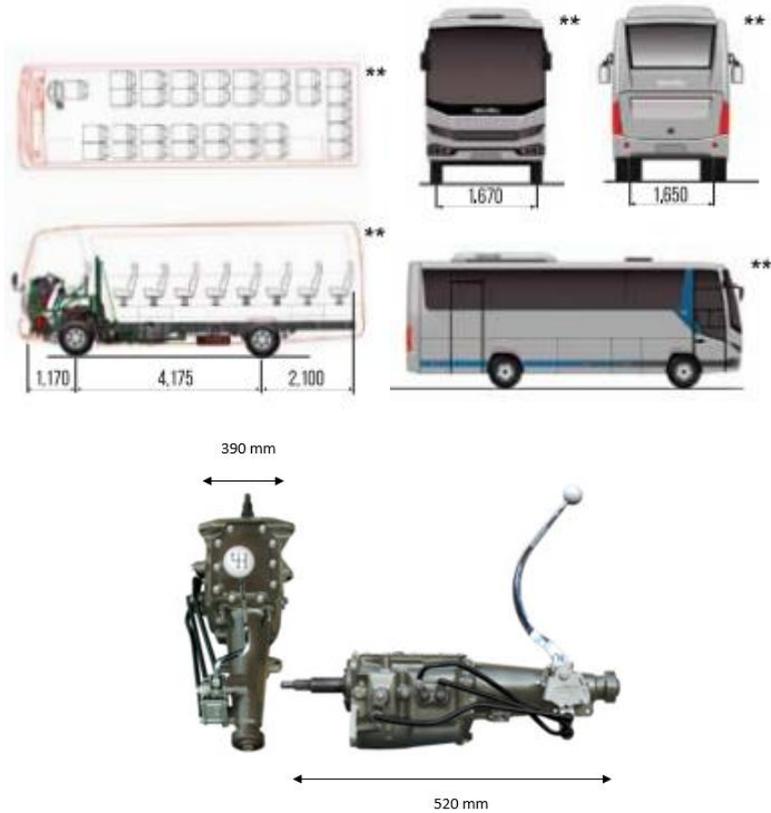
Spesifikasi permanen magnet dari *Advanced Magnet China*, bentuk magnet, arah magnet dan *range* ukuran.

 ADVANCED MAGNETS <small>The Science & Art of Magnet Making</small>				
Table II Sintered NdFeB Magnets' Shapes, Magnetization Direction and Size Range				
Shape	Graphic Description	Magnetization Direction	Size Range	
Disc/Cylinder			Axially Magnetized	D: 1-100 mm T: 0.3-100 mm
			Diametrically Magnetized	D: 1-100 mm T: 0.3-100 mm
Ring			Axially Magnetized	OD: 1.5-100 mm ID: 0.5-90 mm T: 0.5-60 mm
			Diametrically Magnetized	OD: 1.5-100 mm ID: 0.5-90 mm T: 0.5-60 mm
			Radially Magnetized	OD: 20-200 mm ID: 10-180 mm T: 0.5-60 mm
Block/Rectangular			Thickness Magnetized	L: 1-160 mm W: 0.5-100 mm T: 0.3-100 mm
Aro Segment			Diametrically Magnetized	OD-ID: 1 mm L: 1-160 mm W: 3-100 mm H: 1-80 mm
			Radially Magnetized	OD-ID: 1 mm L: 1-60 mm W: 3-40 mm H: 1-10 mm

Note:
* Other shapes of sintered NdFeB magnets can also be tailored according to customers' specific requirements.

LAMPIRAN B

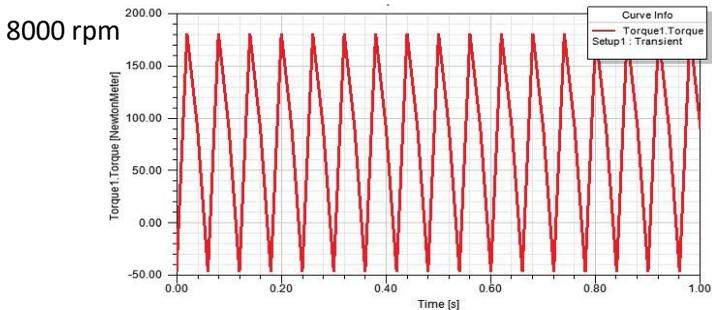
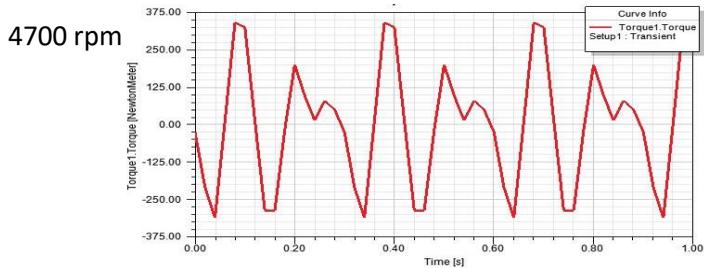
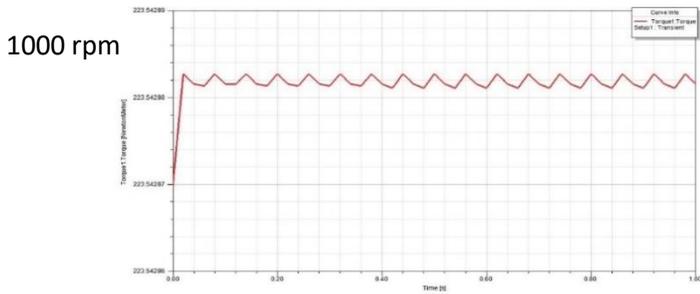
Berikut merupakan spesifikasi dari dimensi Bus Tugasanda dan dimensi *gear case* transmisi Bus Tugasanda



