



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM184835

PERANCANGAN DAN PEMODELAN DINAMIS *COAXIAL MAGNETIC GEARS* PADA *E-DRIVETRAIN* MOBIL LISTRIK TOYOTA CALYA

RIZAL SYAFRIE
02111640000123

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 *COAXIAL MAGNETIC GEARS*
PADA *E-DRIVETRAIN* MOBIL LISTRIK
TOYOTA CALYA**

RIZAL SYAFRIE
02111640000123

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

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”



FINAL PROJECT - TM184835

**DESIGN AND DYNAMIC MODELING OF
COAXIAL MAGNETIC GEARS IN TOYOTA
CALYA ELECTRIC VEHICLE E-DRIVETRAIN**

RIZAL SYAFRIE
02111640000123

Supervisor
Prof. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial and System Engineering
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

HALAMAN PENGESAHAN

PERANCANGAN DAN PEMODELAN DINAMIS *COAXIAL* *MAGNETIC GEAR* PADA *E-DRIVETRAIN* MOBIL LISTRIK TOYOTA CALYA

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:

Rizal Syafrie

NRP. 02111640000123

Disetujui oleh:

1. Prof. Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M. Eng. (Pembimbing)
NIP. 19750511 199903 1 001
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T., M.T. (Penguji I)
NIP. 19700412 199703 2 003
3. Aida Annisa Amin Damari, S.T., M.T. (Penguji II)
NIP. 1989070 520154 2 005
4. Ir. Julendra B. Ariateja, M.T. (Penguji III)
NIP. 1968070619990811004



SURABAYA
AGUSTUS, 2020

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

**PERANCANGAN DAN PEMODELAN DINAMIS COAXIAL
MAGNETIC GEAR PADA E-DRIVETRAIN MOBIL
LISTRIK TOYOTA CALYA**

Nama Mahasiswa : Rizal Syafrie
NRP : 02111640000123
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
**Dosen Pembimbing : Prof. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur,
S.T., M.Eng.**

ABSTRAK

Mengacu Perpres No. 55/2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (battery electric vehicle) untuk transportasi jalan dan telah diundangkan sejak 12 Agustus 2019, hal tersebut menyebabkan engineer melakukan riset salah satunya ialah proyek mobil listrik oleh tim riset ITS dengan Toyota. Mengonversi mobil Toyota Calya menjadi mobil berbasis tenaga listrik sebagai sumber penggerak utama. Dalam masalah ini, yang menjadi fokus utama adalah pengaplikasian coaxial magnetic gear pada transmisi mobil listrik Toyota Calya. Salah satu topik penelitian yang dilakukan adalah magnetic gear, yang memiliki solusi atas permasalahan kegagalan pada roda gigi konvensional. Pada dasarnya, magnetic gear menggunakan magnet permanen sebagai pengganti gigi-gigi sehingga tidak ada kontak yang terjadi pada pasangan roda gigi. Selain itu, memiliki keunggulan substansial dibandingkan dengan mechanical gear seperti mengurangi perawatan, meningkatkan keandalan, mengurangi kebisingan, dan mengurangi perlindungan berlebih.

Berlatar belakang dengan hal-hal yang telah disampaikan, tahapan penelitian antara lain melakukan perhitungan rasio gigi Toyota Calya, dilanjutkan dengan drawing desain coaxial magnetic gear menggunakan software SolidWorks 2019 dengan variasi dimensi, variasi dimensi panjang arah axial 100 mm, 150 mm dan 200 mm digunakan sebagai input parameter

untuk melakukan simulasi menggunakan software ANSYS Maxwell 3D, hasil yang diharapkan untuk mengetahui besar torsi yang dihasilkan oleh coaxial magnetic gear, dengan menggunakan acuan dari hasil torsi tersebut maka dilakukan simulasi e-drivetrain menggunakan software MATLAB/simscape untuk mengetahui dinamika kendaraan mobil listrik Toyota Calya. Mengenai parameter yang dimasukkan antara lain motor listrik, sistem differential, roda kendaraan, bodi kendaraan dan sistem transmisi dimana coaxial magnetic gear digunakan sebagai pengganti sistem transmisi.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, bahwa pengaruh variasi panjang pada coaxial magnetic gear mampu meningkatkan hasil torsi output. Semakin panjang coaxial magnetic gear, maka torsi yang dihasilkan semakin besar tanpa merubah rasio gigi. Maka rancangan yang sesuai dengan kebutuhan mobil Toyota Calya adalah coaxial magnetic gear dengan panjang 150 mm karena torsi rms yang dihasilkan 144,91 Nm pada putaran 100 rpm dan nilai torsi rms sebesar 83,02 Nm untuk putaran 8000 rpm, hasil ini dinilai layak digunakan mengingat hasil torsi untuk Toyota Calya dengan konfigurasi internal combustion engine dihasilkan 107,87 Nm. Serta untuk kecepatan maksimum yang dapat dicapai kendaraan sebesar 111,74 km/h, untuk percepatan maksimum dengan besar 4,963 m/s², gaya dorong maksimum yang dihasilkan 12.227 N dan power maksimum yang dihasilkan sebesar 34.95 kW.

Kata kunci: coaxial magnetic gear, e-drivetrain, power efficiency, torsi

**DESIGN AND DYNAMIC MODELING OF COAXIAL
MAGNETIC GEAR IN TOYOTA CALYA ELECTRIC
VEHICLE E-DRIVETRAIN**

Student Name : Rizal Syafrie
Student ID : 02111640000123
Department : Mechanical Engineering of FTIRS-ITS
Academic Advisor : Prof. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur,
S.T., M.Eng.

ABSTRACT

Refer from Perpres No. 55/2019 concerning about acceleration of battery-based electric vehicles, this have led engineer to research one of which is the electric vehicle project ITS research team with Toyota. Convert Toyota Calya vehicle into an electric-based car as the main energy source. In this issue, the focus of final project application of coaxial magnetic gear on transmission of Toyota Calya electric vehicle. One topic of research is magnetic gear which has a solution the problem of failure in conventional gears. Basically, magnetic gear is a gear that uses permanent magnets instead of gears, so that no contact occurs in the pair of gears. In addition, it has substantial advantages compared to mechanical gear such as reducing maintenance, increasing reliability, reducing noise, and reducing excess protection.

From the background have been delivered, the following stages study are calculating the Toyota Calya gear ratio, followed by drawing design of coaxial magnetic gear using SolidWorks 2019, software with dimensional variations, these dimensional variations are 100 mm, 150 mm dan 200 mm used as input parameters for simulating using ANSYS software Maxwell 3D, the expected results to find out the torque of coaxial magnetic gear, by using the reference from the torque results, an e-drivetrain simulation using MATLAB /simscape software is used to determine the dynamics of the Toyota Calya electric vehicle. Regarding the

parameters entered include electric motors, differential systems, vehicle wheels, and vehicle bodies where coaxial magnetic gear is used as a replacement for the transmission system.

Based on the results of research, that the effect of length variations on coaxial magnetic gear can increase the output torque without replace a new gear ratio. The longer the coaxial magnetic gear, the greater the torque produced. So the design that fits the needs of the Toyota Calya car is coaxial magnetic gear with length of 150 mm because generated rms torque of 144.91 Nm at 100 rpm and rms torque value of 83,02 Nm for 8000 rpm rotation, this result considered reliable, considering torque results for the Toyota Calya with the internal combustion engine configuration produced 107.87 Nm. The maximum speed that the vehicle can reach is 111.74 km/h, for the maximum acceleration of 4.963 m/s², the maximum thrust generated is 12,227 N and the maximum power generated is 34.95 kW.

Keywords: coaxial magnetic gear, e-drivetrain, power efficiency, torque

KATA PENGANTAR

Puji syukur yang sebesar-besarnya penulis panjatkan atas kehadiran dan rahmat Allah SWT yang telah melimpahkan kasih, pertolongan, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul: “**Perancangan dan Pemodelan Dinamis *Coaxial Magnetic Gear* pada *E-drivetrain* Toyota Calya**”. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana Teknik S-1 di Departemen Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Dalam kesempatan ini, secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah melimpahkan segala anugerah dan ridho kepada penulis hingga di tahap ini. Rasulullah Muhammad SAW yang telah menjadi panutan hidup bagi seluruh makhluk di semesta alam.
2. Bapak M. Shokeh dan Ibu Diyah Kusuma, Ayah dan Mama yang selalu sayang, sabar, merawat, mendidik, memberikan doa, dukungan, dan mendengarkan segala keluh kesah penulis.
3. Arifa Febriana, adik penulis yang selalu memberikan semangat dan doa kepada penulis.
4. Ibu Dr. Ir. Helena Carolina Kis Agustin, DEA., selaku dosen wali penulis yang telah memberikan bimbingan selama masa perkuliahan.
5. Bapak Prof. Dr.Eng. Harus Laksana Guntur, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing yang telah senantiasa membantu dan membimbing dalam proses pembuatan dan penyusunan tugas akhir ini.
6. Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja MT., Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati S.T., M.T., dan Ibu Aida Annisa Amin Daman, S.T., M.T., selaku dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran untuk menyempurnakan penulisan tugas akhir ini.

7. Seluruh Dosen dan Karyawan Teknik Mesin ITS. Terima kasih yang tidak terkira.
8. Seluruh rekan-rekan Laboratorium Rekayasa Vibrasi dan Sistem Otomotif yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
9. Seluruh rekan-rekan Teknik Mesin ITS 2016 M59 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang turut membantu dan memberikan dukungan kepada penulis.
10. Seluruh Keluarga Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS khususnya mantan pengurus LBMM 2016 yang tak henti-hentinya memberikan semangat kepada penulis.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu satu

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun untuk penyempurnaan laporan tugas akhir ini. Dan penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini.

Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik. Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih.

Surabaya, Agustus 2020
Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	4
1.5 Manfaat	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Roda Gigi	5
2.2 Magnet Permanen.....	6
2.2.1 <i>Neodymium</i> Magnet (NdFeB).....	9
2.3 <i>Magnetic Gear</i>	10
2.3.1 <i>Torque Density</i> \.....	13
2.3.2 <i>Ripple Torque</i>	14
2.4 <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	15
2.4.2 Perhitungan Rasio.....	17
2.4.2 Perhitungan Torsi	18
2.5 Kendaraan Listrik	19
2.6 Gaya Hambat Kendaraan.....	20

2.7	Desain Sistem Transmisi	22
2.8	Motor Listrik BLDC	23
2.9	<i>Drawing Coxial Magnetic Gear</i>	25
2.10	Software Simulasi.....	26
2.10.1	<i>Ansys Maxwell 3D</i>	26
2.10.2	<i>MATLAB simscape</i>	27
2.11	Kajian Pustaka.....	27
2.11.1	<i>High-Performance Magnetic Gear</i>	27
2.11.2	<i>Analysis of High-Performance Magnetic Gears for Electric Vehicle</i>	28
2.11.3	<i>Dynamic Model of Coaxial Magnetic Planetary Gear</i>	29
2.11.4	<i>Performance Evaluation of Conventional and Electric Powertrain</i>	31
2.11.5	Analisis Pengaruh Frekuensi dari Koil Terhadap Rasio Torsi pada <i>Planetary Magnetic Gear</i> sebagai Pengganti CVT.....	35
2.11.6	Desain dan Analisa Sistem Tenaga dan Transmisi pada Mobil Bertenaga Listrik Ezzy ITS II	37
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		39
3.1	Diagram Alir Penelitian	39
3.1.1	Observasi.....	40
3.1.2	Perumusan Masalah	41
3.1.3	Studi Literatur	41
3.1.4	Menghitung Gaya Hambat Kendaraan.....	41
3.1.5	Menghitung Rasio Gigi Kendaraan	42
3.1.6	<i>Drawing 3D Coaxial Magentic Gear</i>	42
3.1.7	Simulasi FEM	43
3.1.8	Simulasi dan Pemodelan <i>E-drivetrain</i>	43

3.1.10	Pengambilan dan Pengolahan Data	44
3.1.11	Analisa Data dan Pembahasan	44
3.1.12	Kesimpulan Penelitian	44
3.2	Diagram Alir Perhitungan Rasio Gigi.....	45
3.3	Diagram Alir Simulasi FEM <i>Magnetic Gear</i>	46
3.3.1	Input Model 3 Dimensi	48
3.3.2	<i>Assign Material</i>	50
3.3.3	<i>Atur Region</i>	51
3.3.4	<i>Assign Boundary & Excitation</i>	51
3.3.5	<i>Assign Meshing Operation</i>	51
3.3.6	<i>Assign Parameter dan Analysis Setup</i>	52
3.3.7	<i>Iterate</i>	53
3.3.8	<i>Validation Check & Analyze All</i>	54
3.3.9	<i>Transient Solution Type</i>	55
3.3.10	<i>Assign Motion</i>	55
3.3.11	<i>Post-processing</i>	55
3.3.12	Pengambilan dan Pengolahan Data	56
3.4	Diagram Alir Simulasi <i>E-drivetrain Coaxial Magnetic Gear</i>	57
3.4.2	Rancangan <i>E-drivetrain</i> Toyota Calya	59
3.4.3	<i>Input FEM</i> Torsi <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	59
3.4.4	Blok Diagram <i>MATLAB/Simscape E-drivetrain</i> Toyota Calya.....	59
3.4.5	<i>Assign Parameter</i>	61
3.4.6	Pengambilan dan Pengolahan Data	66
BAB IV DATA ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....		67
4.1	Mobil Toyota Calya	68
4.2	Motor Listrik BLDC Yasa P400	68

4.3	Penentuan Rasio Gigi.....	69
4.3.1	Perhitungan Gaya Hambat Udara.....	70
4.3.2	Perhitungan Gaya Hambat <i>Rolling</i>	71
4.3.4	Perhitungan Gaya Hambat Tanjak.....	72
4.3.5	Perhitungan Rasio Gigi	72
4.4	<i>Drawing dan Design Coaxial Magnetic Gear</i>	73
4.5	Parameter Desain Validasi Simulasi.....	76
4.6	Analisis Torsi <i>Coaxial Magnetic Gear</i> Hasil Simulasi <i>Transient</i>	77
4.6.1	Analisis Pengaruh Variasi Panjang <i>Coaxial Magnetic Gear</i> terhadap Torsi pada Kecepatan Angular 100 rpm	78
4.6.2	Analisis Pengaruh Variasi Panjang <i>Coaxial Magnetic Gear</i> terhadap Torsi pada Kecepatan Angular 1000 rpm.....	79
4.6.3	Analisis Pengaruh Variasi Panjang <i>Coaxial Magnetic Gear</i> terhadap Torsi pada Kecepatan Angular 4000 rpm.....	81
4.6.4	Analisis Pengaruh Variasi Panjang <i>Coaxial Magnetic Gear</i> terhadap Torsi pada Kecepatan Angular 8000 rpm.....	83
4.6.6	Analisis Hasil Torsi RMS terhadap Kecepatan Angular.....	85
4.8	Analisis Respon Dinamis Kendaraan Ketika Diaplikasikan <i>Coaxial Magnetic Gear</i>	86
4.7.1	Analisis Respon Dinamis Kecepatan Kendaraan	86
4.7.2	Analisis Respon Dinamis Percepatan Kendaraan	88

4.7.3	Analisis Respon Dinamis Traksi Kendaraan	90
4.7.4	Analisis Respon Dinamis <i>Power</i> Kendaraan	92
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		95
5.1	Kesimpulan.....	95
5.2	Saran	96
DAFTAR PUSTAKA		97
LAMPIRAN.....		99
BIODATA PENULIS		109

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Macam-macam jenis roda gigi.....	5
Gambar 2.2 Orientasi magnet permanen <i>multi-pole on outside diameter</i>	7
Gambar 2.3 Tipikal kurva histerisis <i>soft</i> serta <i>hard ferromagnetic</i> (a) dan <i>Energy product</i> (BH_{max}) (b).....	8
Gambar 2.4 Magnet <i>neodymium</i> (NdFeB).....	10
Gambar 2.5 Diagram publikasi pada <i>magnetic gear</i>	11
Gambar 2.6 <i>Magenetic gear(a)</i> dan Hasil torsi <i>magnetic gear(b)</i>	12
Gambar 2.7 Konfigurasi <i>coaxial magnetic gear</i> yang diambil dari desain Athallah	15
Gambar 2.8 <i>Coaxial magnetic gear</i> dan analogi dari <i>planetary gear</i>	16
Gambar 2.9 <i>Outer rotor</i> (1), <i>Modulator</i> (2), <i>Inner rotor</i> (3), <i>Inner</i> dan <i>outer magnet</i> (4)	17
Gambar 2.10 Kendaraan listrik motor tak langsung	19
Gambar 2.11 Dinamika kendaraan Toyota Calya.....	20
Gambar 2.12 Karakteristik motor listrik.....	23
Gambar 2.13 BLDC motor Yasa P400	25
Gambar 2.14 Grafik torsi terhadap kecepatan BLDC motor Yasa P400.....	25
Gambar 2.15 Komponen CMG (a) <i>Outer rotor</i> (b) <i>Pole pieces</i> (c) <i>Inner rotor</i> (d) <i>Asembly CMG</i>	26
Gambar 2.16 Hasil dari variasi ketebalan <i>pole-pieces</i> terhadap torsi yang dihasilkan (a), dan Hasil dari variasi kecepatan <i>angular</i> terhadap efisiensi dari CMG (b).....	28
Gambar 2.17 Hasil distribusi fluks magnet pada rasio gigi 1.25 (a), dan Hasil distribusi fluks magnet pada rasio gigi 4.3 (b).....	29

Gambar 2.18 Hasil torsi (atas <i>inner rotor</i> dan bawah <i>outer rotor</i>) CMG pada rasio gigi 1.25 (a), dan Hasil torsi (atas <i>inner rotor</i> dan bawah <i>outer rotor</i>) CMG pada rasio gigi 4.3 (b)	29
Gambar 2.19 Konfigurasi CMG percobaan Oleg Molokanov ...	30
Gambar 2.20 Pemodelan dinamis CMG pada <i>software MATLAB</i>	30
Gambar 2.21 Hasil torsi pada <i>outer rotor</i> CMG.....	30
Gambar 2.22 Blok diagram kendaraan konvensional	31
Gambar 2.23 Hasil simulasi kendaraan konvensional	32
Gambar 2.24 Blok diagram kendaraan listrik	33
Gambar 2.25 Respon dinamis kecepatan dan torsi kendaraan listrik.....	34
Gambar 2.26 Respon dinamis kendaraan dengan beban yang bervariasi	35
Gambar 2.27 Profil kecepatan dan percepatan kendaraan	35
Gambar 2.28 Grafik torsi terhadap waktu.....	36
Gambar 2.29 Grafik kecepatan putar terhadap torsi	37
Gambar 2.30 Karakteristik traksi dan karakteristik power pada mobil Ezzy ITS II.....	38
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	40
Gambar 3.2 Komponen CMG (a) <i>Outer</i> (b) <i>Pole pieces</i> (c) <i>Inner</i>	43
Gambar 3.3 Diagram alir perhitungan rasio gigi	45
Gambar 3.4 Diagram alir simulasi FEM.....	48
Gambar 3.5 Arah <i>axial</i> dari dimensi <i>coaxial magnetic gear</i>	49
Gambar 3.6 Hasil <i>input</i> dan <i>assembly 3D model</i>	49
Gambar 3.7 <i>Material properties</i> (a) <i>Steel 1010</i> (b) <i>NdFeB 35</i> ..	50
Gambar 3.8 Pembuatan <i>region</i>	51
Gambar 3.9 Bentuk <i>meshing</i>	52
Gambar 3.10 Pemilihan solusi simulasi menu <i>Maxwell 3D</i>	53

Gambar 3.11 Pengaturan analisis <i>magnetostatic</i> (a) pengaturan <i>convergence</i> (b) dan pengaturan analisis <i>transient</i> (c).....	53
Gambar 3.12 Hasil analisa <i>mesh</i>	54
Gambar 3.13 Tahap <i>validation check</i>	54
Gambar 3.14 <i>Assign motion</i>	55
Gambar 3.15 Grafik torsi terhadap waktu.....	56
Gambar 3.16 Diagram alir simulasi <i>e-drivetrain coaxial magnetic gear</i>	58
Gambar 3.17 Rangkaian rancangan simulasi <i>e-drivetrain</i> Toyota Calya.....	59
Gambar 3.18 Blok diagram <i>MATLAB/Simscape</i>	60
Gambar 3.19 <i>Free body diagram</i> kendaraan	62
Gambar 3.20 Skema dari blok diferensial.....	63
Gambar 3.21 Gaya – gaya yang bekerja pada roda kendaraan ..	64
Gambar 3.22 Parameter <i>differential</i> (a), parameter bodi kendaraan (b) dan parameter roda kendaraan (c) Toyota Calya	66
Gambar 4.1 BLDC motor Yasa P400	69
Gambar 4.2 Grafik torsi terhadap kecepatan BLDC motor Yasa P400.....	69
Gambar 4.3 Grafik gaya hambat angin	70
Gambar 4.4 Grafik gaya hambat <i>rolling</i>	71
Gambar 4.5 Grafik gaya hambat tanjakan	72
Gambar 4.6 Dimensi <i>coaxial magnetic gear</i>	74
Gambar 4.7 Tampak atas susunan <i>coaxial magnetic gear</i>	75
Gambar 4.8 Tampak samping <i>coaxial magnetic gear</i> yang mempunyai variasi panjang arah <i>axial</i> 100 mm (a), 150 mm (b), 200 mm (c)	75
Gambar 4.9 Pandangan isometris dari <i>coaxial magnetic gear</i> ...	75
Gambar 4.10 Grafik torsi pada kecepatan angular 100 rpm	78
Gambar 4.11 Grafik torsi pada kecepatan angular 1000 rpm	79

Gambar 4.12 Grafik <i>ripple torque</i> pada kecepatan angular 1000 rpm	80
Gambar 4.13 Grafik torsi pada kecepatan angular 4000 rpm	81
Gambar 4.14 Grafik <i>ripple torque</i> pada kecepatan angular 4000 rpm	82
Gambar 4.15 Grafik torsi pada kecepatan angular 8000 rpm	83
Gambar 4.16 Grafik <i>ripple torque</i> pada kecepatan angular 8000 rpm	84
Gambar 4.17 Grafik hasil torsi rms terhadap kecepatan angular	85
Gambar 4.18 Grafik respon dinamis kecepatan kendaraan terhadap waktu	86
Gambar 4.19 Grafik respon dinamis kecepatan RMS kendaraan terhadap waktu	87
Gambar 4.20 Grafik respon dinamis percepatan kendaraan terhadap waktu	88
Gambar 4.21 Grafik respon dinamis percepatan RMS kendaraan terhadap waktu	89
Gambar 4.22 Grafik respon dinamis traksi kendaraan terhadap waktu	90
Gambar 4.23 Grafik respon dinamis traksi RMS kendaraan terhadap waktu	91
Gambar 4.24 Grafik respon dinamis <i>power</i> kendaraan terhadap waktu	92
Gambar 4.25 Grafik respon dinamis <i>power</i> rms kendaraan terhadap waktu	93

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Properties</i> utama pada beberapa jenis magnet permanen	9
Tabel 2.2 Spesifikasi BLDC motor Yasa P400	25
Tabel 2.3 Parameter kendaraan uji	31
Tabel 2.4 Parameter mesin kendaraan uji	32
Tabel 2.5 Batas atas parameter <i>powertrain</i> kendaraan listrik.....	33
Tabel 2.6 Parameter motor listrik PMSM.....	33
Tabel 3.1 Variasi dimensi arah <i>axial</i>	49
Tabel 3.2 Perancangan simulasi <i>coaxial magnetic gear</i> dengan variasi dimensi arah <i>axial</i> (mm) dan kecepatan angular (rpm) ...	56
Tabel 3.3 Parameter <i>e-drivetrain</i> Toyota Calya	66
Tabel 4.1 Spesifikasi mobil Toyota Calya.....	68
Tabel 4.2 Spesifikasi BLDC motor Yasa P400	69
Tabel 4.3 Variasi dimensi arah <i>axial</i> dari <i>coaxial magnetic gear</i>	73
Tabel 4.4 Spesifikasi <i>coaxial magnetic gear</i>	74
Tabel 4.5 Parameter dimensi desain penelitian A. Rottolande ...	76
Tabel 4.6 Hasil validasi	76

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mobil listrik merupakan kendaraan yang ramah lingkungan dan telah menjadi salah satu alternatif untuk menekan polusi udara karena tidak menghasilkan emisi gas buang. Berdasarkan Perpres No. 55/2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (*Battery Electric Vehicle*) untuk transportasi jalan dan telah diundangkan sejak 12 Agustus 2019. Hal tersebut menyebabkan para ahli untuk terus melakukan riset dan pengembangan kendaraan listrik. Salah satunya ialah proyek mobil listrik yang dicetuskan oleh tim riset ITS yang bekerjasama oleh Toyota. Mengusung mobil berjenis Toyota Calya dibekali dengan konfigurasi ICE (*Internal Combustion Engine*) akan dikonversi menjadi mobil berbasis tenaga listrik sebagai sumber penggerak utama. Dalam masalah ini, yang menjadi fokus utama dalam penulisan tugas akhir adalah sistem transmisi mobil listrik yang menggunakan *coaxial magnetic gear*. Dengan adanya teknologi ini efisiensi yang tinggi mampu untuk menunjang produktivitas.

Efisiensi yang maksimal dapat diperoleh dengan meminimalisasi hambatan yang terjadi pada benda atau sistem tertentu. Hambatan pada suatu sistem yang bergerak pada dasarnya disebabkan oleh dua benda atau permukaan saling bergesekan satu sama lain. Hal ini sering terjadi pada penggunaan roda gigi diberbagai komponen utama transmisi, sistem tersebut memiliki fungsi untuk mentransmisikan daya, dan sebagai pengubah tingkat putaran poros serta digunakan untuk mengubah arah sumbu putar dan mengubah gerak rotasi menjadi translasi. Roda gigi memiliki kemampuan menerima beban yang tinggi, efisiensi yang baik, kemampuan meneruskan daya dan putaran yang besar serta kemampuan untuk melakukan transmisi daya dengan perbedaan sudut poros tertentu. Namun, dua buah gaya yang bekerja pada gigi-gigi yang saling bertautan menimbulkan tegangan kontak dan tegangan *bending*. Tegangan tersebut dapat memicu kegagalan

pada roda gigi. Secara umum kegagalan pada roda gigi adalah *wear*, *surface fatigue* dan *plastic wear* yang disebabkan oleh tegangan kontak sedangkan *breakage* adalah kegagalan yang disebabkan oleh tegangan *bending* (Wibowo, 2017).

