



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM 141585

ANALISIS PENGARUH VARIASI *AIR GAP*, JUMLAH MAGNET, DAN GEOMETRI TERHADAP TORSI *MAGNETIC GEAR* TIPE *BEVEL* 90⁰

GUSTRI ERWIN RASYIDWANTO
NRP. 021116 45 00034

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM 141585

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *AIR GAP*, JUMLAH
MAGNET, DAN GEOMETRI TERHADAP TORSI
MAGNETIC GEAR TIPE *BEVEL 90⁰***

**GUSTRI ERWIN RASYIDWANTO
NRP 021116 45 000034**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018**



FINAL PROJECT - TM 141585

***ANALYSIS THE EFFECT OF AIR GAP, NUMBER OF
MAGNET, AND GEOMETRY ON MAGNETIC BEVEL
GEAR 90⁰ TORQUE***

**GUSTRI ERWIN RASYIDWANTO
NRP 021116 45 000034**

Advisor Lecturer
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

*Department Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018*

**ANALISIS PENGARUH VARIASI AIR GAP, JUMLAH
MAGNET, DAN GEOMETRI TERHADAP TORSI
MAGNETIC GEAR TIPE BEVEL 90⁰**

TUGAS AKHIR

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

Oleh :

GUSTRI ERWIN RASYIDWANTO
NRP. 021116 45 000034

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196508101991021001
2. Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E (Penguji I)
NIP. 196511031990021001
3. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT (Penguji II)
NIP. 196807061999031004
4. Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD. (Penguji III)
NIP. 197909262005011001

SURABAYA

JULI, 2018

ANALISIS PENGARUH VARIASI *AIR GAP*, JUMLAH MAGNET, DAN GEOMETRI TERHADAP TORSI *MAGNETIC GEAR* TIPE *BEVEL 90⁰*

Nama : Gustri Erwin Rasyidwanto
NRP : 02111645000034
Jurusan / Fakultas : Teknik Mesin / Fakultas Teknologi
Industri
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.

Abstrak

Pada era moderen ini roda gigi sudah jauh berkembang baik dari sisi fungsi, bentuk profil, material, maupun proses manufakturnya. Roda gigi secara luas digunakan untuk merubah kecepatan dan mentransmisikan torsi di berbagai aplikasi industri. Di bidang desain mesin listrik, torsi *density* adalah salah satu hal yang penting. Ketika mesin gagal memenuhi persyaratan torsi *density* atau hanya tidak mampu menyesuaikan torsi beban, roda gigi biasanya digunakan. Akan tetapi, terdapat beberapa masalah yang melekat seperti gesekan kontak, kebisingan, dan panas, sementara getaran dan keandalan menjadi perhatian besar. Oleh karena itu, *magnetic gear* diusulkan untuk menghindari masalah yang terkait dengan roda gigi mekanik traditional.

Pada penelitian kali ini akan dilakukan pembuatan desain *magnetic gear* khususnya tipe *bevel* dengan sudut poros 90° . Desain yang dibuat ada tiga, dengan memvariasikan sudut kontak berdasarkan rasio yaitu 2:1 dan parameter (dimensi magnet, material magnet, dll) yang sama. Kemudian akan dilakukan perhitungan *3D finite element* dengan menggunakan *software Ansys Maxwell* untuk menganalisis torsi dari setiap desain *magnetic gear*. Analisis dilakukan dengan memvariasikan celah udara (*air gap*) pada setiap desain sejauh 0,2 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm dan juga memvariasikan jumlah magnet pada rotor HS-LS sebanyak 4-8, 6-12, dan 8-16. Penelitian yang dilakukan tersebut diharapkan mampu membantu dalam menentukan desain

magnetic gear tipe *bevel* dengan sudut poros 90° yang memiliki *allowable* torsi optimal pada *air gap* dan jumlah magnet yang sesuai.

Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah grafik torsi dari tiap desain yang telah dibuat terhadap waktu, torsi maksimum berdasarkan variasi celah udara (*air gap*) dan jumlah magnet. Torsi maksimum tertinggi pada desain geometri 1 dengan jumlah magnet 8-16 dan *air gap* 0,5 mm sebesar 9,2061 Nm. Dengan jumlah magnet dan *air gap* yang sama torsi maksimum tertinggi juga didapatkan pada desain geometri 2 dan 3 secara berurut yaitu 9,7244 dan 7,6852 Nm. Berdasarkan torsi *density*-nya desain geometri 2 *magnetic bevel gear* 90° merupakan yang paling efisien dikarenakan untuk volume yang ditempati torsi yang dimiliki hampir sama dengan mekanik *bevel gear* bermaterial baja S45C modul 3 mm dan memiliki torsi maksimum yang lebih tinggi dari mekanik *bevel gear* bermaterial *stainless steel* dengan modul 3 mm.

Kata Kunci : *Magnetic gear, Air gap, Bevel gear, Torsi*

***ANALYSIS THE EFFECT OF AIR GAP, NUMBER OF
MAGNET, AND GEOMETRY ON MAGNETIC BEVEL
GEAR 90⁰ TORQUE***

Name : **Gustri Erwin Rasyidwanto**
NRP : **02111645000034**
Department / Faculty : ***Mechanical Engineering / Faculty of
Industrial Technology***
Advisor Lecturer : **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.**

Abstract

In this modern era the gears are much improved both in terms of function, profile form, material, and manufacturing process. Gears are widely used to change speed and transmit torque across a range of industrial applications. In the field of electric machine design, torque density is one of the important things. When a machine fails to meet the torque density requirement or simply can not adjust the load torque, the gear is usually used. However, there are some inherent problems such as contact friction, noise, and heat, while vibration and reliability are of great concern. Therefore, magnetic gear is proposed to avoid problems associated with traditional mechanical gears.

In this research, magnetic gear design will be made, especially bevel type with a shaft angle 90°. There are three designs to be created, by varying the contact angle based on the ratio of 2:1 and the same parameters (magnetic dimensions, magnetic material, etc.). Then will be calculated 3D finite element using Ansys Maxwell software to analyze the torque of each magnetic gear design. The analysis was carried out by varying air gaps in each design by 0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm and also varying the number of magnets on the HS-LS rotor by 4-8, 6-12, and 8 -16. The research is expected to assist in determining the magnetic bevel gear design with a 90° axle angle which has optimal allowable torque on the air gap and the corresponding magnet amount.

The results obtained from this study are the torque graph of each design that has been made to the time, maximum torque based on air gap variation and the number of magnets. The highest maximum torque on the design of geometry 1 with the number of magnets 8-16 and 0.5 mm air gap is 9,2061 Nm. With the same amount of magnet and air gap the highest maximum torque is also obtained in geometric designs 2 and 3 respectively is 9,7244 and 7,6852 Nm. Based on its torque density the 2nd magnetic bevel gear 90° geometry design is the most efficient due to the torque occupied volume that is owned almost the same as the S45C steel mechanical bevel gear with 3 mm module and has a maximum torque higher than the stainless steel mechanical bevel gear with 3 mm module.

Keywords: Magnetic gear, Air gap, Bevel gear, Torque

KATA PENGANTAR

*Bismillahirrahmanirrahim,
Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia Nya sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir ini dengan baik. Tidak lupa shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW dan para keluarga serta sahabat dan umatnya hingga akhir zaman. Amiin. Tugas Akhir ini ditulis sebagai salah satu prasyarat kelulusan sebagai mahasiswa S-1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Berkenaan dengan tugas akhir yang telah rampung ini, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan dan kerjasamanya, khususnya kepada:

1. Ayah, Ibu dan saudara yang senantiasa memberikan dukungan dan doa.
2. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan arahan, nasehat, dan masukan dalam pengerjaan penelitian Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, MT, bapak Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD., dan bapak Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis.
4. Bapak Sutikno, selaku dosen wali yang telah memberikan arahan, motivasi, dan bantuan kepada penulis selama masa perkuliahan pada tahap Sarjana.
5. Seluruh dosen serta karyawan di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS yang telah banyak sekali membantu penulis dalam hal akademis dan hal non akademis.
6. Partner tugas akhir, Rahmat Ikrahmadani yang telah memberikan bantuan baik waktu, tenaga dan pikiran selama pengerjaan tugas akhir ini.