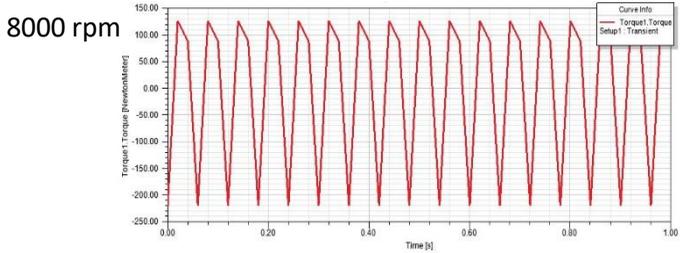
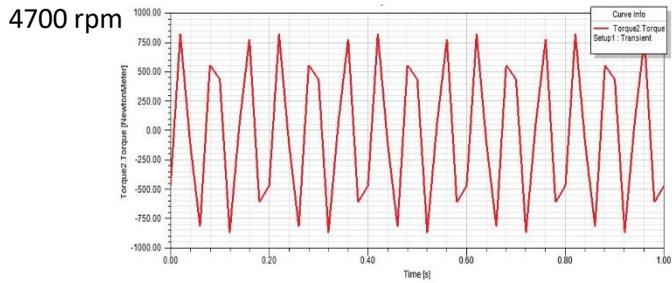
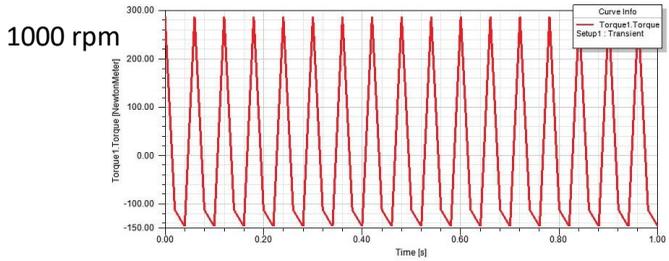
LAMPIRAN C

Berikut adalah grafik torsi yang dihasilkan dari simulasi *coaxial magnetic gear* pada *ANSYS Maxwell 3D*:

Grafik Torsi CMG_200 mm

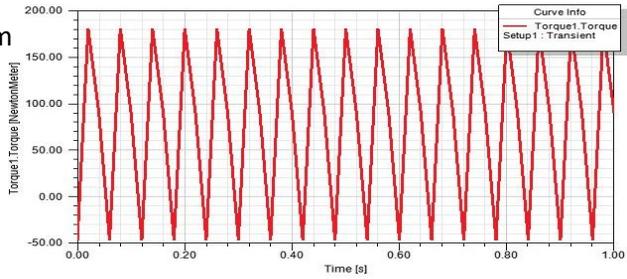


Grafik Torsi CMG_250 mm

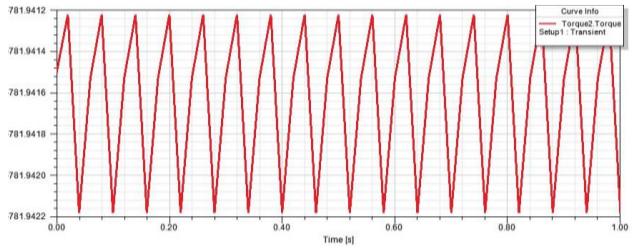


Grafik Torsi CMG_300 mm

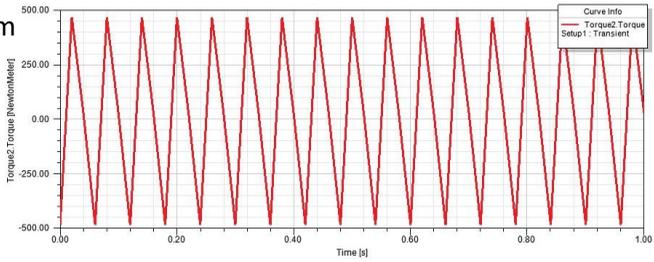
1000 rpm



4700 rpm



8000 rpm



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Ibnu Fuad Al-Hanif dilahirkan di Magelang, 20 April 1998 merupakan anak yang terlahir dari orangtua bernama Bapak Suradi dan Ibu Nurchotimah. Riwayat pendidikan penulis diawali di TK ABA Nepen selama 2 tahun, selanjutnya SD Muhammadiyah Gunungpring Muntilan selama 6 tahun dari tahun 2004-2010, kemudian masuk SMP Muhammadiyah Plus Gunungpring Muntilan selama 3 tahun dari tahun 2010-2013, dan SMA Negeri 2 Yogyakarta dari tahun 2013-2016. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis sempat menjabat sebagai Staff ahli HRD (*Human Resource Development*) di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin pada periode 2018-2019. Selain organisasi penulis juga pernah mengikuti magang di CV. Karya Hidup Sentosa (Quick Traktor) dan magang ITS team Sapuangin. Penulis mempunyai prinsip bahwa suatu keberhasilan tidak bisa didapatkan secara instan, melainkan harus berusaha keras kemudian menyerahkan semua hasilnya hanya kepada Allah SWT. Jika ada yang ingin bertanya tentang tugas akhir ini bisa menghubungi penulis melalui email ibnufd@gmail.com.