Salah satu topik penelitian yang dilakukan adalah *magnetic gear* yang memiliki solusi atas permasalahan kegagalan pada roda gigi konvensional. Pada dasarnya, *magnetic gear* merupakan roda gigi yang menggunakan magnet permanen sebagai pengganti gigi-gigi sehingga tidak ada kontak yang terjadi pada pasangan roda gigi. Transmisi daya terjadi dengan adanya gaya tarik menarik dan tolak menolak antar magnet pada *magnetic gear*. Selain itu, memiliki keunggulan substansial dibandingkan dengan *mechanical gear* seperti mengurangi perawatan, meningkatkan keandalan, mengurangi kebisingan dan mengurangi perlindungan berlebih. (Joergensen & Thorlief, 2010). *Coaxial magnetic gear* merupakan satu dari beberapa jenis *magnetic gear* yang banyak digunakan karena kemampuannya dalam mentransmisikan daya serta memiliki kepadatan torsi tinggi (Rasmusen, 2005). Kepadatan torsi terbentuk akibat medan magnet, ini dikarenakan gaya tolak menolak magnet terjadi secara simultan (Atallah, 2001). Namun, *coaxial magnetic gear* memiliki karakteristik sama seperti *internal spur gear* akan tetapi letak dari porosnya berada dalam satu garis sumbu terdiri dari *outer permanent magnetic array* atau *low speed rotor*, *inner permanent magnetic array* atau *high speed rotor*, dan IAP atau *static modulator* (Carlos, 2017).

Pada tugas akhir ini akan dilakukan pemodelan menggunakan *software* SolidWork 2019 untuk mengetahui karakteristik dimensi *coaxial magnetic gear* sesuai dengan kebutuhan reduksi serta dilakukan pengamatan tentang hasil torsi dari *coaxial magnetic gear* dengan *software ANSYS Maxwell 3D*. Dengan menggunakan acuan dari hasil torsi tersebut maka dilakukan pemodelan *e-drivetrain* disimulasikan menggunakan *software MATLAB/Simscape* yang memberikan gambaran untuk mengetahui karakteristik dinamis kendaraan yang berupa respon kecepatan, percepatan, traksi, dan *power*. Mengenai parameter

yang dimasukkan antara lain motor listrik, sistem *differential*, roda kendaraan, dan bodi kendaraan dimana *coaxial magnetic gear* digunakan sebagai pengganti sistem transmisi.

Melalui penelitian ini diharapkan dapat ketahui karakteristik torsi yang dihasilkan oleh *coaxial magnetic gear*, dan karakteristik traksi dan *power* mobil Toyota Calya. Pengetahuan ini sangat penting bagi industri otomotif, karena *coaxial magnetic gear* kedepannya dapat menggantikan roda gigi konvensional dengan karakteristik traksi yang sama. Merupakan terobosan terbaru untuk melakukan efisiensi kendaraan listrik.

1.2 Perumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana rancangan *coaxial magnetic gear* untuk mobil listrik Toyota Calya?
2. Bagaimana pengaruh perubahan dimensi *coaxial mangentic gear* terhadap torsi yang dihasilkan?
3. Bagaimana respon dinamis dan performa *coaxial magnetic gear* ketika diaplikasikan pada mobil listrik Toyota Calya?

1.3 Batasan Masalah

Beberapa hal yang menjadi batasan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Struktur *coaxial magnetic gear* terdiri dari *inner rotor*, *pole pieces*, dan *outer rotor*.
2. Jenis magnet permanen yang digunakan adalah magnet *neodymium* (NdFeB) N35.
3. Material *inner*, *pole pieces*, dan *outer* menggunakan *steel 1010*.
4. Dimensi kendaraan yang digunakan menggunakan referensi mobil Toyota Calya.
5. Transmisi kendaraan satu tingkat (*single speed*).

6. Gaya hambat yang diperhitungkan adalah gaya hambat *aerodinamis* kendaraan, gaya hambat *rolling* kendaraan, dan gaya hambat tanjakan.
7. Motor listrik yang digunakan BLDC Yasa P400 dengan 35 kW.
8. Torsi yang disalurkan dari motor listrik ke roda tidak mengalami *losses*.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui rancangan *coaxial magnetic gear* untuk mobil listrik Toyota Calya.
2. Mengetahui karakteristik perubahan dimensi *coaxial magnetic gear* terhadap torsi yang dihasilkan.
3. Mengetahui respon dinamis dan performa *coaxial magnetic gear* ketika diaplikasikan pada mobil listrik Toyota Calya.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai inovasi terbaru serta dapat menjadi pedoman bagi produsen roda gigi dan industri-industri dalam pengembangan serta penggunaan *magnetic gear*. Serta kedepannya dapat menggantikan roda gigi klasik dengan karakteristik torsi yang sama. Merupakan terobosan terbaru dalam sistem *drivetrain* untuk meningkatkan efisiensi dalam sistem transmisi khususnya pada mobil listrik

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Roda Gigi

Roda gigi (*mechanical gear*) merupakan salah satu elemen mesin yang banyak digunakan sebagai alat pentransmisi torsi (daya) dan pengubah tingkat putaran poros di berbagai aplikasi industri. Roda gigi meneruskan daya dari motor melalui kontak antar gigi-giginya. 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 Macam-macam jenis roda gigi

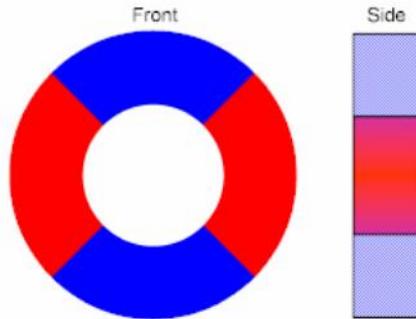
Roda gigi banyak dipilih karena memiliki nilai torsi *density* yang tinggi, namun terdapat beberapa kekurangan seperti adanya gesekan antar komponen yang dapat menyebabkan keausan, kebisingan yang ditimbulkan, panas yang ditimbulkan bisa sangat tinggi, biasanya rusak apabila dikenai kondisi torsi yang berlebih, memerlukan pelumasan, perawatan secara rutin, dimana getaran dan keandalan menjadi perhatian utama.

2.2 Magnet Permanen

Magnet adalah logam yang memiliki medan magnet serta sifat dapat menarik benda disekitarnya terutamanya besi atau baja. Magnet yang sering kali dijumpai terbuat dari bahan besi, baja, dan campuran logam serta telah banyak dimanfaatkan pada industri otomotif ataupun industri-industri lainnya. Berdasarkan sifat materialnya, material magnet dibedakan menjadi beberapa sifat antara lain *diamagnetic* merupakan material yang kekuatan magnetnya sangat lemah dan berlawanan arah dengan medan magnet, sehingga tidak dapat menarik material lain. Sifat yang kedua ialah *paramagnetic* merupakan material yang memiliki kekuatan magnet lemah namun memiliki arah yang searah terhadap medan magnet material magnet lainnya, sehingga terjadi tarik-menarik dengan bahan yang bersifat magnet disekitarnya namun kekuatan tarik-menariknya lemah. Sifat yang terakhir dan yang paling banyak digunakan adalah material yang bersifat *ferromagnetic*, dimana material ini memiliki kekuatan magnet yang kuat dan memiliki arah yang searah dengan medan magnet material magnet lainnya sehingga terjadi tarik-menarik dengan magnet disekitarnya dengan kekuatan tarik-menarik yang kuat. Material dengan sifat *ferromagnetic* biasanya banyak yang dijadikan sebagai bahan dasar dari permanen magnet (Hamidizadeh, 2016).

Beberapa elemen lain juga memperlihatkan sifat kemagnetan, tapi tidak semua magnet berwujud logam. Teknologi mutakhir sekarang telah menggunakan magnet metalik maupun keramik. Teknologi ini juga memanfaatkan elemen-elemen lain untuk meningkatkan kemampuan magnetik. Magnet terdiri dari tiga kriteria, bisa berwujud magnet tetap (magnet permanen), magnet tidak tetap, dan magnet buatan. Magnet permanen adalah magnet yang tidak memerlukan tenaga atau bantuan dari luar untuk menghasilkan daya magnet (berelektromagnetik). Magnet jenis ini dapat mempertahankan kemagnetannya dalam waktu yang sangat lama. Terdapat beberapa jenis magnet permanen yang selama ini

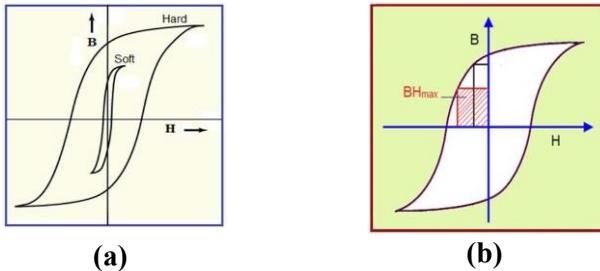
diketahui seperti *neodymium* magnet (NdFeb), *samarium-cobalt* magnet (SmCo), keramik magnet, plastik magnet, *alnico* magnet.



Gambar 2.2 Orientasi magnet permanen *multi-pole on outside diameter*

Medan magnet (H) adalah daerah disekitar magnet yang masih dipengaruhi gaya magnet dan digambarkan dengan garis-garis gaya magnet yang menyebar dari kutub-kutub magnet. Garis-garis gaya magnet ini selalu keluar dari kutub utara menuju kutub selatan dan garis-garis gaya magnet tidak pernah saling berpotongan dengan garis-garis gaya magnet yang lain berasal dari magnet yang sama sehingga dapat diketahui apabila medan magnet terkuat terdapat pada kutub-kutub magnet. Jika medan magnet dihasilkan oleh arus listrik, maka garis-garis medan magnet kontinu dan membentuk *loop* tertutup. Namun jika medan magnet dihasilkan dari kutub magnet, maka garis-garis medan magnet keluar dari kutub utara menuju kutub selatan.

Histerisis menggambarkan proses *magnetitation* reversal pada bahan magnetik dari kondisi awal yang tidak termagnetitation kemudian diinduksi oleh medan magnetik luar sehingga membentuk kurva histerisis. Tipikal kurva histerisis untuk *soft ferromagnetic* dan *hard ferromagnetic* ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Tipikal kurva histerisis *soft* serta *hard ferromagnetic* (a) dan *Energy product* (BH_{max}) (b)

Karakteristik yang membedakan bahan *softmagnetic* dengan bahan *hardmagnetic* adalah *energy product* (BH_{max}) yang dapat dihasilkan. *Energy product* (BH_{max}) merupakan luasan persegi terbesar yang dapat dibentuk pada kuadran kedua. Bahan *hardmagnetic* merupakan bahan yang memiliki kurva histerisis yang besar dan lebar seperti yang ditunjukkan pada Gambar (b). Bahan *hardmagnetic* adalah sebutan untuk bahan yang susah untuk didemagnetisasi yang membuat bahan ini dijadikan magnet permanen. Bahan *hardmagnetic* dibagi menjadi dua, yaitu magnet konvensional dan *rare earth magnet*. Magnet konvensional memiliki nilai maksimum *energy product* (BH_{max}) berkisar antara 2-80 kJ/m³, seperti baja, paduan *Cunife* (Cu-Ni-Fe), dan paduan *Alnico* (Al-Ni-Co). Bahan *hardmagnetic* yang memiliki energi tinggi seperti Nd₂Fe₁₄B, SmCo₅ memiliki nilai BH_{max} lebih besar dari 80 kJ/m³ masuk dalam *rare earth magnet*. Bahan *hardmagnetic* biasanya banyak diaplikasikan pada motor, speaker, bor, dan lain sebagainya, dikarenakan semakin besar BH_{max} maka bahan magnet tersebut akan sangat susah untuk demagnetisasi.

2.2.1 Neodymium Magnet (NdFeB)

Magnet *neodymium* merupakan magnet permanen yang paling kuat. Magnet *neodymium* termasuk jenis *rare earth magnet*, terbuat dari campuran logam *neodymium*. Dikembangkan pada tahun 1982 oleh *Sumitomo Special Metals*, mereka mengumumkan telah membuat magnet $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ dengan *energy product* sebesar 290 kJ/m^3 . Ditahun yang sama, *General Motor* di Amerika Serikat juga telah menyelesaikan riset mereka mengenai magnet *neodymium* yang dibuat dengan teknik yang sedikit berbeda dan menghasilkan magnet *neodymium* dengan *energy product* sebesar 420 kJ/m^3 . Terdapat beberapa *properties* utama yang digunakan untuk membandingkan antara magnet *neodymium* dengan magnet permanen lainnya seperti yang tertera pada tabel 2.1. Pada tabel tersebut terdapat beberapa *properties* utama dari beberapa jenis magnet permanen, antara lain *remanence* yang digunakan untuk mengukur kekuatan medan magnet dari suatu material. Selanjutnya merupakan *coercivity* yakni ketahanan suatu material untuk menghilangkan sifat kemagnetannya (*demagnetitation*). Properti berikutnya ialah *energy product* merupakan rapat energi magnet dari suatu material. Serta properti yang terakhir adalah *curie temperature* merupakan temperatur dimana suatu material dapat kehilangan sifat kemagnetannya (Hamidizadeh, 2016).

Tabel 2.1 *Properties* utama pada beberapa jenis magnet permanen

Jenis Permanent Magnet	<i>Remenence</i> (T)	<i>Coercivity</i> (kA/m)	<i>Maximum Energy Product</i> (kJ/m^3)	<i>Currie Temperature</i> ($^{\circ}\text{C}$)
Ferrite	0,23-0,39	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

Berdasarkan Tabel 2.1 dapat dilihat bahwa magnet *neodymium* (NdFeB) dapat disimpulkan lebih baik daripada jenis magnet permanen lainnya dari beberapa aspek *properties* yang dimiliki. Sehingga magnet *neodymium* banyak digunakan pada alat

yang membutuhkan magnet permanen seperti motor listrik, speaker, bor, dan sebagainya. Meskipun *Currie temperature* dari magnet *neodymium* lebih rendah daripada SmCo atau Alnico tetapi *remanence*, *coercivity*, dan *energy product* lebih unggul daripada jenis magnet permanen lainnya dan juga harganya yang lebih murah. Magnet *neodymium* ini diklasifikasikan berdasarkan maksimum *energy product* yang dimiliki. Semakin besar *energy product* yang dimiliki suatu magnet permanen mengindikasikan semakin kuat magnet tersebut (Singh, Gite, & Narkhede, 2014).



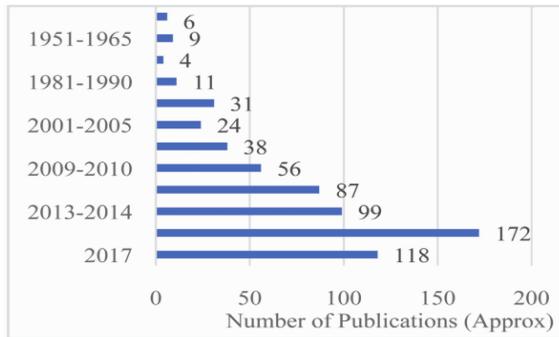
Gambar 2.4 Magnet *neodymium* (NdFeB)

Magnet *neodymium* 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.

2.3 *Magnetic Gear*

Magnetic gear pertama kali ditemukan pada tahun 1901. Desain awal (hingga 1960-an) menyerupai roda gigi mekanik, tetapi dengan masing-masing gigi gigi diganti oleh sumber magnet. Pada sebagian besar desain awal, elektromagnet digunakan sebagai sumber magnet daripada magnet permanen, karena magnet permanen yang tersedia pada saat itu secara signifikan lebih lemah daripada magnet yang ada sekarang. Setelah penemuan magnet kekuatan lebih tinggi pada tahun 1966 dan 1983, penggunaan magnet permanen menjadi hal biasa. Sekitar waktu yang sama,

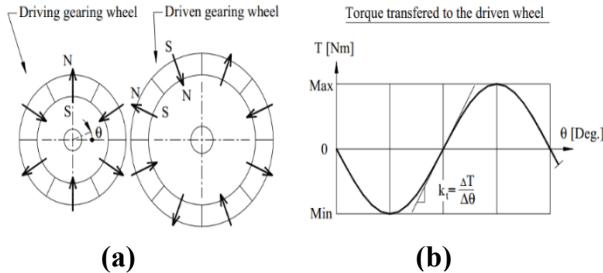
konfigurasi baru dikembangkan untuk mencapai peningkatan torsi dalam kapasitas besar dengan secara bersamaan menggunakan beberapa magnet. *Coaxial magnetic gear* merupakan desain magnet dengan kualitas yang tinggi ini, terinspirasi dari roda gigi sederhana *planetary gear* (Justin, 2018). Gambar 2.5 menunjukkan perkiraan jumlah publikasi terkait *magnetic gear* pada abad terakhir. Termasuk publikasi dalam bentuk *conference proceedings*, artikel jurnal, majalah, dan paten. Hal ini dapat mempermudah dalam pengembangan *magnetic gears* yang layak diimplementasikan pada skala industri.



Gambar 2.5 Diagram publikasi pada *magnetic gear*

Untuk mengatasi kerugian yang timbul dari *mechanical gear* akibat kontak secara langsung antar gigi-gigi, maka timbul sebuah solusi yakni *magnetic gear* (MG) menjadi sebuah alternatif untuk mengganti *mechanical gear box*. *Magnetic gear* menawarkan bobot yang lebih ringan, pengurangan perawatan, memiliki keandalan tinggi, tanpa keausan, dapat beroperasi bebas kontak, tidak muncul suara dan memiliki efisiensi yang lebih tinggi. Sebuah studi yang membandingkan efisiensi berbagai jenis roda gigi menunjukkan bahwa *magnetic gear* dapat memiliki efisiensi lebih dari 95% dalam hal transmisi torsi dari *gear* roda gigi ke pinion roda gigi (Fukuoka et al. 2013). Namun terdapat kekurangan pada *magnetic gear* dikarenakan *torque density* pada *magnetic*

gear relatif rendah lalu memiliki sistem magnetik yang kompleks. Maka dari itu, dilakukan riset-riset agar nilai *torque density magnetic gear* dapat meningkat dan nilai dari *torque ripple* menurun, sehingga pengaplikasian *magnetic gear* dapat dikembangkan lebih jauh (Raj, Varghese, Nair, & Vincent, 2016).



Gambar 2.6 *Magenetic gear(a)* dan Hasil torsi *magnetic gear(b)*

Pada gambar 2.6 dapat dilihat bahwa *magnetic gear* memiliki batas torsi maksimal T_{max} , dimana apabila *magnetic gear* dikenai torsi melebihi torsi maksimalnya maka akan terjadi *slip* maka sebisa mungkin pengoperasian *magnetic gear* harus berada dibawah torsi maksimalnya. Pada *magnetic gear* juga terjadi *torsion spring* (k_t), seperti pada persamaan (2.1) berikut.

$$k_t = \frac{\Delta T}{\Delta \theta} \quad (2.1)$$

dimana:

K_t = *torsion spring* (Nm/rad)

ΔT = perubahan torsi (Nm)

$\Delta \theta$ = perubahan sudut (rad)

2.3.1 Torque Density

Dalam upaya memperbaiki atau meningkatkan desain dan performa dari suatu sistem mekanik, perancang, produsen, dan konsumen harus mempertimbangkan beberapa parameter-parameter yang ada. Salah satu parameternya yaitu *torque density* dapat didefinisikan kemampuan torsi suatu objek, dimana torsi per unit volume atau torsi per total unit volume diberikan. Satuan SI dari *torque density* berupa *Joule* per meter kubik atau *foot-pounds per cubic foot* dalam satuan *British*. Singkatnya, *torque density* mengukur kemampuan suatu objek dalam membawa torsi pada berat dan ukuran tertentu. Parameter performa seperti ini juga bisa diaplikasikan pada *coaxial magnetic gear*. *Gear* dengan permanen magnet memiliki volume dari rotor dan volume ini dibandingkan dengan torsi maksimum yang bisa disalurkan dinamakan dengan torsi *density* aktif, yang dinyatakan pada persamaan (2.2) berikut (Jørgensen, 2010).

$$\rho_a = \frac{T_{max}}{V_A} \quad (2.2)$$

dimana:

$$\begin{aligned} \rho_a &= \text{active torque density (Nm/m}^3\text{)} \\ T_{max} &= \text{torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)} \\ V_A &= \text{volume rotor (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

Active torque density (ρ_a) dapat digunakan sebagai parameter untuk membandingkan antara jenis *magnetic gear* yang satu dengan jenis *magnetic gear* yang lainnya. *Torque density* yang dihasilkan oleh *magnetic gear* dapat untuk mengetahui keunggulan yang ada pada *magnetic gear*. Untuk mencari *total torque density* (ρ_R) pada *magnetic gear* dengan menggunakan persamaan (2.3).

$$\rho_R = \frac{T_{max}}{V_T} \quad (2.3)$$

dimana:

$$\begin{aligned} \rho_R &= \text{total torque density (Nm/m}^3\text{)} \\ T_{max} &= \text{torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)} \\ V_T &= \text{volume total (m}^3\text{)} \end{aligned}$$

2.3.2 Ripple Torque

Ripple torque adalah efek yang umumnya terjadi pada motor listrik, mengacu dalam peningkatan atau penurunan torsi *output* secara berkala ketika poros motor berputar. Hal ini diukur sebagai perbedaan dalam torsi maksimum dan minimum selama satu putaran penuh, serta dinyatakan sebagai persentase. Untuk mencari *ripple torque* pada *magnetic gear* dengan menggunakan persamaan (2.4).

$$T_{ripple} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \times 100\% \quad (2.4)$$

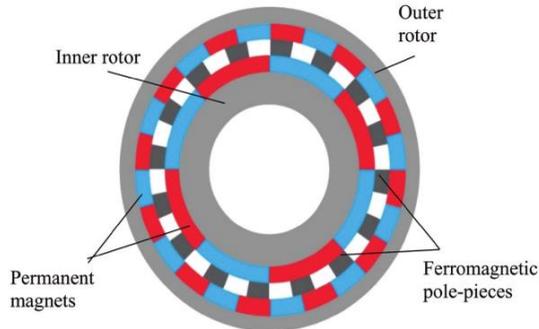
dimana:

$$\begin{aligned} T_{ripple} &= \text{ripple torque (\%)} \\ T_{max} &= \text{torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)} \\ T_{min} &= \text{torsi minimal yang ditransmisikan (Nm)} \\ T_{avg} &= \text{torsi rata – rata yang ditransmisikan (Nm)} \end{aligned}$$

Hasil *cogging torque* adalah variasi dalam hasil torsi yang disebut sebagai *ripple torque* terjadi ketika motor diberi energi dengan arus konstan. Karena sifat interaksi antara medan magnet rotor dan stator, bervariasi secara sinusoidal. *Ripple torque* pada motor listrik umumnya tidak diinginkan karena menyebabkan getaran, kebisingan, dan dapat mengurangi umur pakai mesin.

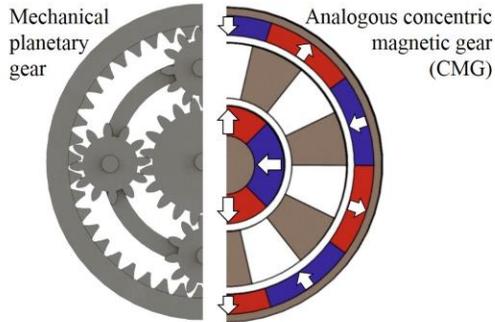
2.4 Coaxial Magnetic Gear

Penelitian pertama yang memanfaatkan *rare-earth magnet* (NdFeB) dicetuskan oleh Athallah dan Howe pada (2001). Dalam makalah tersebut mereka mencetuskan konfigurasi *magnetic gear* baru yang sering disebut *coaxial magnetic gear*. Dari simulasi yang dilakukan, didapat *torque density* sebesar 100 kNm/m^3 yang hasilnya lebih besar daripada *magnetic gear* yang telah diteliti sebelumnya. Pemodelan *magnetic gear* yang digunakan akibat adanya *ferromagnetic pole pieces* diantara dua rotor. Komponen yang menyusun *coaxial magnetic gear* ini antara lain *inner rotor*, *outer rotor*, dan *ferromagnetic pole piece* dapat ditunjukkan dalam gambar 2.7.



Gambar 2.7 Konfigurasi *coaxial magnetic gear* yang diambil dari desain Athallah

Coaxial magnetic gear merupakan paling banyak digunakan karena kemampuannya dalam mentransmisikan daya dari dua 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 (Athallah, 2001). Peneliti lain ada yang menyimpulkan bahwa *coaxial magnetic gear* (CMG) sebenarnya sama seperti *spur gear* tetapi letak dua *gear*nya berada dalam satu poros (Carlos 2017).

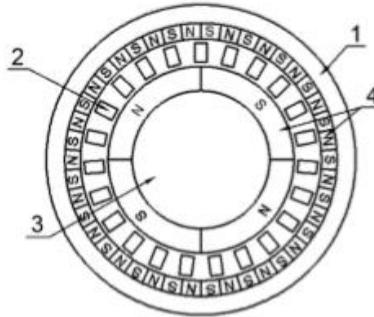


Gambar 2.8 *Coaxial magnetic gear* dan analogi dari *planetary gear*

CMG yang tersusun atas dua jenis magnet permanen yang memiliki perbedaan jumlah kutub magnet dan komparasikan pada sebuah *planetary gear*. *Flux modulator* atau *ferromagnetic pole-pieces* yang terletak di antara *inner rotor* dan *outer rotor* mirip dengan fungsi dan *ring* dan *sun gear* pada sebuah *planetary gear* dapat ditunjukkan dengan gambar 2.8. Modulator terdiri bagian atas bahan ferromagnetik dan non-magnetik prinsip tersebut dinamakan *flux modulator*. Agar memungkinkan semua kutub magnet di *ring* dan *sun* saling berhubungan sehingga menghasilkan rasio roda gigi. Keterlibatan semua kutub magnet ini memungkinkan CMG memiliki kepadatan torsi yang lebih tinggi daripada yang lainnya. Peningkatan lebih lanjut pada kerapatan torsi CMG dilakukan dengan menggunakan *Halbach array* dengan menggabungkan beberapa magnet dalam pola orientasi tertentu untuk menghasilkan medan magnet dalam bentuk sinusoidal tanpa menggunakan bahan ferromagnetik (Justin,2018).

2.4.2 Perhitungan Rasio

Dalam menentukan rasio gigi pada CMG, hal yang pertama kali yang dijadikan parameter terlebih dahulu adalah jumlah pasangan magnet pada *outer rotor* dan *inner rotor* yang ditunjukkan pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 *Outer rotor* (1), *Modulator* (2), *Inner rotor* (3), *Inner dan outer magnet* (4)

Jika telah ditentukan jumlah pasangan magnet pada *outer rotor* dan *inner rotor*, dengan menggunakan rumus (2.5) maka dapat dihitung rasio *coaxial magnetic gear* sebagai berikut.

$$Gr = \frac{n_{pp}}{p_i} \quad (2.5)$$

agar dapat mencapai torsi yang stabil, maka harus memenuhi syarat dengan menggunakan perumusan (2.6) untuk menentukan jumlah *ferromagnetic pole pieces*.

$$n_{pp} = p_i + p_o \quad (2.6)$$

dimana:

n_{pp} = jumlah *ferromagnetic pole pieces*

p_i = jumlah pasangan *inner magnet*

p_o = jumlah pasangan *outer stator magnet*

2.4.2 Perhitungan Torsi

Ketika *coaxial magnetic gear* beroperasi akan muncul gaya tolak menolak magnet *outer rotor* dan *inner rotor*, hal tersebut menyebabkan putaran dari *outer rotor* dan *inner rotor* berlawanan arah. Fenomena ini menyebabkan timbulnya perbedaan torsi pada *inner* dan *outer*-nya. Maka torsi *coaxial magnetic gear* dapat dihitung dengan perumusan (2.7) untuk *inner rotor* dan perumusan (2.8) untuk *outer rotor*.

a. Torsi *inner rotor*:

$$T_{m_in} = \frac{L_{ef} R_{in}^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{r_in} B_{\theta_in} d\theta \quad (2.7)$$

b. Torsi *outer rotor*:

$$T_{m_out} = \frac{L_{ef} R_{out}^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{r_out} B_{\theta_out} d\theta \quad (2.8)$$

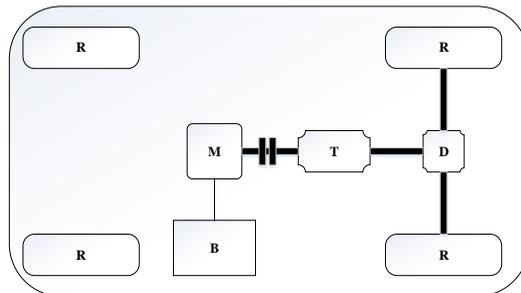
dimana:

- 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*

Nilai besar dan kecilnya torsi yang dihasilkan tergantung pada *flux density* dan harus memenuhi syarat bahwa kutub-kutubnya memiliki pasangan. Rumus di atas merupakan perhitungan secara teori namun hal tersebut dapat dilakukan pendekatan dengan cara simulasi dalam *software ANSYS Maxwell 3D*.