7. Teman-teman mengerjakan tugas akhir yaitu Alfi, Christian, dan ikhtiar atas segala bantuan dan suka dukanya.
8. Seluruh teman-teman LJ16 yang selalu membantu dalam proses perkuliahan.
9. Teman-teman yang sering mampir di kost : Krisna, Putra, Rere, Ladrian, Dito (gondrong) atas canda tawa dan semangat yang diberikan saat penulis merasa jenuh selama perkuliahan dan pengerjaan tugas akhir.
10. Semua pihak lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, berkat keterlibatannya lah penulis dapat mencapai pencapaian sejauh ini.

Penulis menyadari bahwa pada Tugas Akhir ini masih terdapat beberapa kekurangan yang disebabkan oleh keterbatasan kemampuan diri dari penulis. Oleh karena itu dengan segala rasa hormat dan rendah hati penulis mohon masukan dan kritiknya, baik untuk penelitian Tugas Akhir ini ataupun untuk diri penulis sendiri.

Akhir kata, semoga penelitian ini menjadi sesuatu yang berguna bagi seluruh umat manusia dan masyarakat Indonesia khususnya. Amiin.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Judul	
Lembar Pengesahan	
Abstrak	i
<i>Abstract</i>	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
KETERANGAN SIMBOL.....	xv
BAB I	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Teknologi <i>Magnetic Gear</i>	5
2.2 Magnet	9
2.3 Bagian-Bagian Magnet	10
2.4 Medan Magnet	12
2.4.1 Permeabilitas magnet	14
2.4.2 Histerisis Magnet	15
2.5 Macam-macam Magnet permanen.....	17
2.6 Sifat Kemagnetan Bahan.....	20
2.7 Dasar <i>Magnetic</i> dan <i>Mechanical Gear</i>	22
2.8 Pengetahuan Tentang <i>Bevel gear</i>	25
2.9 Perhitungan Torsi Magnetik	28
2.9.1 Perhitungan Drive Magnet Surface Current <i>Density</i>	33
2.9.2 Perhitungan External Flux <i>Density</i> Field	33