2.5 Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik adalah kendaraan yang digerakkan dengan motor listrik, menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai atau tempat penyimpanan energi. Kendaraan listrik dibagi menjadi kendaraan listrik menggunakan motor tak langsung yaitu hanya memakai satu motor dan kendaraan listrik motor langsung yaitu menggunakan 2 atau 4 motor listrik yang langsung ditempelkan pada roda penggerak. Kendaraan listrik dengan motor tak langsung memiliki konsep yang sama dengan kendaraan menggunakan mesin biasa. Motor listrik pada kendaraan ini menggantikan fungsi dari mesin pada kendaraan biasa, dan transmisi yang digunakan sama dengan kendaraan biasa. jadi energi kinetik dari motor listrik ditransmisikan oleh sistem penyalur daya menjadi gaya dorong pada roda penggerak.

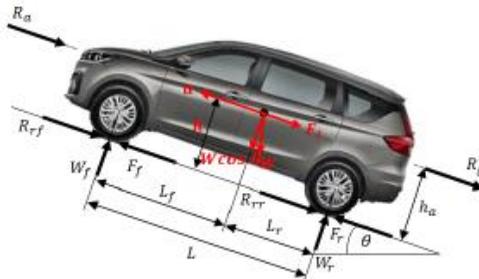


Gambar 2.10 Kendaraan listrik motor tak langsung

Desain dari kendaraan listrik dengan baterai dan dengan motor tidak langsung terlihat seperti pada gambar 2.10. Dimana keterangan dari gambar adalah, R= roda, M= motor listrik, T= transmisi, B= baterai. Kendaraan tersebut menggunakan satu motor listrik, dimana motor mendapat energi listrik dari baterai, lalu motor listrik menghasilkan energi kinetik yang kemudian ditransmisikan oleh sistem transmisi dan sampai ke roda belakang. (Sutantra & Sampurno, 2010).

2.6 Gaya Hambat Kendaraan

Terdapat gaya-gaya yang bekerja pada kendaraan yang bergerak lurus pada sebuah permukaan dengan sudut taanjakan tertentu. Adapun gaya-gaya yang bekerja dan posisi kerjanya yang ditunjukkan pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Dinamika kendaraan Toyota Calya

Saat kendaraan berjalan, terdapat gaya-gaya yang melawan arah gerakan dari kendaraan. Gaya – gaya ini disebut gaya hambat. Gaya hambat pada kendaraan terbagi menjadi tiga, antara lain gaya hambat angin (R_{AE}), gaya hambat *rolling* (R_R), dan gaya hambat tanjakan (R_G). Selain ketiga gaya hambat, kendaraan akan menerima gaya inersia (F_i) yang melawan arah gerak kendaraan.

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 (2.9). (Sutantra, 2015).

$$R_{AE} = \frac{1}{2} \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot V_A^2 \quad (2.9)$$

dimana:

ρ = densitas udara

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

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 pada persamaan (2.10).

$$R_R = N \cdot \cos\theta \cdot f_r \quad (2.10)$$

apabila kendaraan melaju pada jalan dengan keadaan datar, gaya hambat *rolling* dirumuskan pada persamaan (2.11).

$$R_R = N \cdot f_r \quad (2.11)$$

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 pada persamaan (2.12).

$$R_G = W \cdot \sin\theta \quad (2.12)$$

dimana:

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

2.7 Desain Sistem Transmisi

Sistem transmisi adalah suatu sistem yang berfungsi untuk mengkonversikan torsi dan kecepatan dari motor listrik menjadi torsi dan kecepatan yang berbeda-beda dan selanjutnya diteruskan ke penggerak akhir. Dalam suatu kendaraan sistem transmisi adalah bagian dari sistem pemindah tenaga. Dengan adanya sistem transmisi maka putaran mesin dengan putaran poros yang dihubungkan dengan penggerak akhir dapat dikontrol. Fungsi dari kontrol sendiri supaya tenaga yang dihasilkan oleh mesin sesuai dengan kebutuhan kendaraan. Sedangkan penggerak akhir atau *final drive* mempunyai fungsi untuk meneruskan tenaga yang dihasilkan mesin ke roda penggerak. (Sutantra & Sampurno, 2010).

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 (2.13).

$$I_1 = \frac{F_t \times r}{T_m \times i_d \times \eta_t} = \frac{(W \sin \theta_{max} + f_r \cdot W \cos \theta + R_a)r}{T_m \times i_d \times \eta_t} \quad (2.13)$$

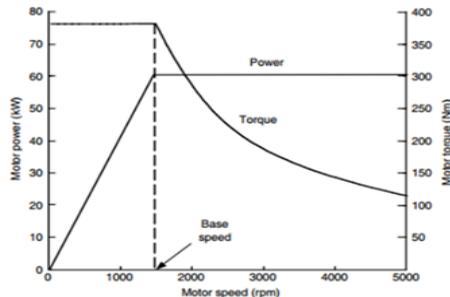
dimana, F_t = gaya torsi kendaraan, W = berat kendaraan, T_m = torsi mesin, η_t = efisiensi dari transmisi, r = jari-jari roda, f_r = koefisien rolling ban, I_d = perbandingan gigi diferensial, R_a = hambatan angin. Pada perumusan di atas gaya hambat *drag* dapat diabaikan ketika kendaraan menanjak pada sudut tersebut, karena kecepatan kendaraan saat menanjak umumnya terjadi pada kecepatan rendah. m/s^2

Setelah menentukan rasio transmisi tingkat pertama, selanjutnya menentukan besar dari rasio transmisi terakhir pada kendaraan berdasarkan kecepatan maksimum yang ditentukan. Saat ingin mencapai kecepatan maksimum yang ditentukan maka motor harus dapat mencukupi daya untuk mengatasi gaya hambat yang ada seperti *rolling resistance* dan gaya hambat *aerodinamis* yang terjadi pada kendaraan. Berdasarkan hal tersebut perumusan rasio transmisi pada tingkat gigi akhir ditunjukkan persamaan (2.14).

$$I_m = \frac{F_t \times r}{T_m \times i_d \times \eta_t} = \frac{(f_r \cdot W + \frac{1}{2} \rho \cdot C_d A_f v_m^2) r}{T_m \times i_d \times \eta_t} \quad (2.14)$$

2.8 Motor Listrik BLDC

Motor listrik merupakan sumber tenaga dari kendaraan listrik dan memiliki karakteristik seperti pada gambar 2.12.



Gambar 2.12 Karakteristik motor listrik

Berdasarkan karakteristik diatas dapat diketahui bahwa *power* atau tenaga dari motor listrik dibawah kecepatan dasar (*base speed*) akan terus bertambah secara linier sampai mencapai tenaga maksimum yang tepat berada saat berada pada kecepatan *base*. Dan dari kecepatan dasar sampai dengan kecepatan maksimum, tenaga yang dihasilkan motor listrik konstan sebesar tenaga maksimum yang dapat dihasilkan motor listrik. Sedangkan dari segi torsi yang

dihasilkan oleh motor listrik berdasarkan karakteristik diatas dapat dijelaskan bahwa torsi akan tetap pada kecepatan dibawah kecepatan dasar, yaitu sebesar torsi maksimum yang dapat dihasilkan motor listrik. Lalu setelah melewati kecepatan dasar torsi dari motor listrik akan menurun secara hiperbolik, hal ini karena pada kecepatan rendah dibawah kecepatan dasar, tegangan listrik masuk ke motor meningkat dengan meningkatnya putaran yang diatur melalui *converter* elektronik, sedangkan *flux* dijaga konstan. Pada saat motor sudah mencapai kecepatan dasar, tegangan pada motor mencapai tegangan dari sumber pemasuk energi. Setelah melewati kecepatan dasar, tegangan pada motor dijaga tetap sedangkan kekuatan *flux* melemah secara hiperbolik dengan bertambahnya kecepatan.

Kurva karakteristik dari motor listrik seperti diatas ditentukan oleh besarnya kecepatan dasar (V_b) 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.

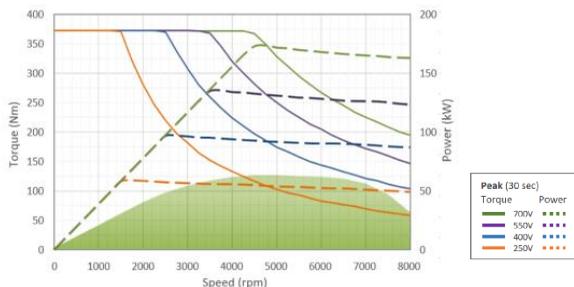
Motor arus searah adalah sebuah motor yang membutuhkan tegangan searah untuk menjalankannya yang terlihat pada gambar 2.13. Pada era sekarang ini motor DC dikembangkan tanpa menggunakan sikat yang dikenal dengan Motor BLDC (*Brushless Direct Current Motor*). Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya *brush*. Adapun spesifikasi motor listrik YASA 400 ditunjukkan pada tabel 2.2 dan memiliki performa torsi dengan kecepatan seperti gambar 2.14.



Gambar 2.13 BLDC motor Yasa P400

Tabel 2.2 Spesifikasi BLDC motor Yasa P400

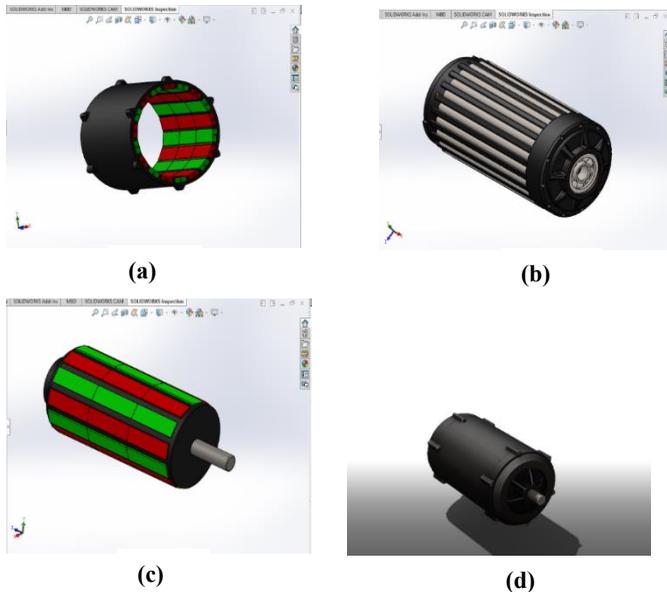
<i>Characteristic Yasa P400</i>	<i>Performance</i>
<i>Peak Torque</i>	370 Nm
<i>Peak Power</i>	160 kW
<i>Speed</i>	0-8000 rpm
<i>Peak Efficiency</i>	96 %
<i>Dry Mass</i>	24 Kg
<i>Voltage for 35 kW</i>	250 V



Gambar 2.14 Grafik torsi terhadap kecepatan BLDC motor Yasa P400

2.9 *Drawing Coxial Magnetic Gear*

Perancangan model 3D *coaxial magnetic gear* seperti ditunjukkan pada gambar 2.15 dilakukan dengan program *SolidWorks 2019* Terdapat bagian-bagian yang dibuat yaitu *inner rotor*, *outer*, dan *pole piece*.



Gambar 2.15 Komponen CMG (a) *Outer rotor* (b) *Pole pieces* (c) *Inner rotor* (d) *Assembly CMG*

2.10 Software Simulasi

2.10.1 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.

2.10.2 *MATLAB simscape*

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.

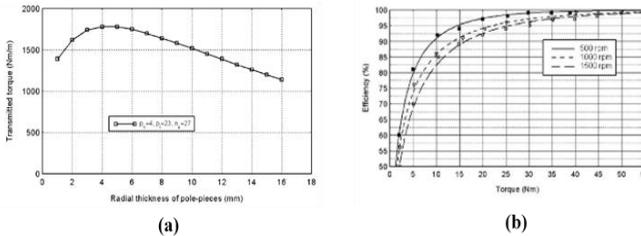
Software ini digunakan untuk membuktikan torsi yang dihasilkan oleh *coaxial magnetic gear* (CMG) mampu menerima beban dari bus listrik dan dapat menggerakkan bus tersebut tanpa terjadi *slip*. Disusun *block-block* yang terdiri dari komponen *drivetrain* bus listrik meliputi baterai, motor listrik, 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.

2.11 Kajian Pustaka

2.11.1 *High-Performance Magnetic Gear*

Penelitian ini dilakukan oleh Attalah dan Howe melakukan pengujian *coaxial magnetic gear* yang mengarah ke performa yang tinggi untuk mentransmisikan torsi dari *magnetic gear* tersebut yang memiliki rasio gigi 5.75 dan hasil dari percobaan ini variasi dari ketebalan dari *pole-pieces* berpengaruh terhadap torsi yang

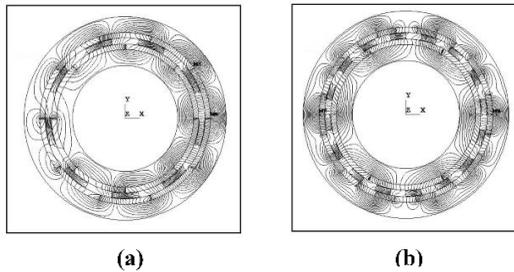
dihasilkan pada *coaxial magnetic gear* sesuai gambar 2.16. Dan variasi kecepatan *inner rotor* pada rasio gigi 5.75 didapatkan efisiensi dari *magnetic gear* yang mencapai angka 97%.



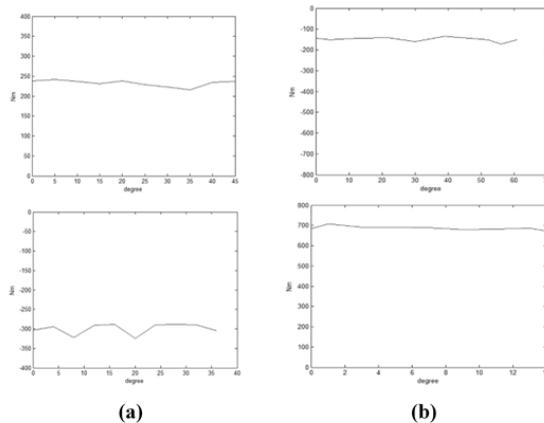
Gambar 2.16 Hasil dari variasi ketebalan *pole-pieces* terhadap torsi yang dihasilkan (a), dan Hasil dari variasi kecepatan *angular* terhadap efisiensi dari CMG (b)

2.11.2 Analysis of High-Performance Magnetic Gears for Electric Vehicle

Penelitian yang dilakukan oleh A. Rottolande, dkk melakukan pengujian *coaxial magnetic gear* yang diaplikasikan pada kendaraan listrik. Dengan menggunakan magnet permanen (PM) yang terbuat dari bahan magnet (NdFeB). *Coaxial magnetic gear* (CMG) memiliki struktur yang sangat sederhana dengan memiliki volume yang rendah dibandingkan topologi lain dari roda gigi magnet lainnya. Torsi yang mampu ditransmisikan $50 \div 100 \text{ kNm} / \text{m}^3$ sebanding dengan roda gigi mekanik. Maka, bisa jadi dengan mudah diintegrasikan untuk mobil listrik. Dilakukan dengan metode karakteristik elektromagnetik dari magnetic gear akan dianalisis dengan menggunakan metode Elemen Hingga (FEM) yang memberikan hasil yang akurat dengan mempertimbangkan detail geometris dan non-linearitas bahan magnetik. Percobaan variasi rasio gigi 1.25 ($P_i=4, P_o=5, n_b=9$); dan 4.3 ($P_i=3, P_o=13, n_b=16$); Hasil yang didapatkan dalam penelitian ini ada 2 hasil dari fluks dan torsi yang dihasilkan pada gambar 2.17 dan gambar 2.18.



Gambar 2.17 Hasil distribusi fluks magnet pada rasio gigi 1.25 (a), dan Hasil distribusi fluks magnet pada rasio gigi 4.3 (b)

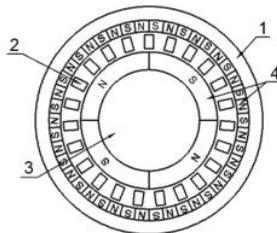


Gambar 2.18 Hasil torsi (atas *inner rotor* dan bawah *outer rotor*) CMG pada rasio gigi 1.25 (a), dan Hasil torsi (atas *inner rotor* dan bawah *outer rotor*) CMG pada rasio gigi 4.3 (b)

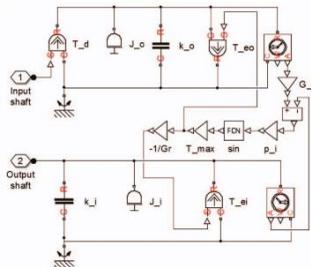
2.11.3 *Dynamic Model of Coaxial Magnetic Planetary Gear*

Penelitian yang dilakukan oleh Oleg Molokanov, dkk melakukan pengujian *coaxial magnetic gear* dengan melakukan pemodelan dinamis. CMG seperti gambar 2.19 dengan menggunakan dua komponen yang bergerak (*inner rotor* dan *outer rotor*) tetapi memiliki perbedaan kecepatan. Dalam percobaan ini menggunakan *software MATLAB* terlihat pada gambar 2.20 untuk

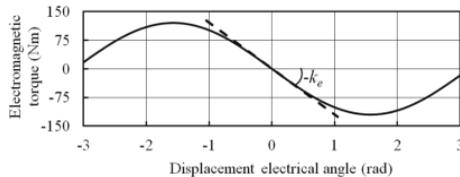
melihat secara keutuhan dari performa *magnetic gear* tidak hanya melihat dari sisi *inner rotor* dan *outer rotor*. Dalam percobaan yang dilakukan menggunakan parameter *gear ratio* sebesar 11.5 dengan susunan ($P_i = 2$, $P_o = 21$, $n_b = 23$). Dalam penelitian untuk membuktikan bahwa pemodelan menggunakan software *MATLAB/Simulink* memiliki hasil bahwa torsi yang dihasilkan simulasi tidak konstan pengaruh dari *torque ripple* yang ditunjukkan pada gambar 2.21.



Gambar 2.19 Konfigurasi CMG percobaan Oleg Molokanov



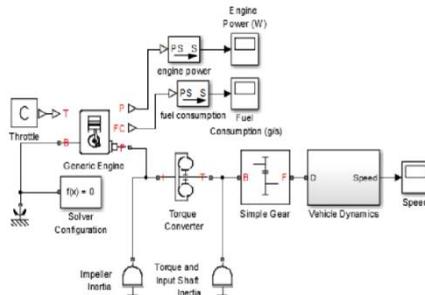
Gambar 2.20 Pemodelan dinamis CMG pada software *MATLAB*



Gambar 2.21 Hasil torsi pada *outer rotor* CMG

2.11.4 Performance Evaluation of Conventional and Electric Powertrain

Penelitian yang dilakukan oleh Monika Verma, dkk pada tahun 2018 bertujuan membandingkan kinerja kendaraan konvensional dengan kendaraan listrik. Model dinamis dari kendaraan konvensional yang disimulasikan menggunakan *MATLAB/Simulink* ditunjukkan pada gambar 2.22, parameter kendaraan uji pada tabel 2.3, dan parameter mesin kendaraan uji pada tabel 2.4.



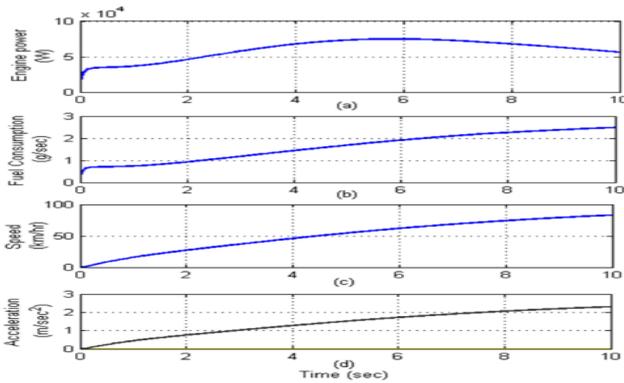
Gambar 2.22 Blok diagram kendaraan konvensional

Tabel 2.3 Paramater kendaraan uji

Parameter	Nilai
<i>Mass</i>	1200 Kg
<i>Frontal area</i>	3 m ²
<i>Drag coefficient</i>	0.4
<i>Rolling radius</i>	0.3 m
<i>Wheel velocity threshold</i>	0.1 m/s
<i>Vertical load on wheels</i>	3000 N
<i>Peak longitudinal force</i>	3500 N
<i>Slip at peak load</i>	10
<i>Carrier to driveshaft teeth ratio</i>	4
<i>Follower to base teeth ratio</i>	2

Tabel 2.4 Parameter mesin kendaraan uji

Parameter	Nilai
Type	Spark-ignition
Maximum power	150 kW
Speed at maximum power	4500 Rpm
Maximum speed	6000 Rpm
Stall speed	500 Rpm
Inertia	0.2 Kg.m ²
Speed threshold	100 Rpm
Fuel consumption per revolution	25 mg/rev

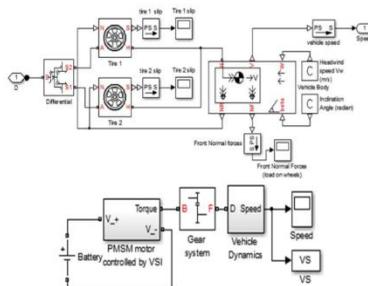
**Gambar 2.23** Hasil simulasi kendaraan konvensional

Hasil simulasi menunjukkan saat kendaraan mulai dinyalakan saat $t = 0$ s dibutuhkan daya dari mesin yang lebih banyak untuk memberikan torsi awal pada *throttle*. Saat kendaraan mulai melaju daya akan berkurang namun konsumsi bahan bakar akan meningkat. Pada gambar 2.23 (a) dan 2.23 (b) menunjukkan grafik hasil simulasi daya mesin dan konsumsi bahan bakar pada kendaraan konvensional berdasarkan waktu. Daya maksimum dari mesin yang digunakan adalah 75 kW. Semakin bertambahnya kecepatan kendaraan maka konsumsi bahan bakar akan meningkat sebesar 2.5 g/sec. Untuk grafik kecepatan dan percepatan dapat dilihat pada gambar 2.23 (c) dan gambar 2.23 (d). Percepatan kendaraan mencapai nilai 2.227 m/s².

Tabel 2.5 Batas atas parameter *powertrain* kendaraan listrik

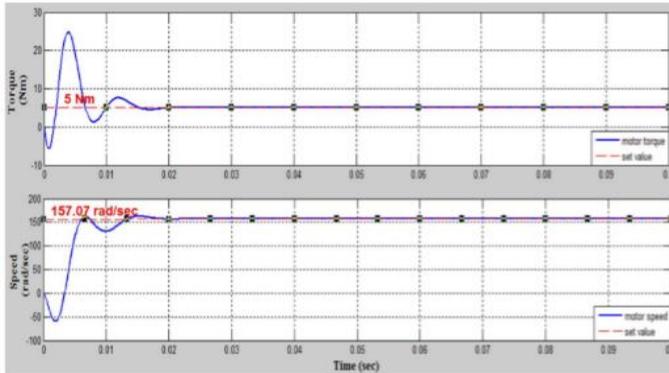
Parameter	Nilai
Torsi	Tergantung pada beban kendaraan
Kecepatan	90 Km/h
Percepatan	3 m/s

Untuk memenuhi spesifikasi parameter *powertrain* yang telah ditentukan pada tabel 2.5 maka kendaraan listrik dirancang menggunakan motor listrik tipe PMSM yang dihubungkan secara langsung pada *gearbox*. VSI tiga fasa digunakan untuk mengendalikan motor dan kontrol *switch* pada inverter menggunakan SVPWM dengan frekuensi *switch* 50 kHz. Berikut model dinamis dari kendaraan listrik yang disimulasikan menggunakan *MATLAB/Simulink* ditunjukkan pada gambar 2.24 dan parameter motor listrik PMSM pada tabel 2.6.

**Gambar 2.24** Blok diagram kendaraan listrik**Tabel 2.6** Parameter motor listrik PMSM

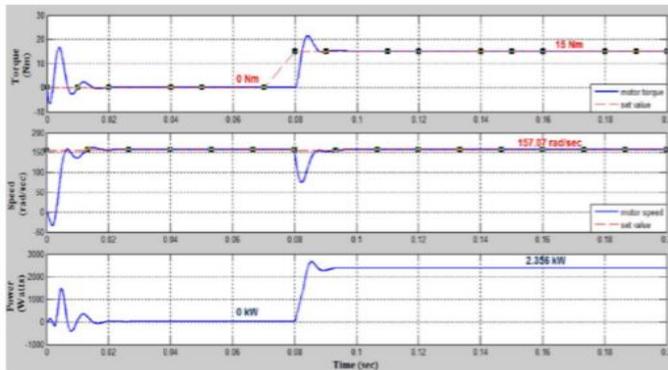
Parameter	Nilai
Rated Power	9 kW
Rated Torque	60 Nm
Rated Voltage	300 V
Poles	4
Phases	3
Stator Resistance	0,5 ohm
Armature Inductance	0,9 mH
Magnetic Flux	0,1 V-sec
Moment of Inertia	$5,0 \times 10^{-4} \text{ kg-m}^2$
Field Intensity	$4,0 \times 10^{-4} \text{ Nm-sec}$

Simulasi dilakukan dengan memberikan tegangan 3 fasa sebesar 100 V pada frekuensi 50 Hz pada motor. Saat kendaraan mulai dinyalakan terdapat torsi beban awal sebesar 5 Nm dengan kecepatan kendaraan 1500 rpm. Hasil respon dinamis torsi dan kecepatan ditunjukkan pada gambar 2.25 (a) dan (b).

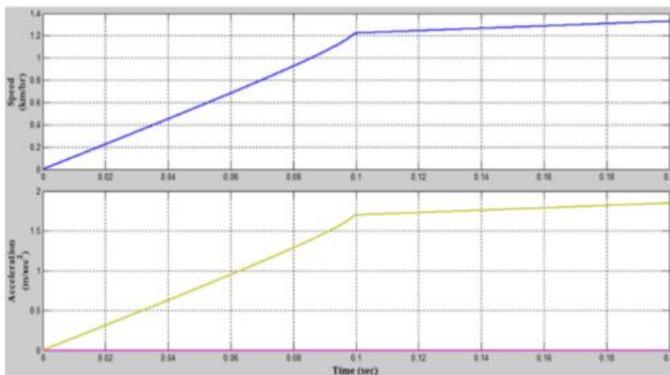


Gambar 2.25 Respon dinamis kecepatan dan torsi kendaraan listrik

Analisa selanjutnya yaitu respon kendaraan apabila diberikan beban bervariasi. *Powertrain* kendaraan menggunakan 9 kW, 300V, dan 4 *poles* PMSM. Pada gambar 2.26 menunjukkan respon dinamis torsi, kecepatan, dan daya yang dikonsumsi berdasarkan waktu. Pada $t = 0,08$ s diberikan torsi beban sebesar 15 Nm pada diferensial sehingga menyebabkan perubahan profil kecepatan dan percepatan kendaraan seperti ditunjukkan pada gambar 2.27. Kendaraan mengalami percepatan hingga $3,33 \text{ m/s}^2$, hal ini menunjukkan penggunaan PMSM pada *powertrain* kendaraan listrik dapat memperoleh kecepatan yang relatif lebih cepat sebesar $1,103 \text{ m/s}^2$ dibandingkan kendaraan konvensional.



Gambar 2.26 Respon dinamis kendaraan dengan beban yang bervariasi

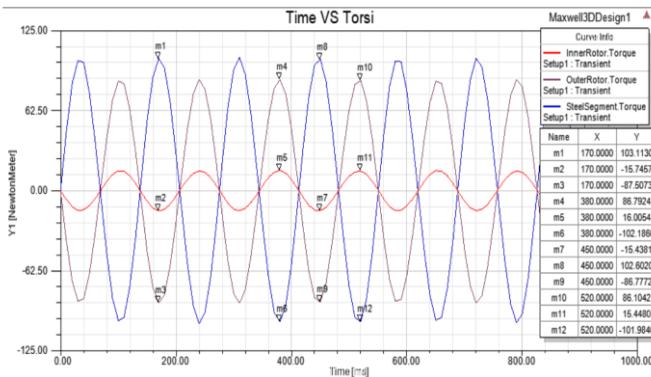


Gambar 2.27 Profil kecepatan dan percepatan kendaraan

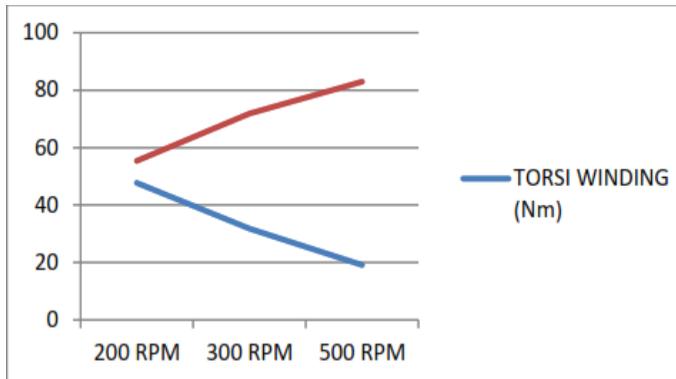
2.11.5 Analisis Pengaruh Frekuensi dari Koil Terhadap Rasio Torsi pada *Planetary Magnetic Gear* sebagai Pengganti CVT

Penelitian yang dilakukan oleh Aminudin Filosa pada tahun 2018 bertujuan membandingkan variasi frekuensi dari koil pada rasio torsi *planetary magnetic gear*. Penerapan *magnetic gear* pada *continuous variable transmission* (CVT) dapat diilustrasikan dengan pendekatan fungsinya, yaitu *planetary gear* mekanik dapat

di gantikan dengan *magnetic planetary gear*. Variabel pada CVT yang menggunakan gaya sentrifugal dengan fungsi kecepatannya dapat digantikan dengan variasi arus yang merubah fluks magnet. Fluks magnet akan merubah variasi rasio kecepatan dari *magnetic gear* dengan jumlah *pole pair* yang sama. Nilai torsi maksimum *inner rotor*, *steel segment*, dan *outer rotor* pada simulasi *planetary magnetic gear* menggunakan *software ANSYS Maxwell 16.0* adalah 15,606 Nm, 86,5564 Nm, dan 102,6389 Nm. Semakin besar input kecepatan putar dari motor maka semakin besar juga frekuensi yang ditimbulkan. Semakin besar frekuensi maka torsi motor akan semakin kecil. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.28 dan gambar 2.29.



Gambar 2.28 Grafik torsi terhadap waktu

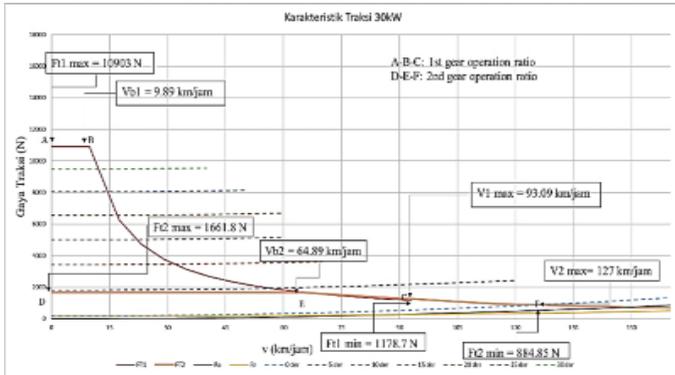


Gambar 2.29 Grafik kecepatan putar terhadap torsi

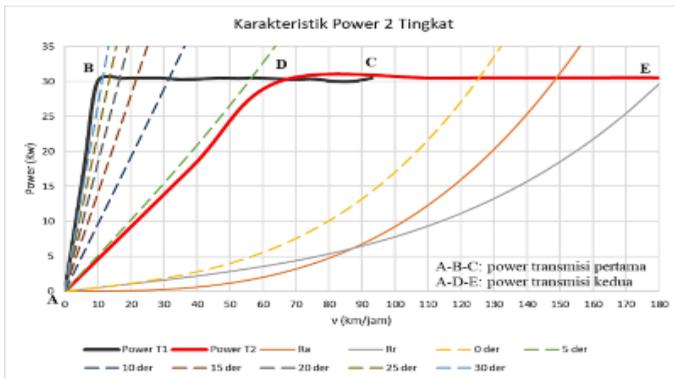
2.11.6 Desain dan Analisa Sistem Tenaga dan Transmisi pada Mobil Bertenaga Listrik Ezzy ITS II

Penelitian terdahulu yang membahas tentang desain kendaraan listrik dilakukan oleh Nyoman Budi Kusuma dengan judul Desain dan Analisa Sistem Tenaga dan Transmisi pada Mobil Bertenaga Listrik Ezzy ITS II. Pada penelitian ini terdapat 2 tahapan, yaitu tahap perhitungan dan tahap analisa terhadap sistem tenaga dan transmisi dari Mobil Listrik Ezzy II ITS. Pada tahap perhitungan adalah menghitung besar gaya hambat yang terjadi pada kendaraan, selanjutnya mencari spesifikasi dari motor dan baterai yang digunakan kendaraan dan yang terakhir adalah menghitung traksi dan power dari transmisi yang digunakan. Pada tahap analisa akan dilakukan analisa terhadap karakteristik traksi serta karakteristik power yang terjadi daritransmisi tersebut. Dari penelitian ini diperoleh spesifikasi motor yang sesuai adalah YASA Motor P400 series 30kw dan baterai LiFePO4 120Ah. Mobil Listrik Ezzy ITS II menggunakan 2 tingkat transmisi dengan rasio tingkat pertama 2.362 dan tingkat kedua 0,36. Pada gambar 2.30 menunjukkan rari rasio transmisi tersebut karakteristik yang dihasilkan adalah dengan transmisi pertama kendaraan dapat melaju sampai 12 km/h pada sudut tanjakan 30 derajat, serta kecepatan maksimum dari transmisi pertama adalah 93,09 km/h

pada jalan mendatar. Sedangkan untuk transmisi kedua dapat digunakan pada jalan mendatar dengan kecepatan mencapai 127 km/h. Mobil Listrik Ezzy II ITS dengan daya motor 30 Kw dapat dipilih karena sudah mampu memenuhi parameter rancangan yaitu dapat melewati tanjakan 30 derajat dengan kecepatan 10 km/h dan pada jalan datar dengan kecepatan 100 km/h.



(a)



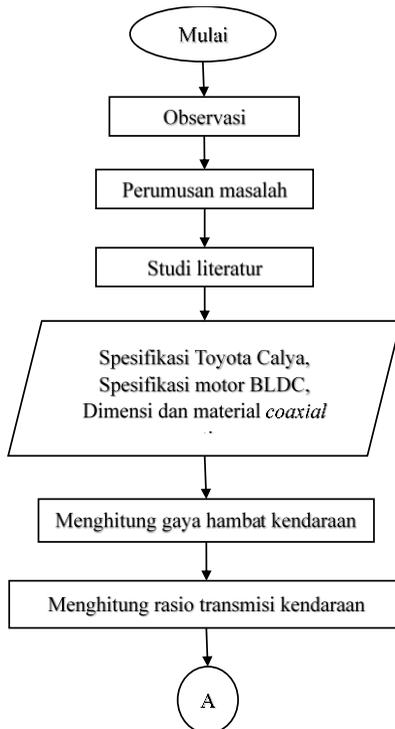
(b)

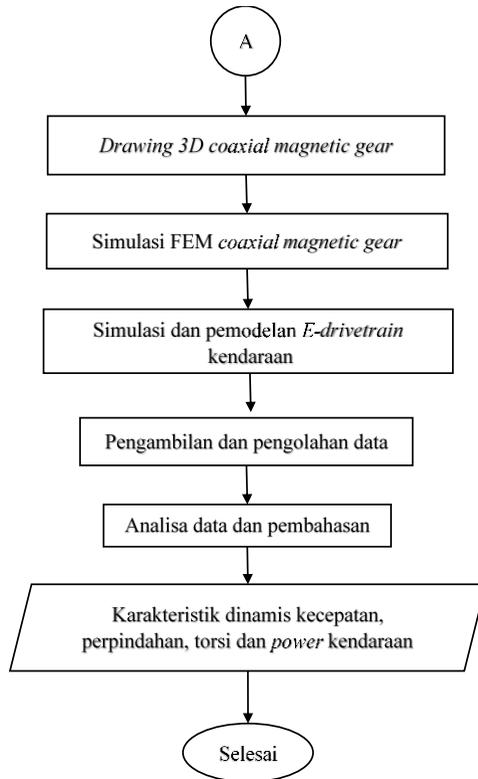
Gambar 2.30 Karakteristik traksi dan karakteristik power pada mobil Ezzy ITS II

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab metodologi akan dijelaskan mengenai *flowchart* dari penelitian yang dilakukan, dimulai dari studi literatur sampai dengan hasil yang diinginkan yaitu diagram kecepatan, percepatan, torsi dan *power* dari mobil Toyota Calya menggunakan *coaxial magnetic gear*. Selanjutnya akan dijelaskan tahapan yang dilakukan dalam pengerjaan penelitian ini sekaligus *flowchart* dari analisa perhitungan yang telah dilakukan.

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

Gambar 3.1 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan penelitian pada tugas akhir ini. Penjelasan mengenai tiap tahapan pada diagram alir 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 perumusan masalah yang terdapat pada lingkup observasi yang ditentukan. 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 rancangan *coaxial magnetic gear* untuk mobil listrik Toyota Calya, mobil listrik tersebut diintegrasikan dengan motor BLDC 35 kW yang selanjutnya dilakukan simulasi pengaruh perubahan dimensi *coaxial magnetic gear* terhadap torsi yang dihasilkan dan model dinamis dan performa *coaxial magnetic gear* ketika diaplikasikan pada mobil listrik Toyota Calya dalam bentuk respon dinamis kecepatan, percepatan, traksi dan *power*.

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, karakteristik mobil listrik, metode elemen hingga, pemodelan dinamis, dan penelitian terdahulu yang telah dirangkum.

3.1.4 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,

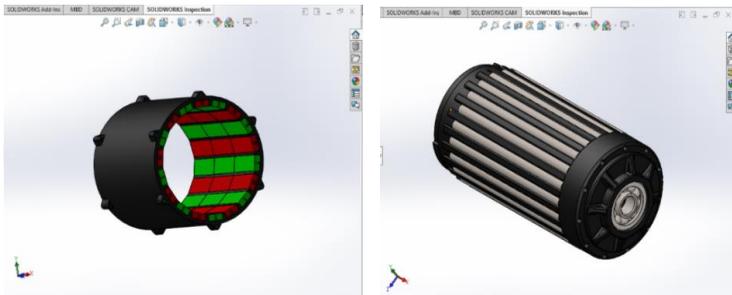
langkah keenam adalah menghitung gaya hambat total yang terjadi pada kendaraan.

3.1.5 Menghitung Rasio Gigi Kendaraan

Sistem transmisi adalah suatu sistem yang berfungsi untuk mengkonversikan torsi dan kecepatan dari motor listrik menjadi torsi dan kecepatan yang berbeda-beda, yang selanjutnya diteruskan ke penggerak akhir. Dalam suatu kendaraan sistem transmisi adalah bagian dari sistem pemindah tenaga. 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, hal tersebut harus diperhatikan jika menggunakan *single speed transmission*.

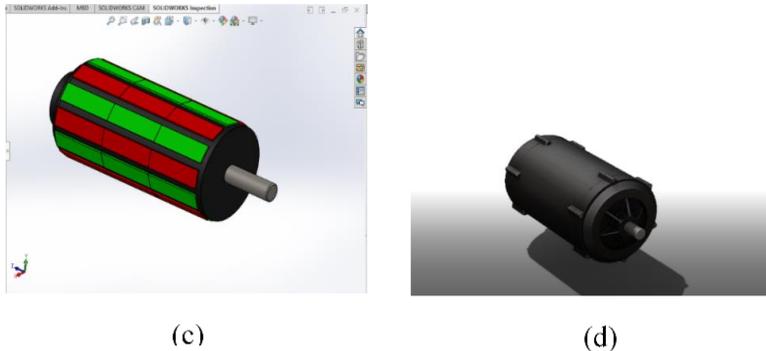
3.1.6 Drawing 3D Coaxial Magnetic Gear

Perancangan model 3D *coaxial magnetic gear* seperti ditunjukkan pada gambar 3.3 dilakukan dengan program *SolidWorks* 2019 Terdapat bagian-bagian yang dibuat yaitu *inner*, *outer*, dan *pole piece*.



(a)

(b)



Gambar 3.2 Komponen CMG (a) *Outer* (b) *Pole pieces* (c) *Inner* (d) *Assembly CMG*

3.1.7 Simulasi FEM

Dilakukan simulasi FEM dengan penyelesaian *transient* dan *magnetostatic*. Penyelesaian *transient* dilakukan dengan basis waktu. Dari simulasi ini akan didapatkan hasil berupa torsi dari *coaxial magnetic gear* yang digunakan sebagai acuan simulasi pemodelan *e-drivetrain*. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan pada simulasi FEM akan dijelaskan pada sub bab 3.3.

3.1.8 Simulasi dan Pemodelan *E-drivetrain*

Setelah simulasi FEM selesai, dilakukan simulasi *e-drivetrain* dengan *software MATLAB/Simscape*. Penyelesaian yang dilakukan adalah dinamika kendaraan meliputi kecepatan, percepatan, traksi dan *power* dengan menggunakan hasil torsi dari *coaxial magnetic gear*. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan pada simulasi *e-drivetrain* akan dijelaskan pada sub bab 3.4.

3.1.10 Pengambilan dan Pengolahan Data

Setelah semua simulasi telah selesai, data pokok yang diambil adalah torsi dari *coaxial magnetic gear* dengan variasi dimensi panjang arah *axial coaxial magnetic gear*. Setelah itu, data tersebut dikelompokkan sesuai dengan variasi kecepatan *angular input coaxial magnetic gear*. Hasil torsi dari simulasi FEM digunakan acuan untuk simulasi *e-drivetrain* dengan variasi dimensi panjang arah *axial coaxial magnetic gear* untuk diambil data respon dinamis kecepatan, percepatan, traksi dan *power*.

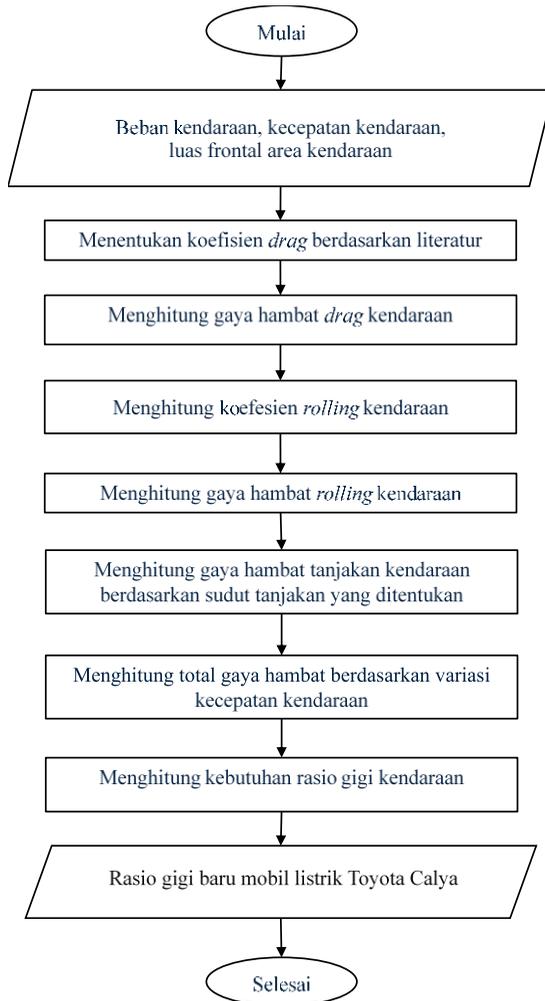
3.1.11 Analisa Data dan Pembahasan

Setelah data selesai diolah, dilakukan analisa dan pembahasan mengenai hasil dari simulasi. Analisa meliputi bagaimana pengaruh dimensi *coaxial magnetic gear* terhadap respon dinamis kecepatan, percepatan, traksi dan *power* Toyota Calya.

3.1.12 Kesimpulan Penelitian

Dari analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan yang menjawab tujuan dari penelitian ini. Hasil yang diharapkan adalah karakteristik dinamis kendaraan dengan menggunakan transmisi *coaxial magnetic gear* pada mobil Toyota Calya.

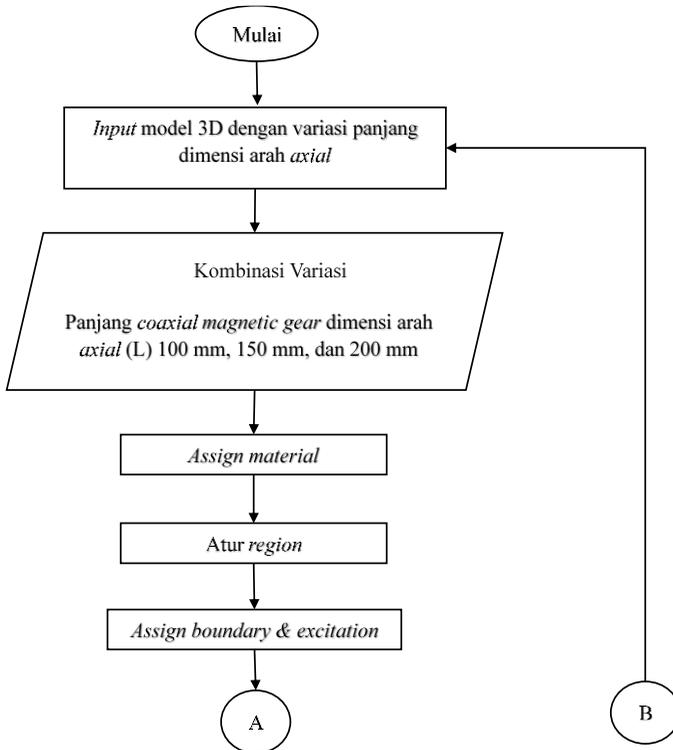
3.2 Diagram Alir Perhitungan Rasio Gigi

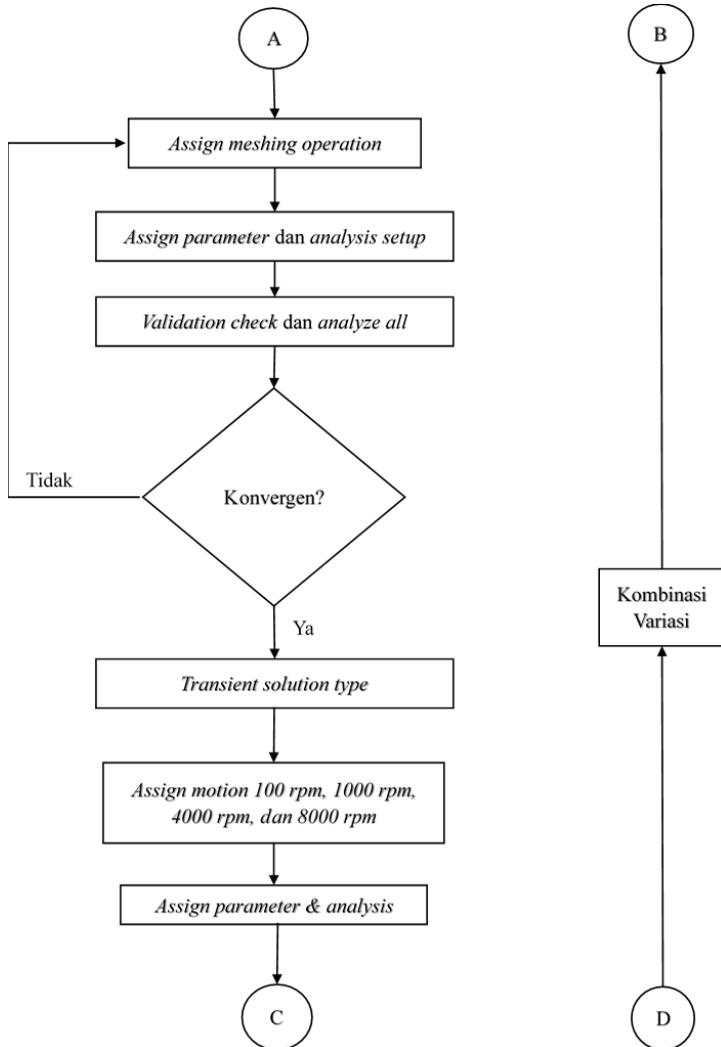


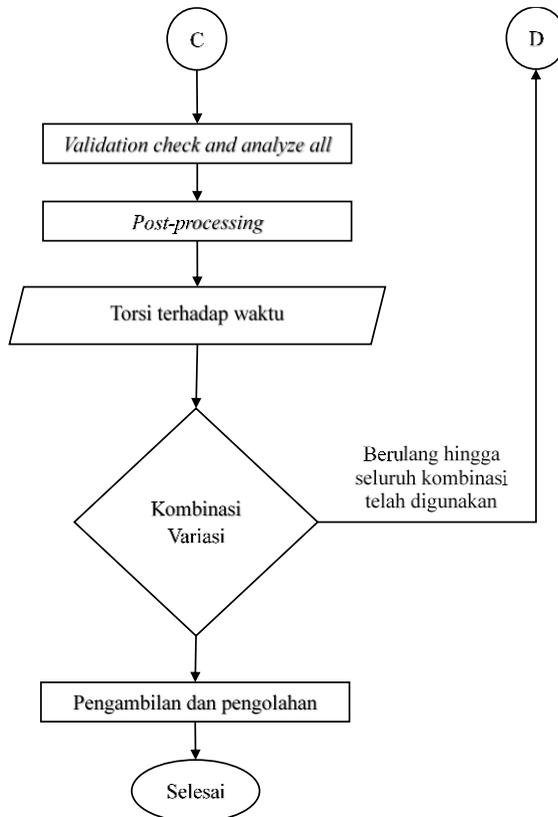
Gambar 3.3 Diagram alir perhitungan rasio gigi

Langkah-langkah yang digunakan dalam perhitungan rasio gigi kendaraan ini adalah sebagai berikut: Menentukan variasi kecepatan kendaraan, menentukan koefisien *drag* yang sesuai, menghitung gaya hambat aerodinamis (2.9), menentukan koefisien *rolling resistance*, menghitung gaya hambat *rolling* kendaraan berdasarkan variasi sudut (2.10), menghitung gaya hambat tanjakan yang terjadi pada kendaraan (2.12), menghitung gaya hambat total yang terjadi pada kendaraan. Langkah tersebut sesuai dengan gambar 3.3.

3.3 Diagram Alir Simulasi FEM *Magnetic Gear*







Gambar 3.4 Diagram alir simulasi FEM

Gambar 3.4 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan simulasi penelitian ini. Simulasi menggunakan *software ANSYS Electronics v19*. Penjelasan tentang tiap tahapan adalah sebagai berikut:

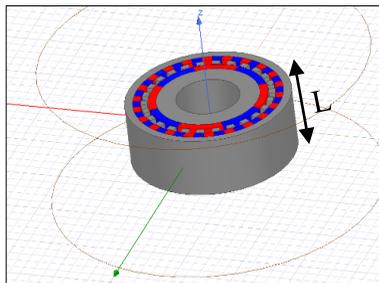
3.3.1 Input Model 3 Dimensi

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

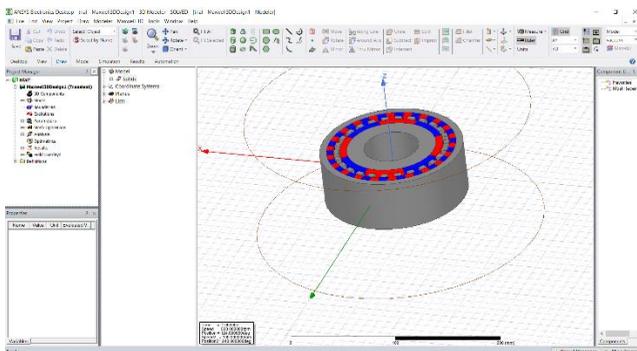
terdapat pada *menu Modeler*. Variasi *coaxial magnetic gear* yang merupakan panjang arah *axial* yang ditunjukkan pada gambar 3.5. Bagian *coaxial magnetic gear* yang harus dimasukkan adalah *inner*, *outer*, *pole piece*, dan magnet permanen seperti gambar 3.6. Penyusunan model dilakukan dengan variasi dimensi arah *axial* terlihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi dimensi arah *axial*

No	Rasio Gigi	Jumlah Total Magnet	Jumlah Pole Piece	Dimensi arah <i>axial</i> (mm)
1				100
2				150
3				200



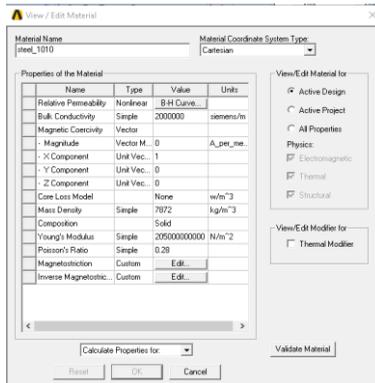
Gambar 3.5 Arah *axial* dari dimensi *coaxial magnetic gear*



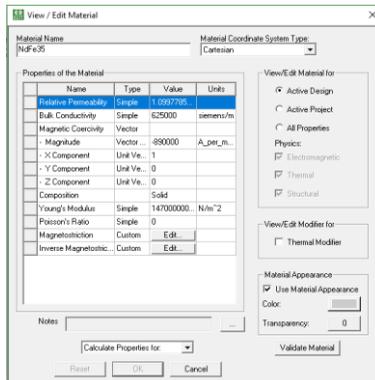
Gambar 3.6 Hasil *input* dan *assembly 3D model*

3.3.2 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 *Inner*, *outer*, dan *pole piece* adalah *steel 1010*, sedangkan magnet permanen menggunakan *NdFeB35*. *Properties* untuk tiap material terdapat pada gambar 3.7.