2.9.3	Perhitungan Magnetisasi	34
2.10	Penentuan Rasio gear	36
2.11	Software Analisis	37
BAB III	.....	39
METODE PENELITIAN	.....	39
3.1	<i>Flowchart</i> Penelitian	39
3.2	Penjelasan <i>Flowchart</i>	40
3.3	Variable Penelitian	41
3.3.1	Variabel Bebas	41
3.3.2	Variable Terkontrol	41
3.4	Proses Verifikasi	42
3.5	Metode <i>Finite Elemen Analysis</i>	43
3.5.1	Tahap <i>Pre-processing</i>	43
3.5.2	Tahap <i>Processing</i>	47
3.5.3	Tahap <i>Post-Processing</i>	51
3.6	Langkah-langkah Simulasi	52
3.7	Metode Analisis Data dan Pembahasan	53
3.8	<i>Flowchart</i> Simulasi	54
BAB IV	.....	57
ANALISIS DAN PEMBAHASAN	.....	57
4.1	Hasil Verifikasi	57
4.2	Hasil simulasi	59
4.3	Analisis dan Pembahasan Grafik Hasil Simulasi	63
4.3.1	Desain Geometri 1	63
4.3.2	Desain Geometri 2	65
4.3.3	Desain Geometri 3	67
4.4	Perbandingan antara mekanik <i>bevel gear</i> dengan magnetik <i>bevel gear</i>	74
4.5	Perbandingan desain magnetik gear berdasarkan torsi <i>density</i>	79
BAB V	.....	81
KESIMPULAN DAN SARAN	.....	81
5.1	Kesimpulan	81
5.2	Saran	82
DAFTAR PUSTAKA	.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 <i>Magnetic gear</i> pertama (Armstrong, 1901).....	5
Gambar 2. 2 <i>Coaxial magnetic gear</i> (Neuland, 1916)	6
Gambar 2. 3 Permanen magnet spur gear (H.T. Faus, 1941)	6
Gambar 2. 4 a) Spur <i>magnetic gear</i> dengan magnet U. (Rand, 1970) b) Coaxial magnet gear (Laing, 1972).....	7
Gambar 2. 5 Perpendicular magnetic gear (Y. D. Yao, dkk 1996)	8
Gambar 2. 6 <i>Magnetic geared permanent magnetic machine</i> (Chau dan rekannya, 2007).....	8
Gambar 2. 7 (a) Susunan magnet elementer besi/baja sebelum menjadi magnet. (b) Susunan magnet elementer besi/baja sesudah menjadi magnet. (S. Sutomo, 2012).....	12
Gambar 2. 8 Vektor gaya magnet (S. Sutomo, 2012)	13
Gambar 2. 9 Kurva Histerisis (Taufik, 2012).....	16
Gambar 2. 10 <i>Neodymium Magnet</i> (S. Sutomo, 2012).....	18
Gambar 2. 11 <i>Samarium-Cobalt Magnets</i> (S. Sutomo, 2012).....	19
Gambar 2. 12 Alnico magnet (S. Sutomo, 2012)	19
Gambar 2. 13 <i>Magnetic spur gear</i> dengan magnet permanen dan <i>mechanical spur gear</i> (F.T. Jorgensen, 2010).....	22
Gambar 2. 14 <i>Magnetic gear</i> dan diagram torsi, dimana menunjukkan hubungan antara torsi dengan sudut putar pada roda gear penggerak. (F.T. Jorgensen, 2010)	23
Gambar 2. 15 Gambar volume total gear terluar V_T (F.T. Jorgensen, 2010)	24
Gambar 2. 16 Perpendicular <i>bevel gear</i> dan <i>bevel gear</i> untuk beberapa sudut (G. Muruganandam et al., 2013) .	26
Gambar 2. 17 <i>Magnetik bevel gear</i>	27
Gambar 2. 18 Sketsa <i>source</i> dan <i>drive</i> magnet untuk radial <i>magnetic gear</i> (F.T. Jorgensen, 2010).....	28
Gambar 2. 19 Ilustrasi Perhitungan Torsi.....	30
Gambar 2. 20 (a) fluks <i>density air gap</i> 5 mm (b) fluks <i>density</i> <i>air gap</i> 2 mm.....	35

Gambar 3. 1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	39
Gambar 3. 2 Model obyek simulasi.....	43
Gambar 3. 3 Design 1 solidwork.....	44
Gambar 3. 4 Design 2 solidwork.....	45
Gambar 3. 5 Design 3 solidwork.....	46
Gambar 3. 6 Penyusunan kutub magnet & spesifikasi material ..	47
Gambar 3. 7 pembuatan region <i>magnetic gear</i>	48
Gambar 3. 8 <i>mesh tetrahedra</i>	48
Gambar 3. 9 Konvergensiitas	49
Gambar 3. 10 <i>Part Motion</i> pada <i>Magnetic gear</i>	50
Gambar 3. 11 Torsi LS vs Time	51
Gambar 3. 12 <i>Flowchart</i> Simulasi	55
Gambar 4. 1 Desain obyek simulasi	57
Gambar 4. 2 Grafik torsi terhadap waktu menggunakan <i>Ansys Maxwell Electromagnetic</i>	58
Gambar 4. 3 Desain (a) geometri 1 (b) geometri 2 (c) geometri 3	60
Gambar 4. 4 Distribusi kerapatan fluks medan magnet (a) desain geometri 1 (b) desain geometri 2 (c) desain geometri 3	60
Gambar 4. 5 Grafik torsi terhadap waktu untuk desain (a) geometri 1 (b) geometri 2.....	62
Gambar 4. 6 Grafik torsi terhadap <i>air gap</i> untuk desain geometri 1	63
Gambar 4. 7 Grafik torsi terhadap <i>air gap</i> untuk desain geometri 2	65
Gambar 4. 8 Grafik torsi terhadap <i>air gap</i> untuk desain geometri 3	67
Gambar 4. 9 Perubahan distribusi fluks <i>density</i> dengan ditambahnya jumlah magnet (a) desain 1 (b) desain 2 (c) desain 3.....	69
Gambar 4. 10 Posisi Plot Bx By Bz dan Btot desain (a) 1 (b) 2 (c) 3	71
Gambar 4. 11 Bx By Bz dan Btot pada desain geometri 1	71

Gambar 4. 12 B_x B_y B_z dan B_{tot} pada desain geometri 2.....	72
Gambar 4. 13 B_x B_y B_z dan B_{tot} pada desain geometri 3.....	72
Gambar 4. 14 Fluks <i>density</i> (a) <i>air gap</i> 0,5 mm (b) <i>air gap</i> 0,2 mm.....	74
Gambar 4. 15 (a) Desain geometri 1 magnetik <i>bevel gear</i> (b) mekanik <i>bevel gear</i>	75
Gambar 4. 16 (a) Desain geometri 2 magnetik <i>bevel gear</i> (b) mekanik <i>bevel gear</i>	76
Gambar 4. 17 (a) Desain geometri 3 magnetik <i>bevel gear</i> (b) mekanik <i>bevel gear</i> (<i>crown gear</i>)	77
Gambar 4. 18 Perbandingan gear magnet dengan gear mekanik berdasarkan torsi <i>density</i>	78
Gambar 4. 19 Grafik desain gear magnet vs torsi <i>density</i>	79

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 perbandingan torsi <i>magnetic gear</i> dengan tipe magnet berbeda (S.Mousavi, 2015).....	20
Tabel 2. 2 Perbandingan biaya relatif magnet (S. Mousavi, 2015).....	20
Tabel 2. 3 Temperature Curie Permanen magnet.....	21
Tabel 2. 4 Perbandingan <i>magnetic gear</i> dan <i>mechanical gear</i> (Wang, 2015).....	25
Tabel 2. 5 Dimensi <i>bevel gear</i>	28
Tabel 2. 6 Hasil perbandingan torsi berdasarkan material magnet.....	28
Tabel 3. 1 Data objek simulasi	42
Tabel 3. 2 Proses Verifikasi	43
Tabel 3. 3 Dimensi Desain 1	44
Tabel 3. 4 Dimensi Desain 2	45
Tabel 3. 5 Dimensi Desain 3	46
Tabel 3. 6 Data penelitian.....	52
Tabel 3. 7 Langkah-langkah penelitian	52
Tabel 4. 1 Hasil Verifikasi	58
Tabel 4. 2 Perbandingan <i>magnetic gear</i> desain 1 dengan gear mekanik	75
Tabel 4. 3 Perbandingan <i>magnetic gear</i> desain 2 dengan gear mekanik	76
Tabel 4. 4 Perbandingan <i>magnetic gear</i> desain 3 dengan gear mekanik	77

KETERANGAN SIMBOL

H	: Kuat medan magnet (A/m)
B	: Induksi magnet/Medan magnet (Tesla)
M	: Magnetisasi
Φ	: Flux
N	: Jumlah lilitan
I	: Arus (ampere)
l	: panjang kumparan/lilitan (m)
F	: gaya magnet
q	: muatan listrik (coulombs)
v	: vektor kecepatan
χ	: Suseptibilitas
μ	: Permeabilitas medium
B_r	: Fluks <i>density</i> remanensi
μ_0	: Permeabilitas <i>vacuum</i>
μ_r	: Permeabilitas relatif
T	: torsi (Nm)
B_g	: Fluks <i>density air gap</i> (T)
$C\phi$	: Faktor kerapatan fluks
K_c	: koefisien permenace
K_{ml}	: koefisien magnet bocor
r	: vector jarak pada sumbu-r
J_m	: <i>volume current density</i> (A/m ²)
j_m	: <i>surface current density</i> (A/m)
B_{ext}	: <i>external flux density field</i> (Wb)
$T_r(\phi)$	: torsi radial (Nm)
M_s	: magnetisasi <i>source magnet</i> (A/m)
N_s	: jumlah magnet pada <i>source magnet gear</i>
N_d	: jumlah magnet pada <i>drive magnet gear</i>
L	: panjang/tinggi magnet (m)
R_1	: radius dalam <i>drive magnet</i> (m)
R_2	: radius luar <i>drive magnet</i> (m)
p	: jumlah kutub magnet