(a)

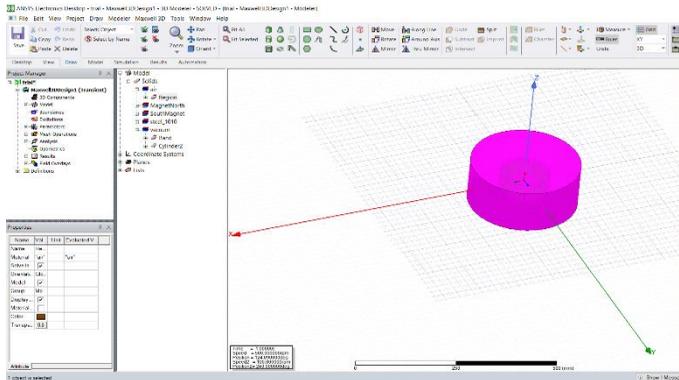


(b)

Gambar 3.7 Material properties (a) *Steel 1010* (b) *NdFeB 35*

3.3.3 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 3.8.



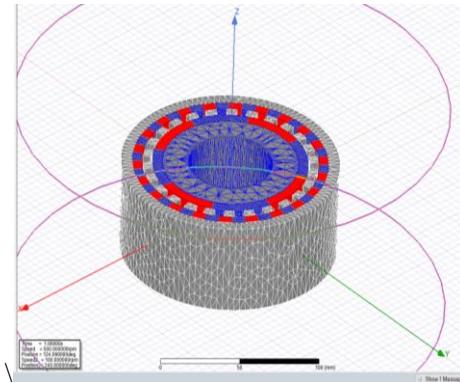
Gambar 3.8 Pembuatan *region*

3.3.4 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*.

3.3.5 Assign Meshing Operation

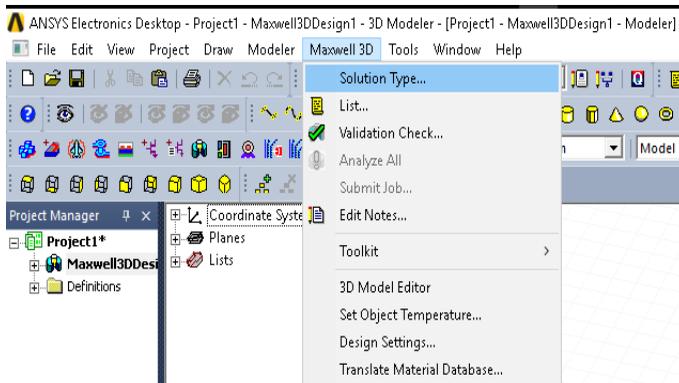
Selanjutnya, pengaturan *mesh* pada setiap model 3 dimensi. Bentuk *meshing* volume yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe *tetrahedra* terlihat pada gambar 3.9. Sedangkan metode *mesh* yang digunakan yaitu *mesh inside selection, length based*.



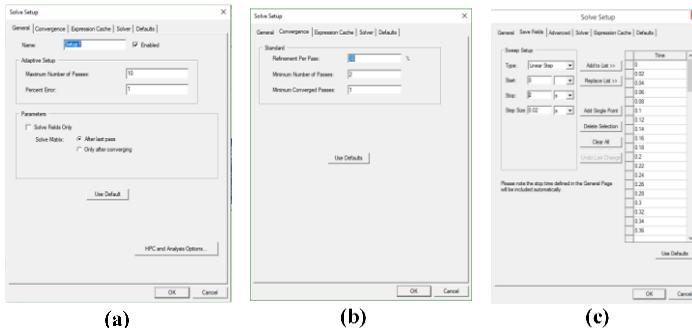
Gambar 3.9 Bentuk *meshing*

3.3.6 *Assign Parameter dan Analysis Setup*

Assign parameter berfungsi untuk menentukan parameter yang nantinya dihasilkan dari simulasi ditunjukkan gambar 3.10. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah torsi. Selanjutnya adalah pengaturan analisis yang dilakukan *software*. Pada penyelesaian *magnetostatic* terlihat pada pengaturan ini bertujuan untuk mencapai hasil analisa yang konvergen pada gambar 3.11 (a) dan (b). 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 1 detik dan pengambilan data setiap 0,01 detik seperti gambar 3.11 (c).



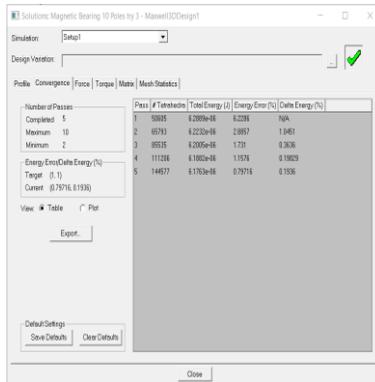
Gambar 3.10 Pemilihan solusi simulasi menu *Maxwell 3D*



Gambar 3.11 Pengaturan analisis *magnetostatic* (a) pengaturan *convergence* (b) dan pengaturan analisis *transient* (c)

3.3.7 Iterate

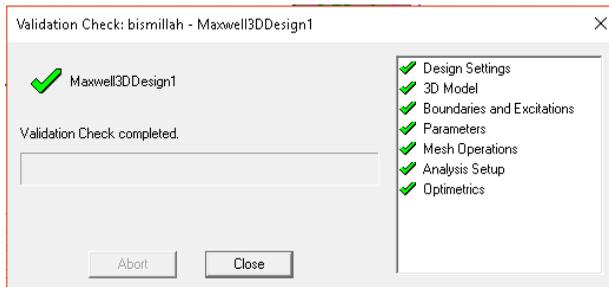
Setelah menentukan *Setup Analysis* langkah berikutnya adalah *iterate*, yang bertujuan untuk mengetahui apakah panjang *mesh* yang ditentukan telah mencapai kriteria konvergen. Jika hasil analisa tidak mencapai kriteria untuk dianggap konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada *meshing* yang telah dibuat ditunjukkan dengan gambar 3.12.



Gambar 3.12 Hasil analisa *mesh*

3.3.8 Validation Check & Analyze All

Sebelum dilakukan analisa, terdapat proses validasi apakah model sudah siap untuk dianalisa. Apabila telah memenuhi seluruh kriteria yang ada, maka simulasi dapat dilanjutkan ke tahap analisa ditunjukkan gambar 3.13. Pada penyelesaian *magnetostatic, software* akan melakukan iterasi seperti yang sudah kita atur sebelumnya hingga hasil analisa yang konvergen tercapai. Jika hasil analisa tidak mencapai konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada *meshing* yang telah dibuat. Pada penyelesaian *transient*, hasil analisa akan diambil dari *timeframe* yang telah ditentukan dengan salah satu *coaxial magnetic gear* diatur berputar pada kecepatan tertentu.



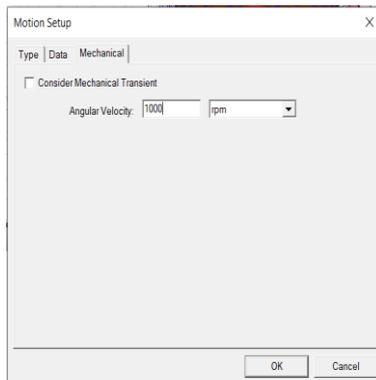
Gambar 3.13 Tahap *validation check*

3.3.9 *Transient Solution Type*

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

3.3.10 *Assign Motion*

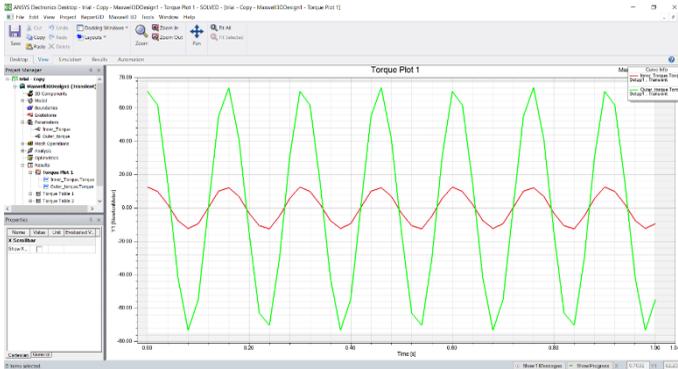
Untuk melanjutkan simulasi dengan penyelesaian *transient*. *Assign motion* berfungsi untuk mengatur pergerakan model. Pada penelitian ini, dibutuhkan gerak rotasi dengan kecepatan sudut 100, 1000, 4000, dan 8000 rpm karena karakteristik dari motor listrik tersebut sesuai dengan gambar 3.14.



Gambar 3.14 *Assign motion*

3.3.11 *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, terdapat dua grafik torsi dimana warna merah mewakili *source magnetic gear* dan warna hijau mewakili *drive magnetic gear*.



Gambar 3.15 Grafik torsi terhadap waktu

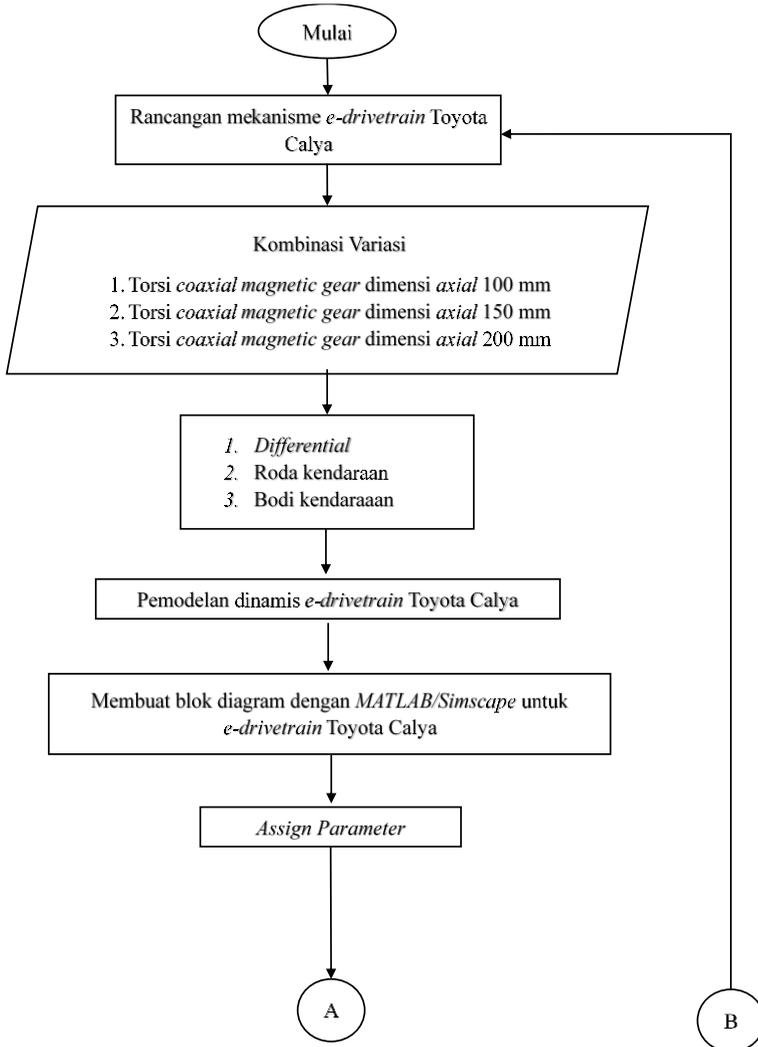
3.3.12 Pengambilan dan Pengolahan Data

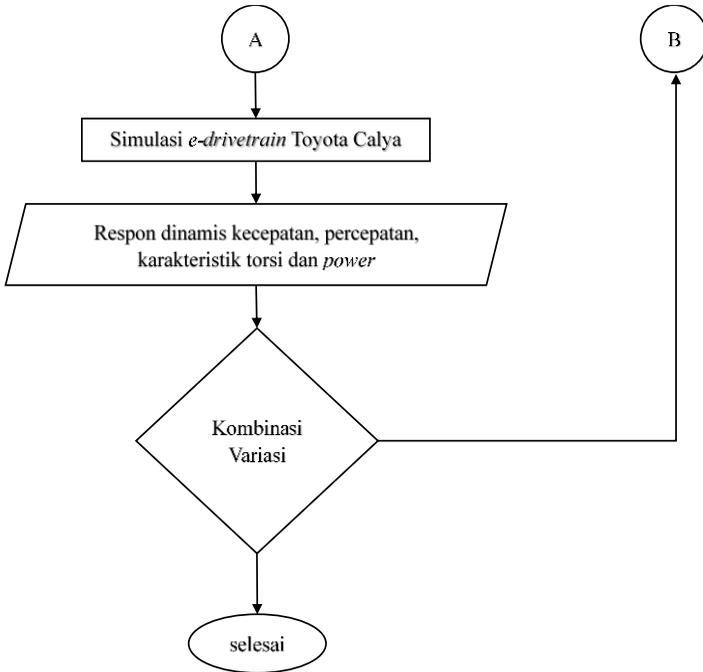
Setelah tahap *post-processing* selesai hasil simulasi dikumpulkan pada tabel 3.2, data dari simulasi kemudian dikumpulkan dari semua variasi dan diolah sebelum dilakukan analisa dan pembahasan.

Tabel 3.2 Perancangan simulasi *coaxial magnetic gear* dengan variasi dimensi arah *axial* (mm) dan kecepatan angular (rpm)

No	Rasio Gigi	Dimensi arah <i>axial</i> (mm)	Kecepatan Angular (rpm)	Torsi yang mampu ditransmisikan (Nm)
1		100	100	
2			1000	
3			4000	
4			8000	
5		150	100	
6			1000	
7			4000	
8			8000	
9		200	100	
10			1000	
11			4000	
12			8000	

3.4 Diagram Alir Simulasi *E-drivetrain Coaxial Magnetic Gear*



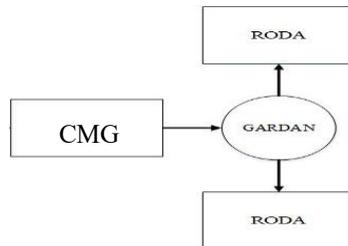


Gambar 3.16 Diagram alir simulasi *e-drivetrain coaxial magnetic gear*

Gambar diagram alir simulasi *e-drivetrain coaxial magnetic gear* yang menunjukkan alur dari penelitian ini terlihat pada gambar 3.16. Simulasi menggunakan *software MATLAB/Simscap*e. Penjelasan tentang tiap tahapan adalah sebagai berikut:

3.4.2 Rancangan *E-drivetrain* Toyota Calya

Penentuan konsep rancangan dilakukan untuk menentukan konfigurasi awal dalam perancangan kendaraan terlihat pada gambar 3.17, dalam penelitian ini melakukan analisa *e-drivetrain* dari hasil torsi *coaxial magnetic gear*.



Gambar 3.17 Rangkaian rancangan simulasi *e-drivetrain* Toyota Calya

3.4.3 *Input FEM* Torsi *Coaxial Magnetic Gear*

Untuk melakukan input torsi dari hasil FEM, hal yang pertama dilakukan adalah membuat *block diagram* untuk hasil torsi *coaxial magnetic gear* pada setiap variasi. Hasil torsi tersebut digunakan sebagai acuan torsi yang dapat ditransmisikan pada kendaraan Toyota Calya.

3.4.4 Blok Diagram *MATLAB/Simscape E-drivetrain* Toyota Calya

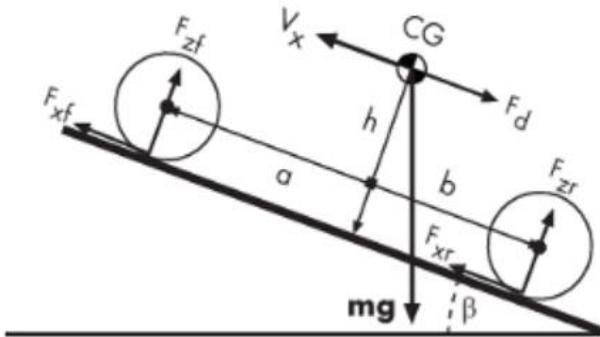
Hasil FEM torsi *coaxial magnetic gear* kemudian diubah ke dalam bentuk *block diagram* digunakan sebagai *input*. Blok diagram terdiri antara lain *differential*, roda kendaraan, dan bodi kendaraan untuk simulasi dengan menggunakan *software MATLAB/Simscape*. Simulasi ini dilakukan untuk mendapatkan penyelesaian dari pemodelan kendaraan listrik Toyota Calya terlihat pada gambar 3.18. Sedangkan output yang dihasilkan merupakan scope dari respon kecepatan, percepatan, karakteristik traksi dan *power*.

3.4.5 Assign Parameter

Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah *differential*, roda kendaraan, dan bodi kendaraan Toyota Calya.

3.4.5.1 Vehicle body

Blok *vehicle body* mewakili *body* kendaraan dua sumbu dalam gerakan longitudinal. Kendaraan dapat memiliki jumlah roda yang sama atau berbeda pada setiap porosnya. Misalnya dua roda di gardan depan dan satu roda di gardan belakang. Ukuran roda kendaraan diasumsikan identik. Kendaraan juga dapat memiliki pusat gravitasi (CG). Blok tersebut terdiri atas masa kendaraan, gaya hambat aerodinamis, kemiringan jalan, dan distribusi bobot antar poros karena akselerasi dan profil jalan. Secara opsional mencakup dinamika *pitch* dan suspensi. Terdapat juga blok untuk menyertakan massa yang ditentukan secara eksternal dan inersia yang ditentukan secara eksternal. Masa, kelembaman, dan pusat gravitasi *body* kendaraan dapat bervariasi selama simulasi sebagai respons terhadap perubahan sistem. Gerak yang terjadi pada kendaraan adalah hasil dari total dari semua gaya dan torsi yang bekerja padanya. Gaya ban longitudinal mendorong kendaraan maju atau mundur. Berat dari kendaraan bekerja melalui pusat gravitasinya (CG). Bergantung pada sudut kemiringan, beban menarik kendaraan ke tanah dan menariknya ke belakang atau ke depan. Sesuai dengan perumusan 3.1 yang merupakan persamaan pokok dari perhitungan ini sedangkan persamaan 3.2 dan 3.3 masing – masing merupakan persamaan gaya hambat yang bekerja serta pada gambar 3.19 merupakan FBD dari kendaraan.



Gambar 3.19 Free body diagram kendaraan

$$m \cdot V_x = F_x - F_d - m \cdot g \cdot \sin\beta \quad (3.1)$$

$$F_x = n (F_{xf} + F_{xr}) \quad (3.2)$$

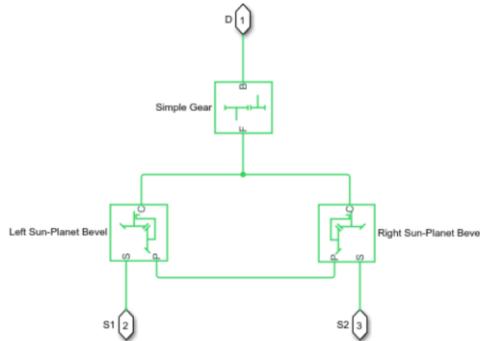
$$F_d = \frac{1}{2} C_D \cdot \rho \cdot A \cdot (V_x + V_w)^2 \cdot \text{sgn}(V_x + V_w) \quad (3.3)$$

dimana:

- g = gaya gravitasi
- β = sudut tanjak
- m = masa kendaraan
- h = tinggi kendaraan dari (CG)
- a, b = posisi (CG)
- V_x = kecepatan kendaraan
- V_w = kecepatan angin
- F_{xf}, F_{xr} = gaya longitudinal
- F_{zf}, F_{zr} = gaya normal kendaraan
- A = luas frontal kendaraan
- Cd = Aerodynamic drag coefficient
- ρ = masa jenis angin
- Fd = Aerodynamic drag force

3.4.5.3 *Differential*

Blok diferensial merupakan mekanisme roda gigi yang memungkinkan poros yang digerakkan berputar pada kecepatan yang berbeda. Diferensial biasa dipasang pada mobil, di mana mereka memungkinkan berbagai roda berputar pada kecepatan berbeda saat menikung.



Gambar 3.20 Skema dari blok diferensial

Diferensial berkerja dengan membebaskan satu titik kinematik pada tiga sumbu yang terhubung yang ditunjukkan pada gambar 3.20. Diferensial ini terdiri atas susunan roda gigi yang berbentuk kerucut (*bevel drive pinion*). Pada umumnya konstruksi dasar dari diferensial adalah dua roda yang masing-masing ujung poros dipasang dengan sebuah roda gigi kerucut. Kedua roda gigi kerucut ini disebut roda gigi samping (*side gear*), yang selanjutnya dihubungkan dengan dua roda gigi kerucut lain yang berukuran lebih kecil yang disebut roda gigi diferensial atau *differential pinion* sehingga keempat roda gigi tersebut saling berkaitan. Batasan diferensial efektif terdiri dari dua sub-batasan roda gigi *bevel* dan planet gear matahari, kendala pertama disebabkan oleh dari kopling dari dua roda gigi bevel terlihat pada persamaan 3.4.

$$\frac{\omega_{s1} - \omega_c}{\omega_{s2} - \omega_c} = \frac{g_{sp2}}{g_{sp1}} \quad (3.4)$$

Kendala kedua adalah karena kopling pembawa ke poros penggerak yang ditunjukkan pada persamaan 3.5.

$$\omega_D = g_D \cdot \omega_c \quad (3.5)$$

dimana:

- ω_{S1} = kecepatan poros *driven sun gear 1*
- ω_{S2} = kecepatan poros *driven sun gear 2*
- g_D = *gear ratio for the longitudinal driving shaft*
- g_{SP1} and g_{SP2} = *gear ratio for the sun-planets*

3.4.5.4 Roda Kendaraan

Blok roda kendaraan memodelkan ban dengan persamaan empiris berdasarkan empat koefisien terlihat pada gambar 3.21, blok dapat memodelkan dinamika ban dalam kondisi kekerasan konstan atau variabel. Arah longitudinal ban sama dengan arah gerakannya saat melaju di atas perkerasan jalan. Blok ini adalah komponen struktural berdasarkan blok interaksi jalan dengan ban. Untuk meningkatkan ketepatan model ban, Anda dapat menentukan properti seperti kelembaman, dan tahanan gelinding.

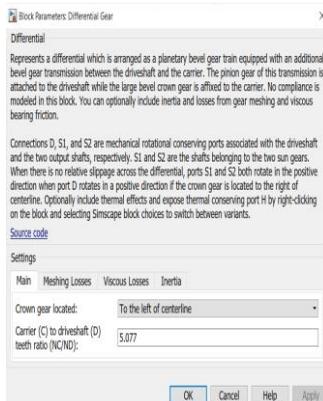


Gambar 3.21 Gaya – gaya yang bekerja pada roda kendaraan

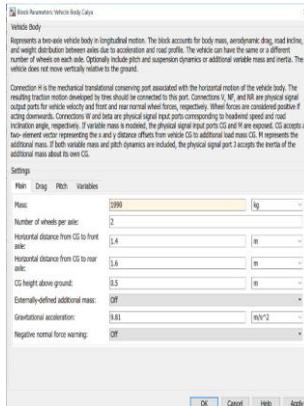
Hal ini mensimulasikan perilaku *transient* dan *steady-state* dari roda kendaraan. *translational spring* dan *translational damper* sama dengan kekakuan ban CF_x dan redaman bF_x . Blok ini memodelkan gaya longitudinal F_x pada ban sebagai fungsi F_z dengan k sebagai variabel *slip* independen. Jari-jari roda dan poros roda adalah jari-jari roda (r_w). Nilai Massa adalah massa efektif, $\frac{I_w}{r_w}$. Fungsi karakteristik ban $f(k, F_z)$ menentukan gaya longitudinal F_x . Bersama dengan torsi poros penggerak yang diterapkan pada poros, F_x menentukan gerakan sudut roda dan gerakan longitudinalnya.

3.4.5.5 Parameter Blok *Simscape*

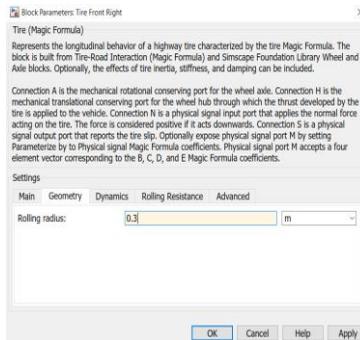
Parameter blok *simscape* berfungsi untuk menentukan parameter yang nantinya dihasilkan dari simulasi untuk parameter telah tertera pada gambar 3.22 dan tabel 3.3.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3.22 Parameter *differential* (a), parameter bodi kendaraan (b) dan parameter roda kendaraan (c) Toyota Calya

Tabel 3.3 Parameter *e-drivetrain* Toyota Calya

Massa mobil <i>full</i> penumpang	1990 kg
Rasio <i>differential</i>	5.077
<i>Road incline</i>	30
<i>Drag coefficient</i>	0.4
<i>Frontal area</i>	1.79 m ²
<i>Radius wheels</i>	0.3 m
<i>Wind speed</i>	10 m/s

3.4.6 Pengambilan dan Pengolahan Data

Grafik hasil simulasi yang didapatkan kemudian dilakukan analisa data dan pembahasan sesuai dengan dasar teori yang ada sebelumnya. Sehingga dapat diketahui karakteristik respon dinamis berupa respon kecepatan, percepatan, traksi, dan *power* kendaraan listrik. Hasil grafik tersebut dapat digunakan sebagai acuan penelitian serupa.

BAB IV

DATA ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab data analisis dan pembahasan akan dijelaskan mengenai spesifikasi mobil Toyota Calya yang telah ada, lalu mobil listrik tersebut diintegrasikan dengan motor listrik BLDC 35 kW. Analisa dimulai dengan menentukan besar rasio gigi dari kendaraan dengan memperhatikan aspek gaya hambat angin, gaya hambat rolling, dan gaya hambat tanjak. Hasil perhitungan rasio gigi digunakan sebagai desain *coaxial magnetic gear*, kemudian dilakukan simulasi menggunakan metode elemen hingga untuk mendapatkan nilai torsi *coaxial magnetic gear*, terdapat tiga jenis variasi panjang arah *axial* sebesar 100 mm, 150 mm, dan 200 mm serta variasi kecepatan. Hasil torsi *coaxial magnetic gear* digunakan sebagai *input* simulasi dinamis yang menghasilkan respon kecepatan, percepatan, traksi dan *power*.

Simulasi untuk mencari torsi *coaxial magnetic gear* dilakukan menggunakan metode penyelesaian *transient* pada *software Ansys Electronics Maxwell 3D 19R1*. Melalui proses simulasi *transient* didapatkan data nilai torsi pada setiap variasi. Hasil dari simulasi digunakan untuk menganalisis pengaruh penambahan panjang kearah *axial* dari *coaxial magnetic gear* dengan membandingkan hasil dari setiap variasi, sehingga didapatkan hasil yang paling optimal. Sedangkan, simulasi dinamis dilakukan menggunakan *software MATLAB/Simscape* dengan menggunakan metode penyelesaian *ode(23t)*. Melalui simulasi tersebut dapat menggambarkan karakteristik dinamis kendaraan sesuai dengan keadaan nyata dengan memasukkan parameter – parameter yang tersedia. Hasil simulasi digunakan untuk mengetahui karakteristik kendaraan jika diaplikasikan *coaxial magnetic gear*, yang diharapkan hasilnya mirip dengan Toyota Calya.

1.1 Mobil Toyota Calya

Data awal mobil Toyota adalah sebuah mobil jenis MPV yang dirancang oleh Daihatsu dan diproduksi bersama oleh Astra Daihatsu Motor dan Toyota-Astra Motor di Indonesia sejak tahun 2016. Kerja sama ITS dengan Toyota dengan tujuan mengonversi dari mobil ICE (*Internal Combustion Engine*) menjadi mobil listrik seperti ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Spesifikasi mobil Toyota Calya

<i>Type</i>	<i>Low Multi-Purpose Vehicle</i>
<i>Capacity</i>	<i>7 Passangrs</i>
<i>Chassis</i>	<i>Monocoque</i>
<i>Configuration Drive Train</i>	<i>Front Wheel Drive</i>
<i>Engine</i>	<i>Engine 3NR 1197cc</i>
<i>Power</i>	86.7 hp
<i>Torque</i>	107.87 N.m
<i>Dimension (P x L x T)</i>	4070 mm x 1655 mm x 1600 mm
<i>Wheelbase</i>	2525 mm
<i>Ground clearance</i>	180 mm
<i>Weight</i>	975 kg
<i>Wheel</i>	<i>Radial (P 175/65 R17)</i>
<i>Drag coefficient Cd estimated by a-c</i>	0.4
<i>Frontal Area Climed</i>	1.79
<i>Final Gear ratio</i>	5.077

4.2 Motor Listrik BLDC Yasa P400

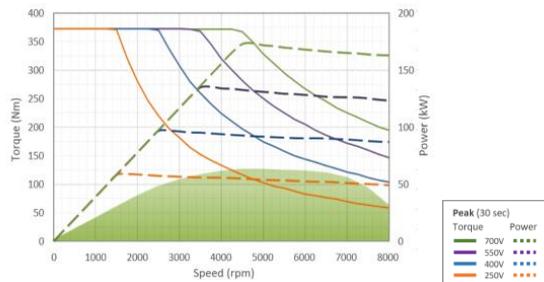
Motor arus searah adalah sebuah motor yang membutuhkan tegangan searah untuk menjalankannya yang terlihat pada gambar 4.1. Pada era sekarang ini motor DC dikembangkan tanpa menggunakan sikat yang dikenal dengan Motor BLDC (*Brushless Direct Current Motor*). Dibandingkan dengan motor DC, BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang lebih tinggi akibat tidak digunakannya *brush*. Adapun spesifikasi motor listrik YASA 400 ditunjukkan pada tabel 4.2 dan memiliki performa torsi dengan kecepatan seperti gambar 4.2.



Gambar 4.1 BLDC motor Yasa P400

Tabel 4.2 Spesifikasi BLDC motor Yasa P400

Characteristic Yasa P400	Performance
Peak Torque	370 Nm
Peak Power	160 kW
Speed	0-8000 rpm
Peak Efficiency	96 %
Dry Mass	24 Kg
Voltage for 35 kW	250 V



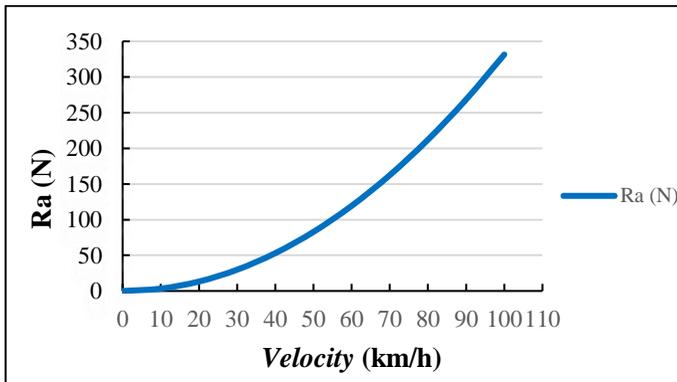
Gambar 4.2 Grafik torsi terhadap kecepatan BLDC motor Yasa P400

4.3 Penentuan Rasio Gigi

Dalam menentukan rasio gigi yang diperlukan oleh kendaraan, terlebih dahulu dianalisa besar dari gaya hambat yang terjadi pada kendaraan. Gaya hambat yang dimaksud meliputi gaya hambat angin, gaya hambat *rolling*, serta gaya hambat tanjakan. Sehingga setelah mengetahui gaya hambat yang terjadi maka dapat

ditentukan rasio gigi yang dibutuhkan oleh kendaraan berdasarkan sumber tenaga yang digunakan. Berikut merupakan parameter yang digunakan dalam melakukan perhitungan gaya hambat kendaraan, dimana: massa penumpang rata – rata 70 kg maka massa total kendaraan serta ditambah massa baterai berat kendaraan yang dijadikan parameter pada penelitian ini adalah mobil listrik Ezzy II ITS dengan berat kosong kendaraan 1500 kg, maka massa total kendaraan adalah 1990 kg. kendaraan berkerja pada kecepatan maksimum 100 km/h, dan sudut tanjakaan yang mampu dilalui kendaraan 30 derajat.

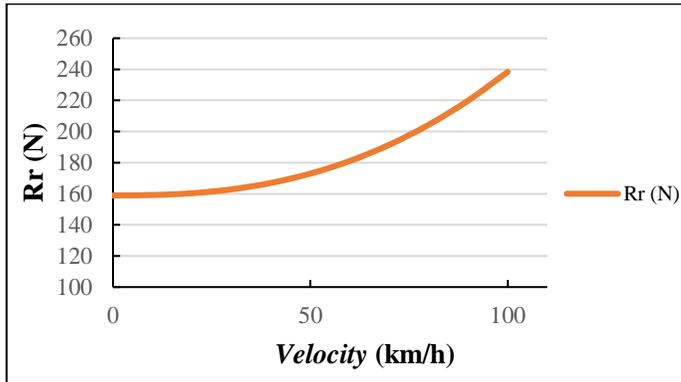
4.3.1 Perhitungan Gaya Hambat Udara



Gambar 4.3 Grafik gaya hambat angin

Berdasarkan grafik pada gambar 4.3 dapat diketahui besar dari gaya hambat yang terjadi pada kendaraan. Dari spesifikasi kendaraan yang telah disebutkan sebelumnya dan dengan ρ (massa jenis udara) 1,2 kg/m³, c_d (koefisien drag kendaraan) 0,4, A_f (luas frontal kendaraan) 1,79 m², serta v (kecepatan) dari 0-100 km/h dapat dihasilkan gaya hambat angin yang semakin besar apabila kecepatan kendaraan diperbesar. Gaya hambat angin paling kecil terjadi pada kecepatan 0 km/h yaitu 0 N, sedangkan untuk kecepatan 100 km/h adalah sebesar 331,36 N.

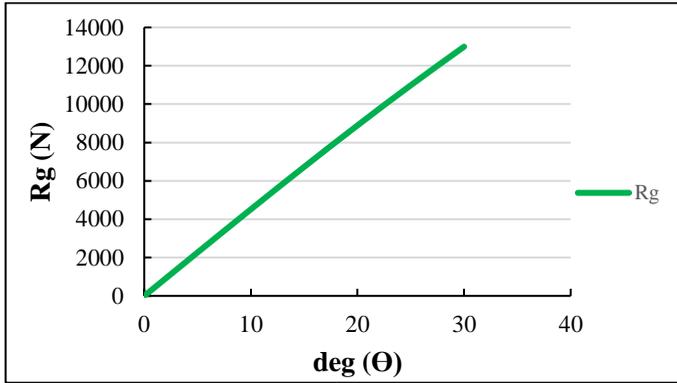
4.3.2 Perhitungan Gaya Hambat *Rolling*



Gambar 4.4 Grafik gaya hambat *rolling*

Grafik pada gambar 4.4 menunjukkan hasil perhitungan dari gaya hambat *rolling*. Langkah awal yang perlu dilakukan dalam menghitung gaya hambat *rolling* adalah menentukan besar koefisien *rolling*, apabila tekanan ban yang digunakan adalah 29 psi. Penulis telah menghitung besar dari koefisien dan didapatkan koefisien *rolling* akan semakin besar apabila kecepatan kendaraan diperbesar. Untuk kecepatan 0 km/h koefisien *rolling* yang timbul adalah 0,01 sedangkan yang terbesar adalah 0,0317 pada kecepatan 100 km/h. Maka selanjutnya penulis dapat mengetahui besar gaya hambat *rolling* yang terjadi pada kendaraan berdasar variasi kecepatan, didapatkan hasil hambatan *rolling* sesuai gambar diatas yaitu 160,22 N pada kecepatan 0 km/h dan yang paling besar adalah 239,46 N pada kecepatan 100 km/h.

4.3.4 Perhitungan Gaya Hambat Tanjak



Gambar 4.5 Grafik gaya hambat tanjakan

Gaya hambat tanjakan merupakan gaya hambat yang terjadi karena kendaraan melewati medan jalan yang memiliki sudut tanjakan tertentu, sehingga berat dari kendaraan akan bertambah karena adanya pengaruh dari gravitasi bumi. Gambar 4.5 menunjukkan besar gaya hambat akan semakin besar dengan besar sudut tanjakan yang dilalui kendaraan, penulis memvariasikan sudut tanjakan dari 0 derajat- 30 derajat dan yang terbesar adalah 13050 N pada sudut 30 derajat, untuk 0 derajat besar gaya hambat tanjakan adalah 0 N karena kendaraan tidak mengalami penambahan berat akibat sudut tanjakan.

4.3.5 Perhitungan Rasio Gigi

Setelah melakukan perhitungan gaya hambat kendaraan pada setiap perhitungan maka dapat dilanjutkan dalam perhitungan sistem transmisi. Dalam sistem transmisi menentukan besar dari rasio gigi 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. Dibutuhkan kriteria 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. Menggunakan persamaan 2.13 dengan 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.

$$I = \frac{F_t \times r}{T_m \times i_d \times \eta_t} = \frac{(W \sin \theta_{max} + f_r \cdot W \cos \theta + R_a)r}{T_m \times i_d \times \eta_t} \quad (4.1)$$

$$I = \frac{(13050,54 + 239,46 + 331,36) \times 0,3}{370 \times 5,077 \times 0,85} = 3,41 \approx 3,5 \quad (4.2)$$

setelah dilakukan perhitungan yang ditunjukkan persamaan 4.1 dihasilkan rasio transmisi sebesar 3,414 dapat dibulatkan 3,5 seperti persamaan 4.2

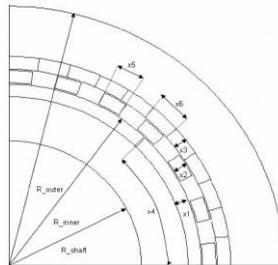
4.4 *Drawing dan Design Coaxial Magnetic Gear*

Dalam perhitungan rasio transmisi sebesar 3.5 sebagai acuan dalam desain *coaxial magnetic gear*. Dalam proses desain ini hal – hal yang diperlu diperhatikan ialah perhitungan jumlah pasangan magnet *inner* dan pasangan magnet *outer* yang sesuai dengan perhitungan rasio transmisi. Dimana rasio gigi merupakan perbandingan jumlah *steel pole pieces* dibandingkan dengan jumlah pasangan magnet *inner* yang ditunjukkan pada persamaan 2.5, sedangkan jumlah *pole pieces* merupakan jumlah total pasangan magnet *inner* dan *outer* sesuai dengan persamaan 2.6. Variasi dimensi *coaxial magnetic gear* yang merupakan pajang arah *axial* ditunjukkan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Variasi dimensi arah *axial* dari *coaxial magnetic gear*

No	Rasio gigi	Jumlah pasangan magnet <i>inner</i>	Jumlah pasangan magnet <i>outer</i>	Jumlah <i>pole piece</i>	Dimensi arah <i>axial</i> (mm)
1	3.5	4	10	14	100
2					150
3					200

Data awal yang digunakan berasal dari spesifikasi *coaxial magnetic gear* dari *paper* Rotonlande. Terlihat seperti pada gambar 4.6 dan tabel 4.4, dengan kriteria parameter dimensi dan torsi yang mampu ditransmisikan. Spesifikasi tersebut yang menjadi dasar perancangan *coaxial magnetic gear*. Dengan pertimbangan dimensi untuk *coaxial magnetic gear* berdasarkan ukuran transmisi mobil Toyota Calya yang terdapat pada lampiran.



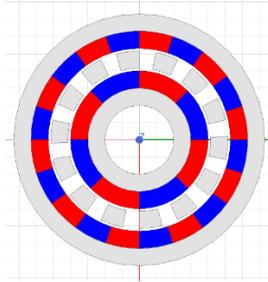
Gambar 4.6 Dimensi *coaxial magnetic gear*

Tabel 4.4 Spesifikasi *coaxial magnetic gear*

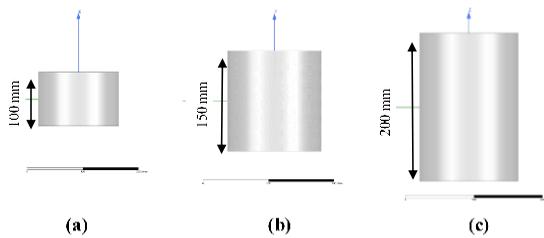
Shaft radius (R_{shaft})	mm	10
R_{inner}	mm	26
R_{outer}	mm	59
PM thickness inner rotor (x1)	mm	10
Pole pieces thickness (x2)	mm	10
PM thickness outer rotor (x3)	mm	10
PM widthness inner rotor (x4)	mm	8
Pole pieces widthness (x5)	mm	20
PM widthness outer rotor (x6)	mm	25
Airgap length	mm	1
Electrical steel		800-50 A
Permanent magnet – NdFeB		$B_r = 1.16T, H_c = 900 \text{ kA/m}$ at 20°C

Geometri *coaxial magnetic gear* dimodelkan dalam ANSYS Maxwell 19.0 yang tersusun *inner steel*, 4 pasang *inner magnet*, 14 *pole pieces*, 10 pasang *outer magnet* dan *outer steel* yang terlihat pada gambar 4.7, sedangkan untuk variasi panjang *axial* dari desain

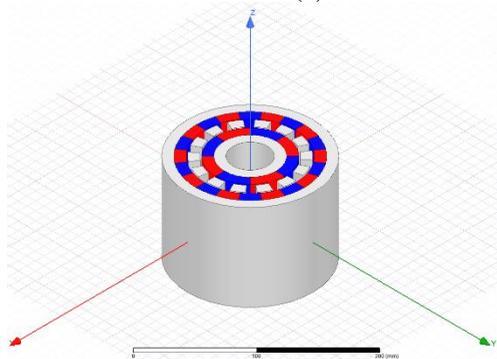
coaxial magnetic gear ditunjukkan pada gambar 4.8 dan gambar 4.9 merupakan pandangan isometris dari *coaxial magnetic gear*.



Gambar 4.7 Tampak atas susunan *coaxial magnetic gear*



Gambar 4.8 Tampak samping *coaxial magnetic gear* yang mempunyai variasi panjang arah *axial* 100 mm (a), 150 mm (b), 200 mm (c)



Gambar 4.9 Pandangan isometris dari *coaxial magnetic gear*

4.5 Parameter Desain Validasi Simulasi

Berdasarkan penelitian yang dilakukan A. Rottolande, dkk melakukan pengujian *coaxial magnetic gear* yang diaplikasikan pada kendaraan listrik ditahun 2014. Penelitian tersebut dilakukan dengan simulasi. Simulasi dilakukan menggunakan *software Ansys Maxwell 2D* guna mengetahui hasil torsi yang dihasilkan. Simulasi dilakukan dengan parameter dimensi desain yang ditunjukkan pada tabel 4.5. Dilakukan dengan metode karakteristik elektromagnetik dari *magnetic gear* akan dianalisis dengan menggunakan metode Elemen Hingga (FEM) yang memberikan hasil yang akurat dengan mempertimbangkan detail geometris dan non-linearitas bahan magnetik. Percobaan variasi rasio gigi 1.25 ($P_i=4, P_o=5, n_b=9$) dan 4.3 ($P_i=3, P_o=13, n_b=16$).

Tabel 4.5 Parameter dimensi desain penelitian A. Rottolande

Outer radius (R _{outer})	mm	190
Shaft radius (R _{shaft})	mm	100
Axial length	mm	100
PM thickness inner rot. (x1)	mm	10
Pole pieces thickness (x2)	mm	10
PM thickness outer rot. (x3)	mm	10
Airgap length	mm	1
Electrical steel		800-50A
PM-NdFeB		$B_r = 1.16 \text{ T}, H_c = 900 \text{ kA/m}$ at 20°C
Operating temperature	°C	70

Tabel 4.6 Hasil validasi

Simulasi	Torsi rata-rata (Nm)	
	Rasio Gigi	
	1.25	4.3
A. Rottolande	292.74	684.93
Simulasi	299.22	687.58
Error (%)	2.21	3.86

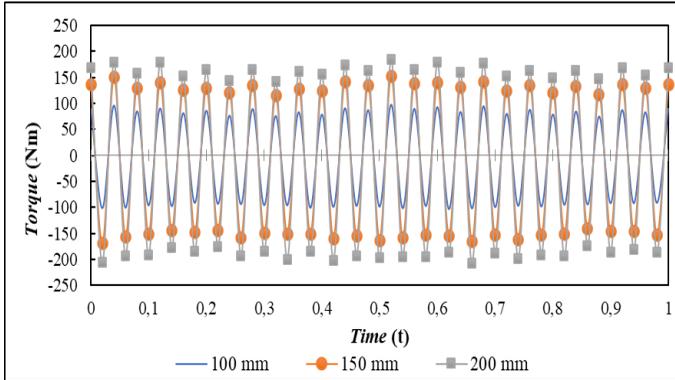
Setelah menyesuaikan desain simulasi dengan parameter dimensi *coaxial magnetic gear* dari penelitian A. Rottolande didapatkan hasil torsi 292,74 Nm pada rasio gigi 1,25 serta 684,93 Nm dengan 4.3 untuk besar rasio gigi. Berdasarkan dari perbandingan yang dilakukan antara nilai torsi rata - rata simulasi yang dilakukan A. Rottolande (2014), didapatkan presentase eror sebesar 2,21 % dan 3.86 %. Dari kedua nilai tersebut memenuhi syarat maksimum presentasi eror yaitu 5%. Dengan demikian proses validasi simulasi dapat dikatakan *valid* untuk selanjutnya dapat digunakan pada proses simulasi penelitian ini.

4.6 Analisis Torsi *Coaxial Magnetic Gear* Hasil Simulasi *Transient*

Simulasi *transient* dilakukan dengan beberapa macam konfigurasi *coaxial magnetic gear* yang menggunakan tiga macam variasi panjang *axial*, yaitu 100 mm, 150 mm dan 200mm, masing – masing variasi kecepatan angular sebesar 100 rpm, 1000 rpm, 4000 rpm, dan 8000 rpm. Setiap konfigurasi variasi tersebut menggunakan dimensi yang konstan. Dari proses simulasi ini, diketahui nilai torsi rata rata yang dapat ditransmisikan dari setiap konfigurasi *coaxial magnetic gear*.

Hasil simulasi yang diperoleh tersebut kemudian dibandingkan antara satu dengan yang lain sehingga dapat diketahui pengaruh dari setiap variasi yang dilakukan. Hasil simulasi dinyatakan berhasil apabila telah sesuai dengan parameter desain yang telah ditentukan.

4.6.1 Analisis Pengaruh Variasi Panjang *Coaxial Magnetic Gear* terhadap Torsi pada Kecepatan Angular 100 rpm

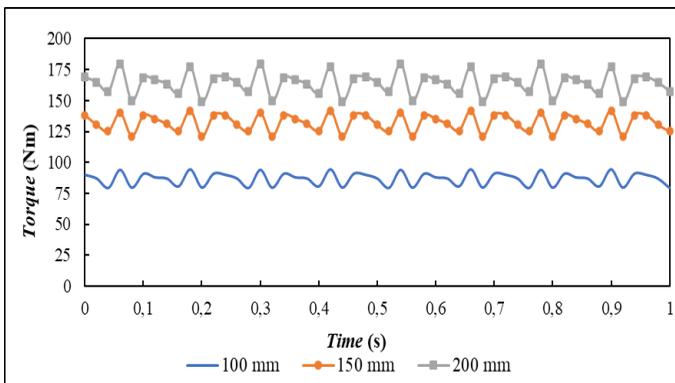


Gambar 4.10 Grafik torsi pada kecepatan angular 100 rpm

Pada gambar 4.10 terdapat tiga grafik dimana masing – masing menunjukkan nilai torsi *coaxial magnetic gear*, variasi panjang *axial* sebesar 100 mm, 150 mm, 200 mm. *Inner rotor* diputar pada kecepatan angular 100 yang memiliki jumlah pasangan magnet dan jumlah *pole piece* yang sama. Sehingga menyebabkan *steel pole piece* dapat berputar sesuai dengan reduksi *coaxial magnetic gear*. Dari hasil simulasi yang tertera pada lampiran di lakukan plotting agar dapat dibanding disetiap variasinya serta dilakukan analisis. Pada variasi 100 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 93,275 Nm dan *peak* 103,87 Nm, kemudian untuk variasi 150 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 144,914 Nm serta *peak* sebesar 168,37 Nm, dan 200 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 179,307 Nm dan *peak* torsi 207,58 Nm. Maka, dapat disimpulkan jika semakin panjang dimensi arah *axial* dari *coaxial magnetic gear* maka semakin besar hasil torsi yang dihasilkan. Dari ketiga *trendline* grafik tersebut memiliki karakteristik dan pola yang sama dengan adanya pengaruh *ripple torque*. *Ripple torque* merupakan peningkatan atau penurunan torsi *output* secara berkala ketika poros motor berputar serta menimbulkan kerugian.

Pada grafik tersebut dapat dilihat semua variasi mengalami fenomena *ripple torque* pada kecepatan angular 100 rpm, hasil *ripple torque* pada panjang 100 mm hampir tak terhingga karena rata rata torsi yang dihasilkan sebesar 0,01 Nm. Maka disimpulkan bahwa *coaxial magnetic gear* bila beroperasi pada kecepatan angular 100 rpm mengalami *ripple torque* yang relatif besar karena terdapat respon waktu terhadap input torsi dari motor listik yang ditransmisikan lewat *coaxial magnetic gear*. Karakteristik *coaxial magnetic gear* saat berputar memiliki momen inersia, maka untuk memutar *pole pieces* diputaran rendah belum dapat optimal, karena interaksi gaya tarik menarik dan tolak menolak magnet dipelurkan untuk memutar momen inersia dari *coaxial magnetic gear*. Fenomena tersebut dikarenakan sifat interaksi antara medan magnet rotor dan stator, bervariasi secara sinusoidal.

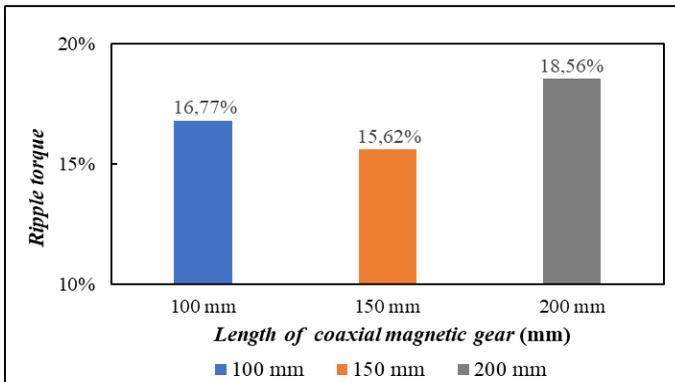
4.6.2 Analisis Pengaruh Variasi Panjang *Coaxial Magnetic Gear* terhadap Torsi pada Kecepatan Angular 1000 rpm



Gambar 4.11 Grafik torsi pada kecepatan angular 1000 rpm

Pada gambar 4.11 terdapat tiga grafik dimana masing – masing menunjukkan nilai torsi *coaxial magnetic gear* dengan variasi panjang *axial* sebesar 100 mm, 150 mm, 200 mm yang diputar pada kecepatan angular 1000 rpm dan memiliki jumlah

pasangan magnet dan *pole piece* yang sama. Dari hasil simulasi yang tertera pada lampiran di lakukan *ploting* agar dapat dibanding disetiap variasinya serta dilakukan analisis. Pada variasi 100 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 87,76 Nm dan *peak* sebesar 94,36 Nm kemudian untuk variasi 150 mm memiliki hasil torsi rms 133,57 Nm dan *peak* sebesar 142,02 Nm sedangkan 200 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 166,01 dengan *peak* 179,91 Nm. Maka, dapat disimpulkan jika semakin panjang dimensi arah *axial* dari *coaxial magnetic gear* maka semakin besar hasil torsi yang dihasilkan. Dari ketiga *trendline* grafik tersebut memiliki karakteristik dan pola yang sama dengan adanya pengaruh *ripple torque*.



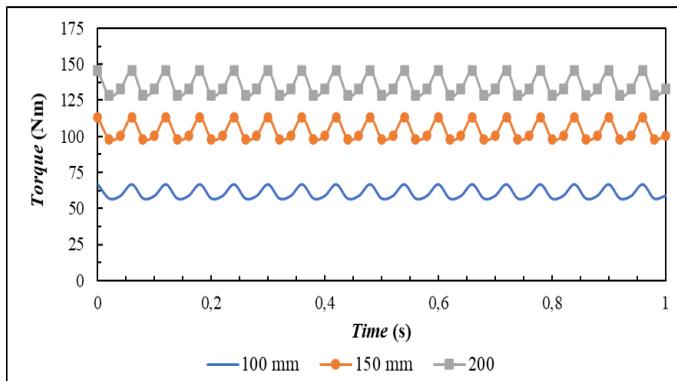
Gambar 4.12 Grafik *ripple torque* pada kecepatan angular 1000 rpm

Berdasarkan gambar 4.12 grafik tersebut dapat dilihat semua variasi mengalami fenomena *ripple torque* pada kecepatan angular 1000 rpm. Hasil *ripple torque* pada panjang 100 mm sebesar 16,77% untuk variasi panjang 150 mm sebesar 15,62% dan pada panjang 200 mm menghasilkan sebesar 18,56%. *Ripple torque* terbesar terjadi pada variasi 200 mm.