q	: parameter dari integrasi
$S_r(q)$	: parameter dari integrasi simpson
\emptyset_{edge}	: sudut tertentu dari <i>drive magnet</i> (rad)
\emptyset	: sudut putar <i>drive magnet</i> (rad)
B_x^{ext}	: <i>x-direction external flux density field</i> (Wb)
B_y^{ext}	: <i>y-direction external flux density field</i> (Wb)
$T_t(\emptyset)$	: torsi tangensial (Nm)
N_i	: parameter integrasi torsi
$T(\emptyset)$	: torsi total (Nm)
$T_{t1}(\emptyset)$	: torsi tangensial dalam (Nm)
$T_{t2}(\emptyset)$	: torsi tangensial luar (Nm)
θ	: sudut tertentu dari <i>drive magnet</i> (rad)
\hat{z}	: vector jarak ke arah z
B_r^{ext}	: <i>radial external flux density field</i> (Wb)
B_ϕ^{ext}	: <i>tangential external flux density field</i> (Wb)
r'	: transformasi radius ke koordinat <i>drive magnet</i>
Φ'	: transformasi tangensial ke koordinat <i>drive magnet</i>
M_r	: magnetisasi arah radial (A/m)
M_\emptyset	: magnetisasi arah tangensial (A/m)
ω_P	: kecepatan putar rotor penggerak utama
ω_L	: kecepatan putar rotor sisi beban
N_L	: jumlah pasangan kutub pada rotor sisi beban
N_P	: jumlah pasangan kutub pada rotor sisi penggerak utama
A	: Luas penampang (m^2)
ρ_A	: <i>active torque density</i> (Nm/m^3)
T_{max}	: torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)
V_A	: volume rotor (m^3)
ρ_T	: <i>total torque density</i> (Nm/m^3)
V_T	: volume total (m^3)
T_{nom}	: <i>rated nominal torque</i> (Nm)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Gear merupakan salah satu elemen mesin yang berfungsi untuk mentransmisikan daya dari suatu poros ke poros lainnya. Pada era moderen ini *gear* sudah jauh berkembang baik dari sisi fungsi, bentuk profil, material, maupun proses manufakturnya. *Gear* secara luas digunakan untuk merubah kecepatan dan mentransmisikan torsi di berbagai aplikasi industri. Telah diketahui dengan baik bahwa *mechanical gear* memiliki kerapatan torsi yang tinggi, namun terdapat beberapa masalah yang melekat seperti gesekan kontak, kebisingan, dan panas, sementara getaran dan keandalan menjadi perhatian besar. Sebaliknya, *magnetic gear* (MG) menawarkan keuntungan yang signifikan dengan tidak menimbulkan kebisingan, getaran minimum, tidak diperlukan perawatan, keandalan yang meningkat, memiliki kemampuan proteksi *overload*, dan isolasi fisik antara poros input dan output. Untuk waktu yang lama, MG mendapat sedikit perhatian, hal tersebut dikarenakan kerapatan torsi yang buruk dan dari sirkuit magnetiknya yang relatif kompleks. Namun seiring perkembangan zaman *magnetic gear* menjadi perhatian besar setelah ditemukannya magnet permanen.