Berdasarkan gambar 4.11 dan gambar 4.12 dapat disimpulkan bahwa *coaxial magnetic gear* bila beroperasi pada

kecepatan angular 1000 rpm mengalami penurunan *ripple torque* karena respon waktu terhadap input torsi dari motor listik yang ditransmisikan lewat *coaxial magnetic gear* dapat dikatakan sudah stabil. Namun, untuk hasil grafik torsi yang dihasilkan pada kecepatan 1000 rpm merupakan fase transisi dari putaran rendah ke putaran menengah yang memiliki pengaruh *ripple torque* yang masih tinggi. Sehingga *coaxial magnetic gear* memiliki grafik yang amplitudonya pada setiap bukit dan lembah besar simpangannya tidak sama besarnya.

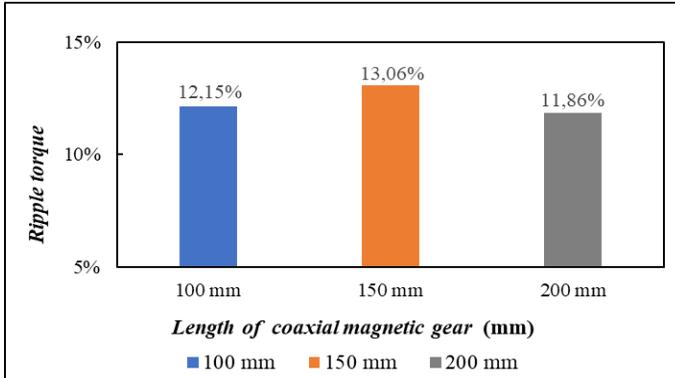
4.6.3 Analisis Pengaruh Variasi Panjang *Coaxial Magnetic Gear* terhadap Torsi pada Kecepatan Angular 4000 rpm



Gambar 4.13 Grafik torsi pada kecepatan angular 4000 rpm

Pada gambar 4.13 terdapat tiga grafik dimana masing – masing menunjukkan nilai torsi *coaxial magnetic gear* dengan variasi panjang *axial* sebesar 100 mm, 150 mm, 200 mm yang diputar pada kecepatan angular 4000 rpm dan memiliki jumlah pasangan magnet dan *pole piece* yang sama. Dari hasil simulasi yang tertera pada lampiran di lakukan *ploting* agar dapat dibanding disetiap variasinya serta untuk dilakukan analisis. Pada variasi 100 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 61,49 Nm dan *peak* sebesar 66,59 Nm kemudian untuk variasi 150 mm memiliki hasil torsi rms

105,143 Nm dan *peak* sebesar 113,16 Nm sedangkan 200 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 137,16 dengan *peak* 145,78 Nm. Dari ketiga *trendline* grafik tersebut memiliki karakteristik dan pola yang sama dengan adanya pengaruh *ripple torque*.



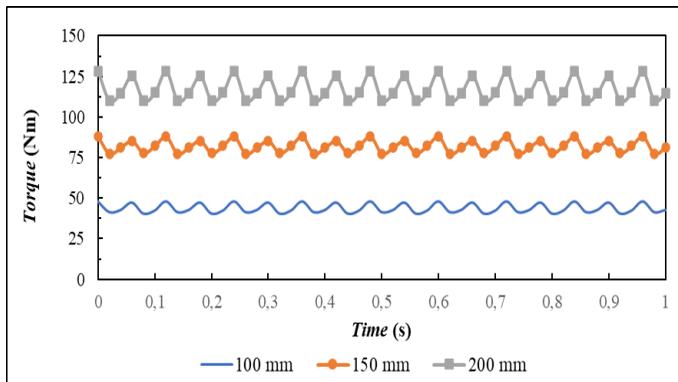
Gambar 4.14 Grafik *ripple torque* pada kecepatan angular 4000 rpm

Berdasarkan gambar 4.14 grafik tersebut dapat dilihat semua variasi mengalami fenomena *ripple torque* pada kecepatan angular 4000 rpm. Hasil *ripple torque* pada panjang 100 mm sebesar 12,15% untuk variasi panjang 150 mm sebesar 13,06% dan pada panjang 200 mm menghasilkan sebesar 11,86%. *Ripple torque* terbesar terjadi pada variasi panjang 150 mm.

Berdasarkan gambar 4.13 dan gambar 4.14 dapat disimpulkan bahwa *coaxial magnetic gear* bila beroperasi pada kecepatan angular 4000 rpm mengalami penurunan *ripple torque* karena respon waktu terhadap input torsi dari motor listrik yang ditransmisikan lewat *coaxial magnetic gear* dapat dikatakan sudah stabil. Namun, untuk hasil grafik torsi yang dihasilkan pada kecepatan 4000 rpm merupakan torsi yang paling stabil dapat dilihat bahwa memiliki amplitudo yang konstan, hal ini terjadi karena input kecepatan dari motor listrik sudah melewati zona

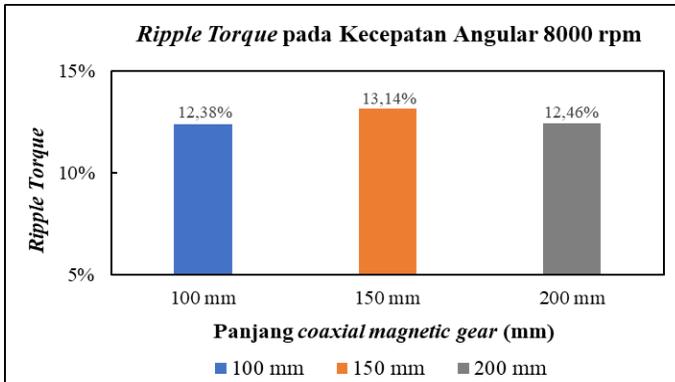
transisi sehingga *coaxial magnetic gear* sudah berada di performa terbaiknya.

4.6.4 Analisis Pengaruh Variasi Panjang *Coaxial Magnetic Gear* terhadap Torsi pada Kecepatan Angular 8000 rpm



Gambar 4.15 Grafik torsi pada kecepatan angular 8000 rpm

Pada gambar 4.15 terdapat tiga grafik dimana masing – masing menunjukkan nilai torsi *coaxial magnetic gear* dengan variasi panjang *axial* sebesar 100 mm, 150 mm, 200 mm yang diputar pada kecepatan angular 8000 rpm merupakan putaran tertinggi dari motor listrik dan memiliki jumlah pasangan magnet dan *pole piece* yang sama. Dari hasil simulasi yang tertera pada lampiran di lakukan *ploting* agar dapat dibandingkan disetiap variasinya serta dilakukan analisis. Pada variasi 100 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 44,18 Nm dan *peak* sebesar 48,10 Nm kemudian untuk variasi 150 mm memiliki hasil torsi rms 83,02 Nm dan *peak* sebesar 88,06 Nm sedangkan 200 mm memiliki hasil torsi rms sebesar 118,60 dengan *peak* 128,14 Nm. Dari ketiga *trendline* grafik tersebut memiliki karakteristik dan pola yang sama dengan adanya pengaruh *ripple torque*.

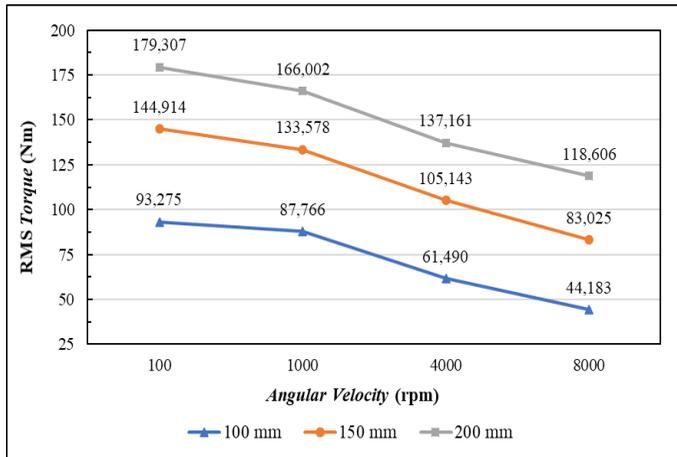


Gambar 4.16 Grafik *ripple torque* pada kecepatan angular 8000 rpm

Berdasarkan gambar 4.16 grafik tersebut dapat dilihat semua variasi mengalami fenomena *ripple torque* pada kecepatan angular 8000 rpm. Hasil *ripple torque* pada panjang 100 mm sebesar 12,38% untuk variasi panjang 150 mm sebesar 13,14% dan pada panjang 200 mm menghasilkan sebesar 12,46%.

Berdasarkan gambar 4.15 dan gambar 4.16 dapat disimpulkan bahwa *coaxial magnetic gear* bila beroperasi pada kecepatan angular 8000 rpm mengalami penurunan *ripple torque* karena respon waktu terhadap input torsi dari motor listik yang ditransmisikan lewat *coaxial magnetic gear* dapat dikatakan sudah stabil karena telah diputar pada kecepatan angular tersebut, namun untuk hasil grafik torsi yang dihasilkan pada kecepatan 8000 rpm merupakan torsi yang paling stabil dapat dilihat bahwa namun memiliki selisih amplitudo yang relatif kecil.

4.6.6 Analisis Hasil Torsi RMS terhadap Kecepatan Angular



Gambar 4.17 Grafik hasil torsi rms terhadap kecepatan angular

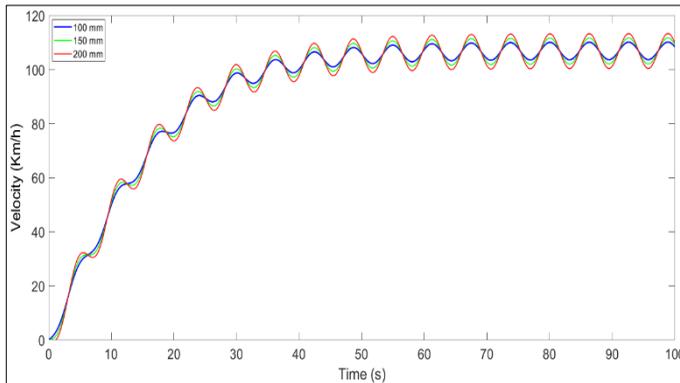
Pada gambar 4.17 menjelaskan tentang grafik hasil torsi rms terhadap kecepatan angular, kecepatan angular akan mempengaruhi hasil torsi. Terlihat pula bahwa seiring dengan naiknya kecepatan input pada *inner rotor* maka torsi maksimal yang dihasilkan semakin berkurang, hal ini dikarenakan kontak langsung berlangsung sangat cepat antara *inner rotor* dengan *steel pole piece* yang mana pergerakan dari *inner rotor* hanya dipengaruhi oleh *flux density* yang memberikan efek *fictive torsion spring*, sehingga apabila kecepatan rotasinya semakin besar, maka torsi yang dapat disalurkan semakin kecil. Dari grafik tersebut juga dapat dilihat semakin panjang arah *axial* dari variasi *coaxial magnetic gear* maka semakin besar torsinya karena semakin luas kontak *area magnet*, tanpa mengubah rasio giginya.

4.8 Analisis Respon Dinamis Kendaraan Ketika Diaplikasikan *Coaxial Magnetic Gear*

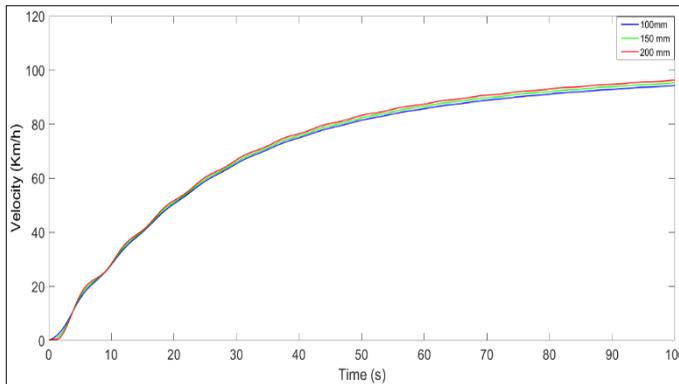
Simulasi respon dinamis dilakukan dengan hasil torsi konfigurasi *CMG* yang menggunakan tiga macam variasi panjang *axial*, yaitu 100 mm, 150 mm dan 200mm, yang mana masing – masing memiliki variasi kecepatan angular sebesar 100 rpm, 1000 rpm, 4000 rpm, dan 8000 rpm. Hasil tersebut dibentuk *signal builder* dijadikan *input* dari simulasi *MATLAB/simscape*.

kemudian dibandingkan antara satu dengan yang lain sehingga dapat diketahui pengaruh dari setiap variasi yang dilakukan. Hasil simulasi dinyatakan berhasil apabila telah sesuai dengan parameter desain yang telah ditentukan.

4.7.1 Analisis Respon Dinamis Kecepatan Kendaraan



Gambar 4.18 Grafik respon dinamis kecepatan kendaraan terhadap waktu



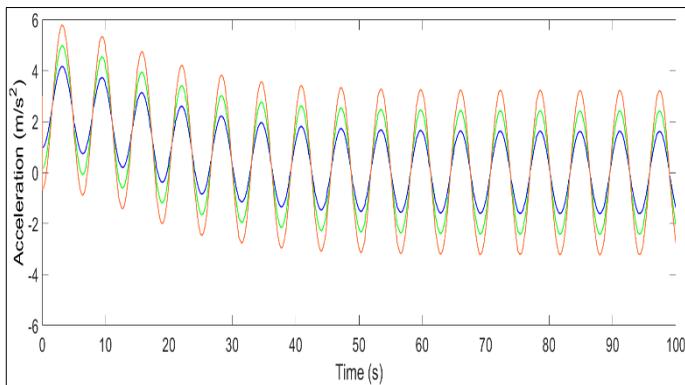
Gambar 4.19 Grafik respon dinamis kecepatan RMS kendaraan terhadap waktu

Gambar 4.18 dan gambar 4.19 adalah grafik kecepatan terhadap waktu yang diputar pada 0 rpm – 8000 rpm yang dihasilkan dari simulasi *e-drivetrain* dengan 3 variasi *coaxial magnetic gear*. Dari ketiga grafik di atas terlihat karakteristik dari putaran 0 rpm mengalami kenaikan secara fluktuatif hingga 8000 rpm kemudian mencapai *trend* fluktuatif yang konstan, hal tersebut diakibatkan karena input dari hasil torsi *coaxial magnetic gear* merupakan grafik sinusoidal. Adapun hasil dari ketiga variasi yakni kecepatan rms untuk variasi panjang 100 mm sebesar 86,83 km/h dan kecepatan *peak* 110,14 km/h lalu pada variasi panjang 150 mm memiliki kecepatan rms dan kecepatan *peak* masing-masing sebesar 86,89 km/h dan 111,74 km/h, sedangkan untuk kecepatan rms dengan variasi panjang 200 mm memiliki kecepatan rms 86,94 km/h serta kecepatan *peak* sebesar 113,32 km/h. Sedangkan gambar 4.19 merupakan hasil grafik respon kecepatan RMS jika dioperasikan pada kecepatan angular 0 rpm hingga 8000 rpm.

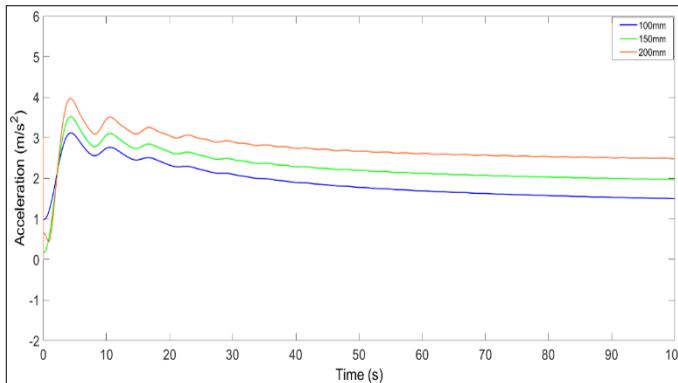
Dari hasil simulasi, didapatkan grafik kecepatan terhadap waktu yang mana pada setiap grafik pada detik 0 sampai dengan 100, kecepatan kendaraan naik kemudian kecepatan bernilai konstan. Terlihat pula semakin besar input torsi yang diberikan maka semakin besar pula simpangan atau amplitudonya, namun

untuk kecepatan maksimum tetap sama karena menggunakan rasio transmisi yang sama. Secara teori pada awal kendaraan melaju dari keadaan, kendaraan mengalami kenaikan kecepatan pada waktu 0 – 60 detik karena terdapat respon waktu terhadap besar torsi yang diberikan kepada roda penggerak melawan hambatan pada *powertrain* dan *body* kendaraan, pada waktu 60-100 kendaraan telah melaju dengan kecepatan konstan. Adanya hambatan pada *powertrain* dan *body* kendaraan dikarenakan adanya parameter - parameter pada simulasi. Serta dari grafik dapat dilihat pada waktu 60-100 dimana gelombang respon telah *steady state* namun memiliki besar amplitudo yang berbeda hal tersebut akan mempengaruhi getaran yang dihasilkan kendaraan, sesuai dengan rumus perbandingan hasil maksimum dikurangi hasil minimum lalu dibagi dengan hasil rms. Untuk hasil yang paling stabil diantara ketiga variasi yakni pada variasi 100 mm.

4.7.2 Analisis Respon Dinamis Percepatan Kendaraan



Gambar 4.20 Grafik respon dinamis percepatan kendaraan terhadap waktu



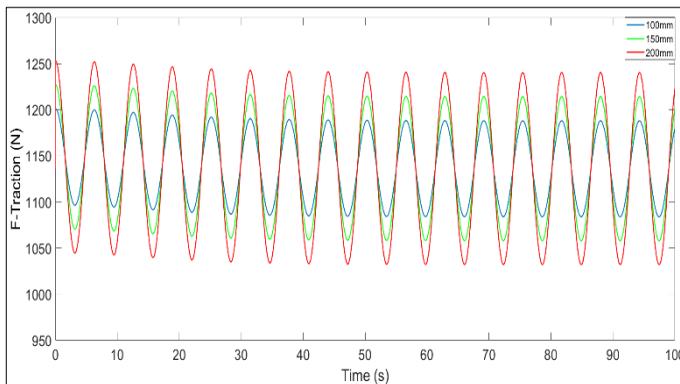
Gambar 4.21 Grafik respon dinamis percepatan RMS kendaraan terhadap waktu

Gambar 4.20 dan gambar 4.21 adalah grafik percepatan terhadap waktu yang diputar pada 0 rpm – 8000 rpm yang dihasilkan dari simulasi *e-drivetrain* dengan 3 variasi *coaxial magnetic gear*. Dari ketiga grafik di atas terlihat karakteristik dari putaran 0 rpm mengalami penurunan secara fluktuatif hingga 8000 rpm kemudian mencapai *trend* fluktuatif yang konstan, hal tersebut diakibatkan karena input dari hasil torsi *coaxial magnetic gear* merupakan grafik sinusoidal. Adapun hasil dari ketiga variasi yakni percepatan rms untuk variasi panjang 100 mm sebesar $1,538 \text{ m/s}^2$ dan percepatan *peak* $4,153 \text{ m/s}^2$ lalu pada variasi panjang 150 mm memiliki percepatan rms dan percepatan *peak* masing-masing sebesar $1,893 \text{ m/s}^2$ dan $4,963 \text{ m/s}^2$, sedangkan untuk percepatan rms dengan variasi panjang 200 mm memiliki percepatan rms dengan variasi panjang 200 mm memiliki percepatan rms $2,3313 \text{ m/s}^2$ serta percepatan *peak* sebesar $5,772 \text{ m/s}^2$. Sedangkan gambar 4.21 merupakan hasil grafik respon percepatan RMS jika dioperasikan pada kecepatan angular 0 rpm hingga 8000 rpm.

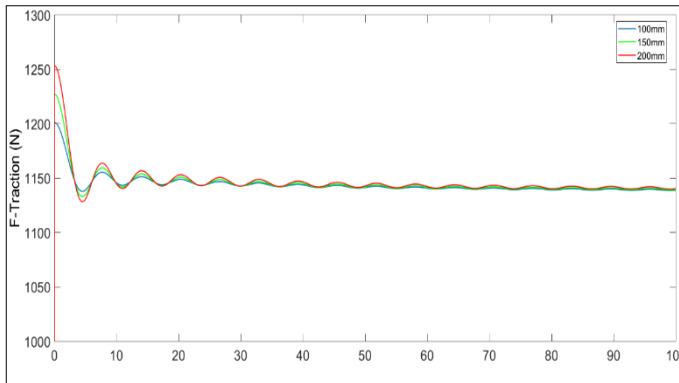
Dari simulasi, didapatkan grafik percepatan pada ketiga variasi panjang coaxial magnetic gear. Terlihat grafik mengalami kenaikan pada waktu 0 – 3 detik lalu mengalami penurunan dari waktu 3 - 60 detik sedangkan untuk 60 – 100 detik percepatan konstan secara fluktuatif. Secara teori, baterai DC akan

memberikan suplai energi yang konstan sehingga putaran motor akan berada pada nilai konstan. Hal tersebut menyebabkan kendaraan melaju dengan pada waktu 60 – 100 detik memiliki kecepatan konstan, sehingga kendaraan tidak memiliki percepatan. Namun ketika kendaraan melaju dari keadaan diam, kendaraan mendapatkan percepatan dari putaran motor. Percepatan tersebut akan semakin menurun dikarenakan mobil sudah melaju secara konstan atau dapat dikatakan kendaraan tidak mengalami kecepatan. Dari hasil grafik yang didapat, ditemukan bahwa grafik sesuai dengan dasaran teori dimana terdapat percepatan ketika kendaraan mulai melaju dari keadaan diam sehingga percepatan tersebut berkurang menuju kecepatan konstan dan menyebabkan tidak adanya percepatan. Serta dari grafik dapat dilihat pada waktu 60-100 dimana gelombang respon telah *steady state* namun memiliki besar amplitudo yang berbeda hal tersebut akan mempengaruhi getaran yang dihasilkan kendaraan.

4.7.3 Analisis Respon Dinamis Traksi Kendaraan



Gambar 4.22 Grafik respon dinamis traksi kendaraan terhadap waktu



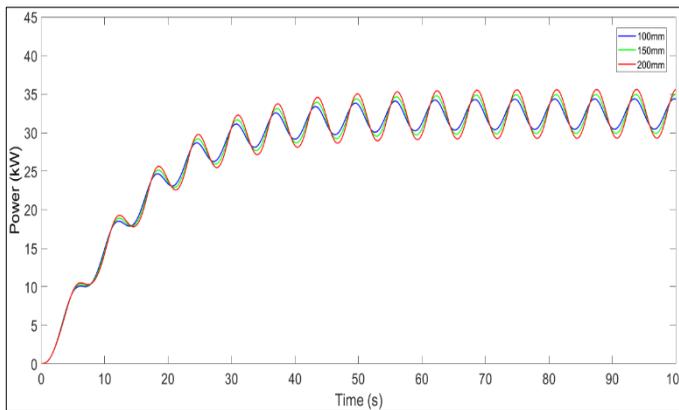
Gambar 4.23 Grafik respon dinamis traksi RMS kendaraan terhadap waktu

Gambar 4.22 dan gambar 4.3 adalah grafik traksi terhadap waktu yang diputar pada 0 rpm – 8000 rpm yang dihasilkan dari simulasi *e-drivetrain* dengan 3 variasi *coaxial magnetic gear*. Dari ketiga grafik di atas terlihat karakteristik dari putaran 0 rpm mengalami penurunan secara fluktuatif hingga 8000 rpm kemudian mencapai *trend* fluktuatif yang konstan, hal tersebut diakibatkan karena input dari hasil torsi *coaxial magnetic gear* merupakan grafik sinusoidal. Adapun hasil dari ketiga variasi yakni traksi rms untuk variasi panjang 100 mm sebesar 11442 N dan traksi *peak* 12013 N lalu pada variasi panjang 150 mm memiliki traksi rms dan traksi *peak* masing-masing sebesar 11467 N dan 12227N, sedangkan untuk traksi rms dengan variasi panjang 200 mm memiliki traksi rms 11494 N serta traksi *peak* sebesar 12253 N. Sedangkan gambar 4.23 merupakan hasil grafik respon traksi RMS jika dioperasikan pada kecepatan angular 0 rpm hingga 8000 rpm.

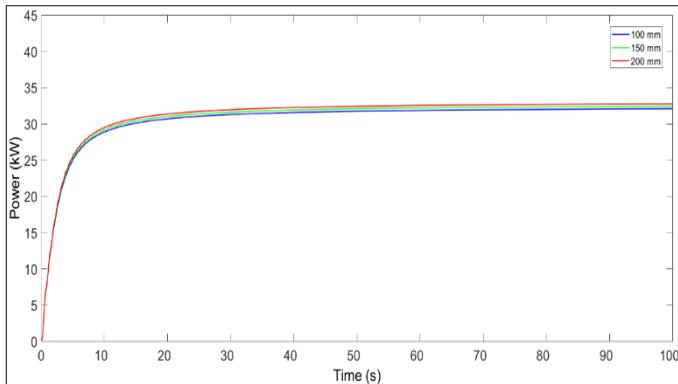
Dari simulasi, didapatkan grafik traksi pada ketiga variasi panjang *coaxial magnetic gear*. Terlihat grafik mengalami penurunan besar traksi pada waktu 0 - 60 detik sedangkan pada waktu 60 – 100 detik traksi konstan secara fluktuatif. Secara teori, ketika kendaraan melaju dari keadaan diam, kendaraan mendapatkan percepatan dari putaran motor. Maka kendaraan

membutuhkan gaya yang untuk melawan gaya – gaya hambat yang bekerja. traksi tersebut akan semakin menurun dikarenakan mobil sudah melaju secara konstan. Pada awal respon dinamis traksi terlihat memiliki nilai gaya dorong yang lebih besar, hal ini karena pada rasio transmisi berfungsi untuk kendaraan pada kondisi jalan menanjak atau saat kendaraan sedang awal akan bergerak dimana membutuhkan torsi yang tinggi. Serta dari grafik dapat dilihat pada waktu 60-100 dimana gelombang respon telah *steady state* namun memiliki besar amplitudo yang berbeda hal tersebut akan mempengaruhi getaran yang dihasilkan kendaraan.

4.7.4 Analisis Respon Dinamis *Power* Kendaraan



Gambar 4.24 Grafik respon dinamis *power* kendaraan terhadap waktu



Gambar 4.25 Grafik respon dinamis *power* rms kendaraan terhadap waktu

Gambar 4.24 dan gambar 4.25 adalah grafik *power* terhadap waktu yang diputar pada 0 rpm – 8000 rpm yang dihasilkan dari simulasi *e-drivetrain* dengan 3 variasi *coaxial magnetic gear*, sedangkan grafik 4. Dari ketiga grafik di atas terlihat karakteristik dari putaran 0 rpm mengalami kenaikan secara fluktuatif hingga 8000 rpm kemudian mencapai *trend* fluktuatif yang konstan, hal tersebut diakibatkan karena input dari hasil torsi *coaxial magnetic gear* merupakan grafik sinusoidal. Adapun hasil dari ketiga variasi *peak power* untuk variasi panjang 100 mm sebesar 34,38 kW lalu pada variasi panjang 150 mm memiliki *peak power* dengan besar 34,96 kW, sedangkan untuk percepatan rms dengan variasi panjang 200 mm memiliki *peak power* sebesar 35,60 kW. Sedangkan gambar 4.25 merupakan hasil grafik respon *power* RMS jika dioperasikan pada kecepatan angular 0 rpm hingga 8000 rpm

Dari hasil simulasi, didapatkan grafik *power* terhadap waktu yang mana pada setiap grafik pada detik 0 sampai dengan 100, kecepatan kendaraan naik kemudian *power* bernilai konstan. Terlihat pula semakin besar input torsi yang diberikan maka semakin besar pula simpangan atau amplitudonya, namun untuk *power* maksimum tetap sama karena menggunakan rasio transmisi yang sama. Secara teori pada awal kendaraan melaju dari keadaan,

kendaraan mengalami kenaikan *power* pada waktu 0 – 60 detik hal ini karena pada *power* keseluruhan dari motor sama dengan *power* yang dibutuhkan untuk melawan gaya hambat. pada waktu 60-100 kendaraan telah melaju dengan kecepatan konstan. Adanya hambatan pada *powertrain* dan *body* kendaraan dikarenakan adanya parameter - parameter pada simulasi. Serta dari grafik dapat dilihat pada waktu 60-100 dimana gelombang respon telah *steady state* namun memiliki besar amplitudo yang berbeda hal tersebut akan mempengaruhi getaran yang dihasilkan kendaraan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Rancangan *coaxial magnetic gear* untuk mobil Toyota Calya yang diintegrasikan dengan motor listrik 35 kW, memiliki diameter luar 118 mm dengan diameter poros 20 mm dengan komposisi *inner magnet* sebanyak 4 pasang, *outer magnet* 10 pasang, dan *pole pieces* 14 buah serta rasio transmisi 1 tingkat percepatan 1:3,5.
2. Dari ketiga variasi panjang *coaxial magnetic gear* memiliki karakteristik hasil torsi yang menurun seiring bertambahnya kecepatan angular. Karena dengan naiknya kecepatan input pada *inner rotor* maka torsi maksimum yang dihasilkan *coaxial magnetic gear* semakin berkurang, hal ini dikarenakan kontak magnet berlangsung sangat cepat antara *inner rotor* dengan *steel pole piece* sehingga pergerakan dari *inner rotor* memberikan efek *fictive torsion spring*. serta semakin panjang arah *axial* dari variasi *coaxial magnetic gear* maka semakin besar torsinya karena semakin luas kontak *area magnet*, tanpa mengubah rasio gearnya.
3. Rancangan yang sesuai dengan kebutuhan mobil Toyota Calya adalah *coaxial magnetic gear* dengan panjang 150 mm karena torsi rms yang dihasilkan 144,91 Nm pada putaran 100 rpm dan nilai torsi rms sebesar 83,02 Nm untuk putaran 8000 rpm, hasil ini dinilai layak digunakan mengingat hasil torsi untuk Toyota Calya dengan konfigurasi *internal combustion engine* dihasilkan 107,87 Nm. Serta untuk kecepatan maksimum yang dapat dicapai kendaraan sebesar 111,74 km/h, untuk percepatan maksimum dengan besar 4,963 m/s², gaya dorong

maksimum yang dihasilkan 12.227 N dan *power* maksimum yang dihasilkan sebesar 34.95 kW.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang dilakukan terdapat terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, antara lain :

1. Perlu dilakukan analisis *variable coaxial magnetic gear* atau *active magnetic gear* agar kendaraan dapat beroperasi pada kondisi terbaik
2. Dapat dilakukan variasi panjang magnet diantara *range* yang telah dilakukan dan jumlah pasangan magnet dengan rasio gigi yang sama, sehingga rancangan coaxial magnetic gear lebih tepat dalam penentuan pasangan magnet.
3. Dapat dilakukan simulasi dengan *balancer (flywheel)* agar hasil torsi lebih konstan.
4. Untuk tugas akhir selanjutnya mungkin perlu dilakukan eksperimen dengan skala kecil agar lebih mudah dalam melakukan validasi data.

DAFTAR PUSTAKA

- Hamidizadeh, S. 2016. "Study of Magnetic Properties and Demagnetization Models of Pemanent Magnets for Electric Vehicle Application". **Department of Mining and Materials Engineering, McGill University.**
- Singh, A., Gite, M., dan Narkhede, A. 2014. "An Overview of Neodymium Magnets over Normal Magnets for the Generation of Energy". **International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication.**
- Jørgensen, F.T. 2010. "Design and Contruction of Permanent Magnetic Gears". **Department of Energy Technology, Aalborg University.**
- Atallah, K., dan Howe, D. 2001. "A Novel High-Performance Magnetic Gear". **Department of Electronic and Electrical Engineering, The University of Sheffield.**
- Atallah, K., dan Howe, D. 2003. "High-Performance Magnetic Gears". **Department of Electronic and Electrical Engineering, The University of Sheffield.**
- Molokanov, O., dan Kurbatov, P. 2015. "Dyamic Model of Coaxial Planetary Gear". **Department of Electrical and Electronic Apparatus, Moscow Power Engineering Institute.**
- Rotondale, A., dan Villani, M. 2014. "Analysis of High-Performance Magnetic Gears for Electric Vehicle". **Dept. of Industrial and Information Engineering and Economics, University of L'Aquila.**
- Scheidler, J.J. 2018. "NASA's Magnetic Gearing Research for Electrified Aircraft Propulsion". **NASA Glenn Research Center, Cleveland.**
- Fukoka, M. 2013. "Dynamic Analysis of Planetary-Type Magnetic Gear Based on Reluctance Network Analysis". **Tohoku University.**

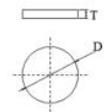
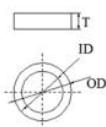
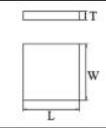
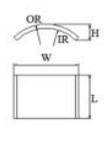
- Rasmussen., et all. 2005. "Development of a High-Performance Magnetic Gear". **Aalborg University**.
- Verma, M., Sreejeth, M., dan Singh, M. 2018. "Performance Evaluation of Conventional and Electric *powertrain*". **IEEE India International Conference on Power Electronics** (pp. 1-6).
- Sutantra, I.N., dan Sampurno, M.D. 2010. **Teknologi Otomotif Edisi Kedua**. Surabaya: Guna Widya.
- Sutantra, I.N. 2015. **Teknologi Otomotif Hybrid Edisi Pertama**. Surabaya: Guna Widya.
- Yoga, N.B., dan Sutantra, I.N. 2019. Desain dan Analisis Sistem Tenaga dan Transmisi pada Mobil Bertenaga Listrik Ezzy ITS II. **Institut Teknologi Sepuluh Nopember**.
- Filosa, A. dan Ariatedja, J.B. 2018. Analisis Pengaruh Frekuensi dari Koil Terhadap Rasio Torsi pada *Planetary Magnetic Gear* sebagai Pengganti CVT. **Institut Teknologi Sepuluh Nopember**.
- PT Toyota-Astra Motor. 2016. **Technical Data Toyota Calya**. Jakarta: Toyota Astra Motor
- Kohara Gear Industry Co., Ltd. 2005. **Product Guides & Technical Data**. Saitama-ken: KHK Gear
- Yasa Co., Ltd. 2018. **Product Guides & Technical Data BLDC Yasa P400**. Kidlington: Yasa Limited

LAMPIRAN

- Lampiran 1**
 Spesifikasi permanen magnet dari *Advanced Magnet China*, bentuk magnet, arah magnet dan range ukuran.

 **ADVANCED MAGNETS**
Since 1988 • 40 Years of Magnet Making

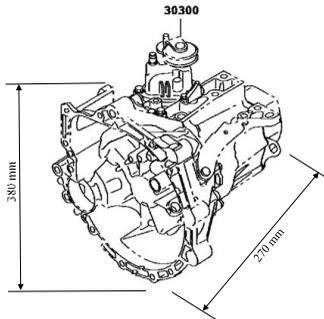
Table II Sintered NdFeB Magnets' Shapes, Magnetization Direction and Size Range

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
Arc/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: 1-80 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.

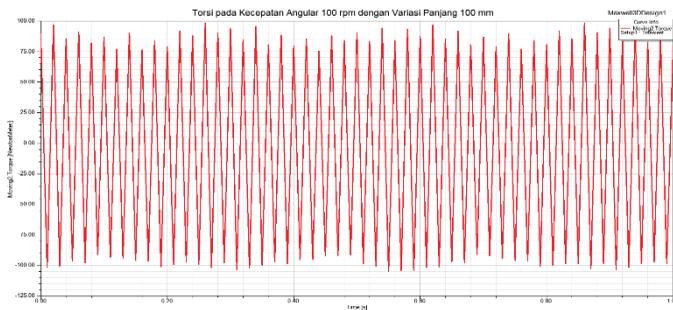
- **Lampiran 2**

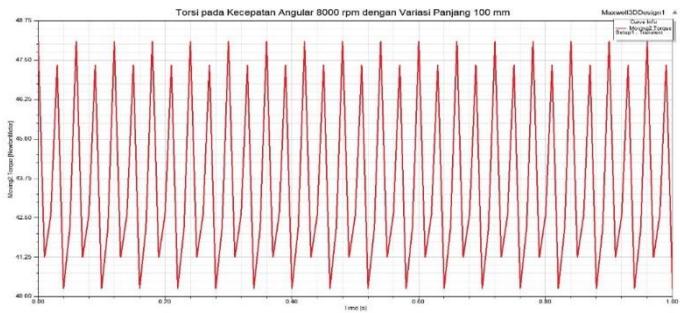
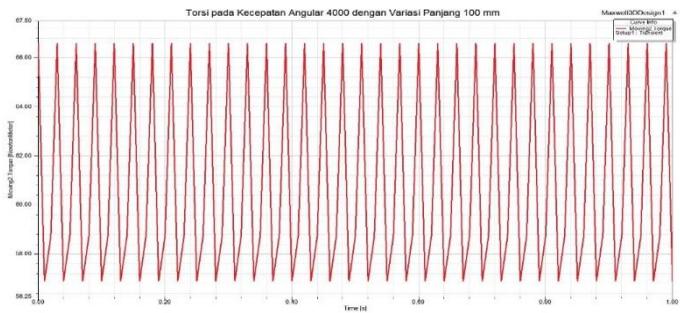
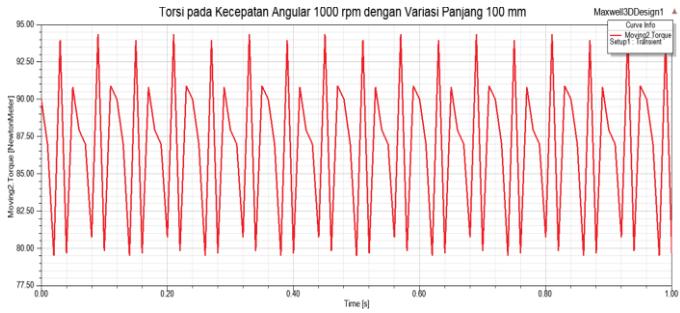
Berikut merupakan spesifikasi dari dimensi *gear case* transmisi Toyota Calya.



- **Lampiran 3**

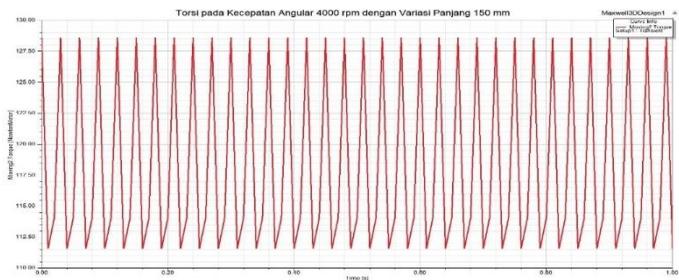
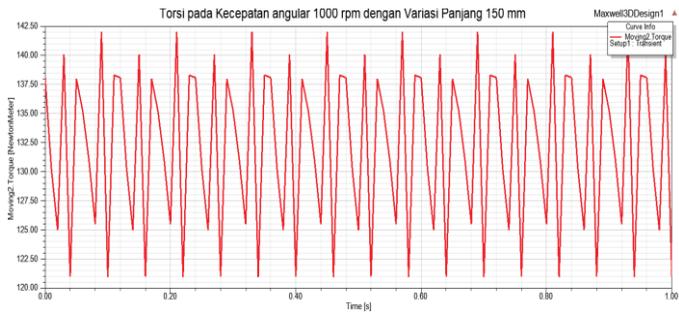
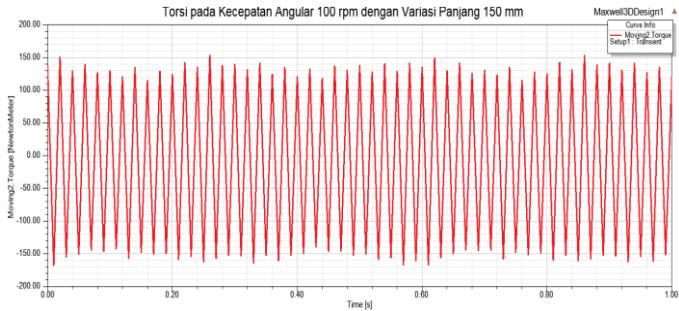
Berikut merupakan hasil torsi *coaxial magnetic gear* dengan *software Ansys Maxwell* dengan variasi panjang *axial* 100 mm dan kecepatan angular.

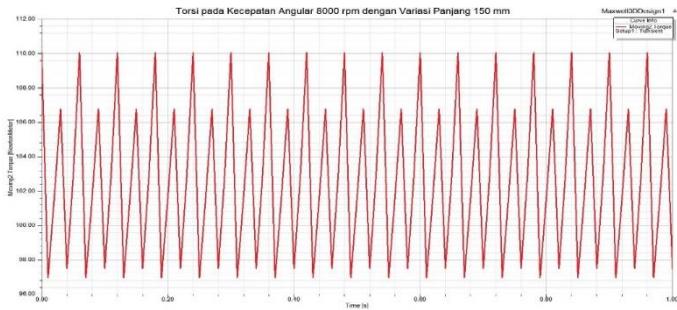




- **Lampiran 4**

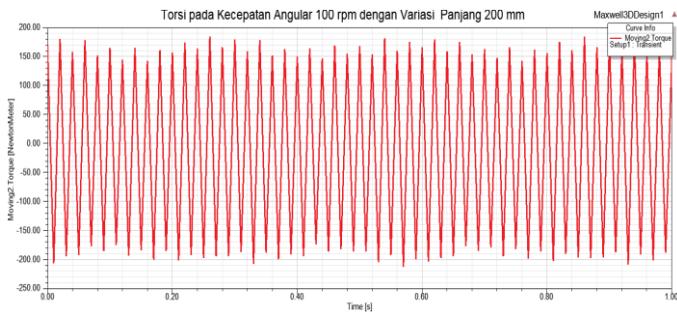
Berikut merupakan hasil torsi *coaxial magnetic gear* dengan *software Ansys Maxwell* dengan variasi panjang *axial* 150 mm dan kecepatan angular.

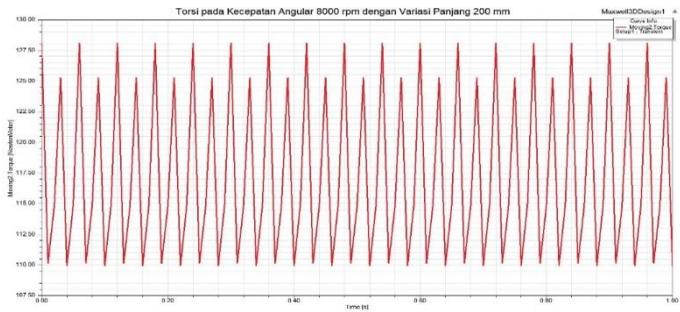
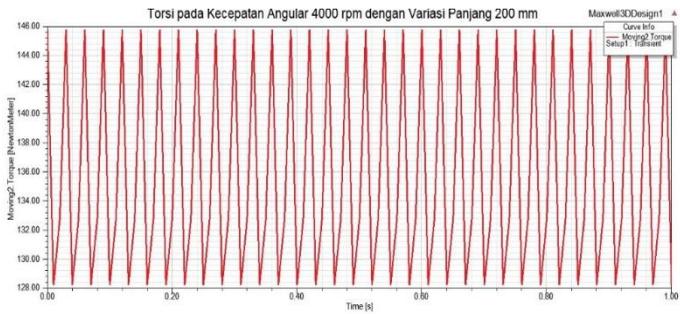
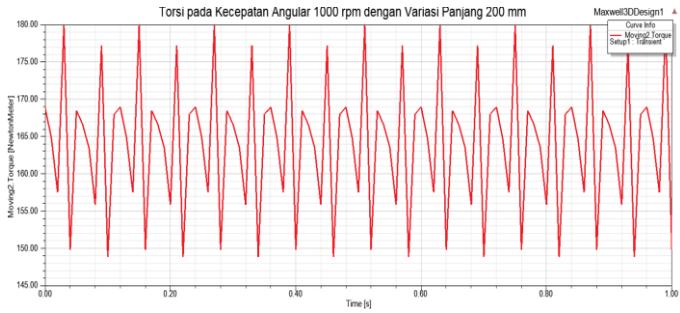




- **Lampiran 5**

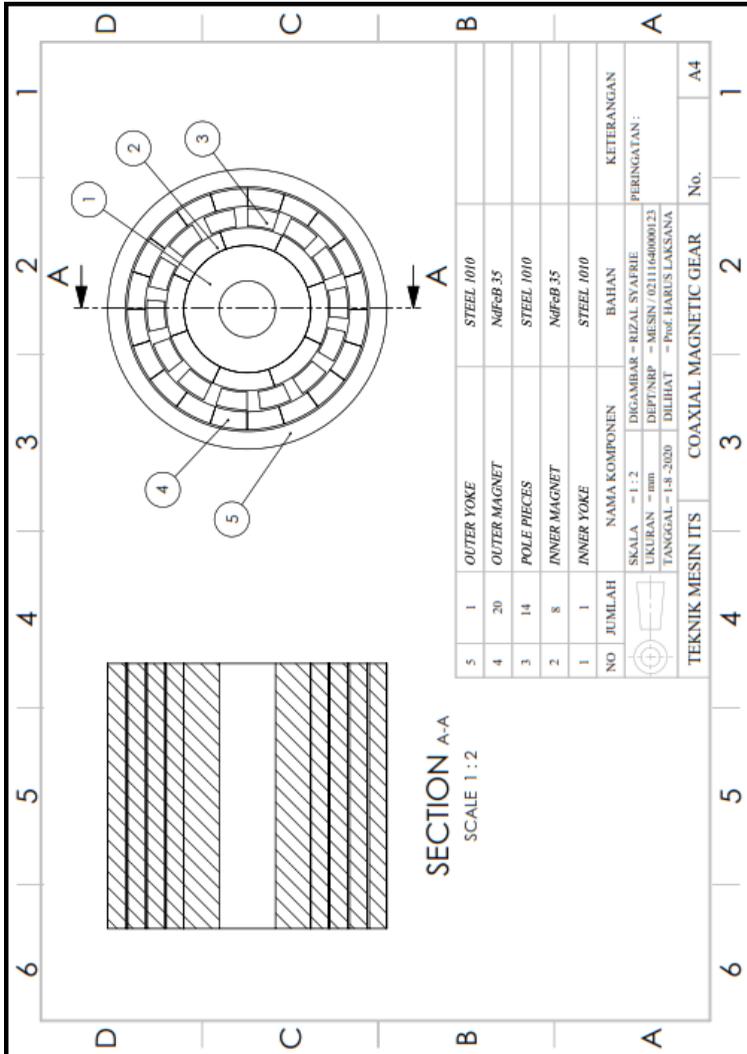
Berikut merupakan hasil torsi *coaxial magnetic gear* dengan *software Ansys Maxwell* dengan variasi panjang axial 200 mm dan kecepatan angular

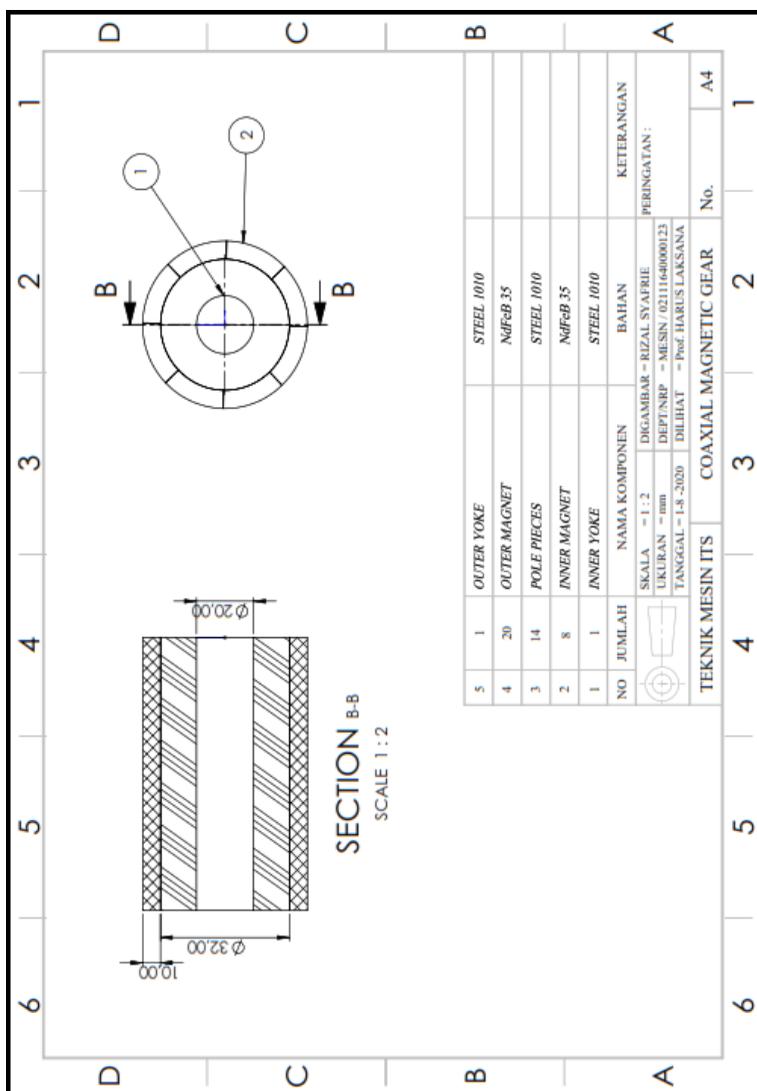


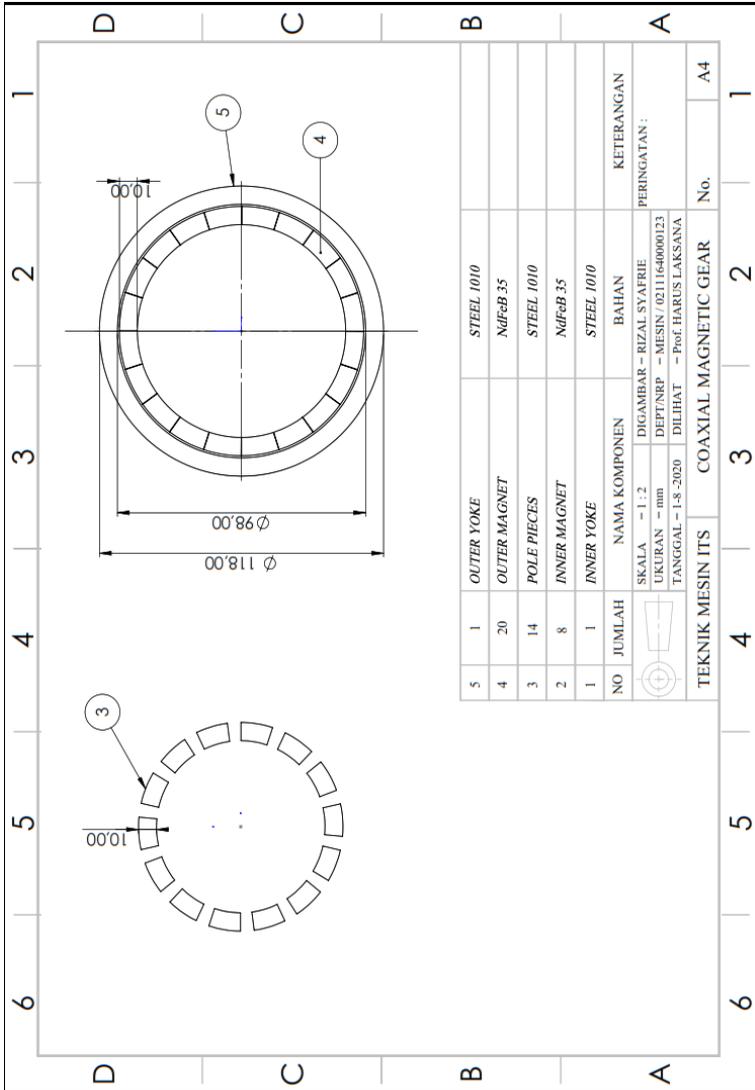


• **Lampiran 6**

Berikut merupakan gambar teknik dari *coaxial magnetic gear*







5	1	OUTER YOKE	STEEL 1010
4	20	OUTER MAGNET	NiFeB 35
3	14	POLE PIECES	STEEL 1010
2	8	INNER MAGNET	NiFeB 35
1	1	INNER YOKE	STEEL 1010
NO	JUMLAH	NAMA KOMPONEN	BAHAN
		SKALA - 1:2	DIGAMBAR - RIZAL SYAFRIE
		UKURAN - mm	DEPT/NRP - MESIN / 0211164000123
		TANGGAL - 1-8-2020	DILIHAT - Prof. HARUS LAKSANA
		TEKNIK MESIN ITS	COAXIAL MAGNETIC GEAR
		No.	A4

KETERANGAN :

1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BIODATA PENULIS



Rizal Syafrie lahir di Bojonegoro, 25 Maret 1998, merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan M. Shokeh dan Diyah Kusuma. Penulis mengawali pendidikan formal di SDN Kepatihan, Bojonegoro, pada tahun 2004-2010. Pendidikan menengah penulis diambil di SMPN 1 Bojonegoro, pada tahun 2010-2013, dan dilanjutkan ke SMAN 1 Bojonegoro, pada tahun 2013-2016. Penulis kemudian melanjutkan pendidikan perguruan tinggi pada tahun 2016 di Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada masa perkuliahan, penulis banyak aktif di kegiatan organisasi kampus. Penulis mendapat amanah sebagai staff divisi Organisasi Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin periode 2017-2018. Kemudian penulis menjabat sebagai kepala divisi Organisasi Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin periode 2018-2019. Ditahun terakhir penulis menjabat sebagai Bendahara Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin periode 2019-2020. Pengalaman menyenangkan dan menantang menempa karakter penulis menjadi manusia yang jauh lebih baik selama dalam berorganisasi maupun saat aktif di laboratorium rekayasa vibrasi dan sistem otomotif. Penulis berharap tugas akhir ini dapat menjadi kebermanfaatn bagi banyak orang. Untuk informasi, saran, dan kepentingan sehubungan dengan penelitian, penulis dapat dihubungi melalui surat elektronik: rizalsyafrie688@gmail.com