Magnetic gear menggunakan magnet permanen untuk mentransmisikan torsi antara poros input dan output tanpa kontak mekanis. Bentuk *magnetic gear* hampir menyerupai *mechanical gear*. Semua gigi dari masing-masing komponen *magnetic gear* bertindak sebagai magnet dengan selingan kutub magnet berlawanan yang disusun secara periodik pada permukaan. Meskipun *magnetic gear* bisa menggunakan kekuatan sebanyak *mechanical gear*, *gear* tersebut bekerja tanpa menyentuh *gear* lainnya, memiliki suara yang sangat rendah dan memiliki sistem proteksi *overload* yaitu akan terjadi slip jika mendapat torsi melebihi torsi maksimumnya, sehingga sangat dapat diandalkan.

Adapun beberapa peneliti yang telah melakukan penelitian dalam hal *magnetic gear*, yaitu antara lain: Armstrong (1901), *gear* yang dibuat terdiri dari dua *gear*, satu dengan elektromagnet dan yang lainnya menggunakan potongan baja. *Gear* tersebut memiliki keuntungan dapat melakukan transfer torsi tanpa kontak dan beroperasi dengan *noise* rendah, namun torsi yang dapat ditransfer untuk volume yang di tempati relatif rendah. H.T Faus (1941) merancang *gear* tipe spur magnetik. Pada penelitiannya *gear* yang dibuat menggunakan bahan magnet permanen. Namun pemanfaatan magnet permanen dalam desain tipe spur yang lemah membuat desain tidak praktis. Y. D Yao, dkk (1996), penelitian yang dilakukan yaitu merancang, membangun dan mengevaluasi *magnetic gear* tipe *bevel*. Chau, dkk (2007), mendesain *magnetic gear* koaksial yang diintegrasikan ke dalam motor DC brushless. Sistem gabungan tersebut memiliki torsi densitas yang tinggi dan efisiensi tinggi pada kecepatan yang relatif rendah. Jian, dkk (2009), penelitian yang dilakukan yaitu mendesain konfigurasi *magnetic gear* yang sama dengan Chau, namun kali ini digunakan dalam aplikasi turbin angin, dan kemudian dibandingkan dengan sistem penggerak mekanik dengan spesifikasi listrik yang sama. Hasilnya desain yang diusulkan berukuran lebih kecil dan bobotnya lebih ringan, dengan biaya bahan lebih murah dari sistem penggerak mekanik.

Pada penelitian Muruganandam et al. (2012), dilakukan pembuatan desain *magnetic gear* tipe *bevel* 90° , namun masih terdapat kelemahan yaitu *air gap* yang digunakan masih tergolong jauh sehingga tidak didapatkan allowable torsi yang optimal. Oleh karena itu, pada penelitian kali ini juga akan dilakukan pembuatan desain magnetik gear khususnya tipe *bevel* dengan sudut poros 90° . Pada penelitian ini akan dibuat tiga desain, yang kemudian akan dibandingkan antara satu sama lain berdasarkan torsi maksimumnya dengan memvariasikan jarak *air gap* dan jumlah magnet pada masing-masing rotor. Dan kemudian berdasarkan torsi maksimumnya akan dilakukan perbandingan

torsi density antara *magnetic gear* dan *mechanical gear* dengan melihat *datasheet* yang ada. Penelitian yang dilakukan tersebut diharapkan mampu membantu dalam menentukan desain *magnetic gear* tipe *bevel* dengan sudut poros 90° yang memiliki *allowable* torsi optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini, antara lain:

1. Bagaimana pengaruh jarak celah udara (*air gap*) antara *gear* penggerak dengan *gear* yang digerakkan terhadap torsi dari desain *magnetic gear* tipe *bevel* yang telah dibuat?
2. Bagaimana pengaruh jumlah magnet terhadap torsi pada desain *magnetic gear* tipe *bevel* yang telah di buat?
3. Bagaimana perbandingan torsi density antara *mechanical gear* dengan *magnetic gear* tipe *bevel* berdasarkan torsi maksimumnya?
4. Bagaimana desain yang harus dibuat berdasarkan rasio dan parameter (dimensi magnet, material magnet, dll) yang sama untuk mendapatkan torsi yang optimal?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh jarak celah udara (*air gap*) antara *gear* penggerak dengan *gear* yang digerakkan terhadap torsi dari desain *magnetic gear* tipe *bevel* yang telah dibuat.
2. Mengetahui pengaruh jumlah magnet terhadap torsi pada desain *magnetic gear* tipe *bevel* yang telah di buat.
3. Mengetahui perbandingan torsi density antara *mechanical gear* dengan *magnetic gear* tipe *bevel* berdasarkan torsi maksimumnya.

4. Mengetahui desain yang harus dibuat berdasarkan rasio dan parameter (dimensi magnet, dll) yang sama untuk mendapatkan torsi yang optimal.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat setelah dilakukannya penelitian ini yaitu memberikan gambaran desain magnetik *bevel gear* sudut 90° yang memiliki nilai *allowable* torsi tinggi dengan *air gap* dan jumlah magnet yang sesuai.

1.5 Batasan Masalah

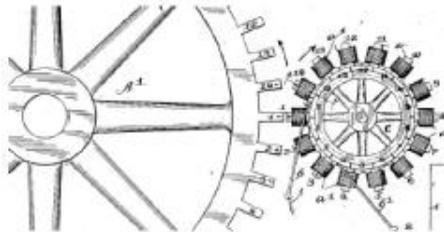
Adapun batasan-batasan yang ditentukan dalam proses mendesain *magnetic gear* tipe *bevel* ini, antara lain sebagai berikut:

1. Material magnet yang digunakan yaitu permanen magnet NdFeB (N35) yang terdapat pada *library software ansys*.
2. *Magnetic gear* yang dibuat yaitu *gear* tipe *bevel*/kerucut untuk sudut poros 90° yang dikhususkan untuk mereduksi.
3. Rasio *gear* yang digunakan yaitu 2:1.
4. Torsi maksimum didapatkan dengan metode 3D finite elemen menggunakan *software Ansys maxwell electromagnetic*.
5. Torsi maksimal (*allowable torque*) dan volume *mechanical gear* dilihat pada *datasheet bevel gear* yang sudah ada.
6. Panjang magnet 50 mm, tebal magnet 10 mm, dan Lebar magnet mengikuti geometri.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Teknologi *Magnetic Gear*

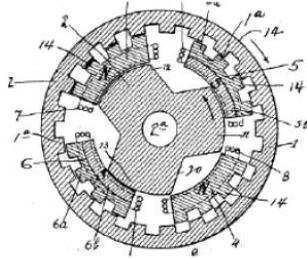
Magnetic gear dapat ditelusuri kembali ke abad ke-20. *Gear* tersebut terdiri dari dua bagian, satu dengan elektromagnet dan yang lainnya dengan potongan baja. Elektromagnet pada *gear* utama dinyalakan dan dimatikan sesuai posisi relatifnya dengan gigi gigi sekunder. Ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 2.1. Perlengkapan tersebut memiliki keuntungan dari transfer daya tanpa kontak dan beroperasi dengan *noise* rendah, namun jumlah torsi yang dapat ditransfer untuk volume yang ditempati rendah. Hanya satu sampai tiga elektromagnet yang tertransfer torsi pada saat tertentu. Elektromagnet harus dihubungkan secara elektrik dengan *slip ring*, yang mana menyebabkan kerugian yang tidak perlu dan memerlukan perawatan yang tinggi. (Armstrong, 1901)



Gambar 2. 1 *Magnetic gear* pertama (Armstrong, 1901)

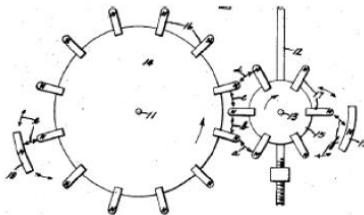
Pada tahun 1916 Neuland menemukan perlengkapan magnet yang jauh lebih unggul. Gigi terdiri dari tiga bagian utama, baja laminasi outer- dan inner-rotor dan potongan modulasi magnetik di antara kedua rotor baja (lihat Gambar 2.2). Potongan-potongan modulasi dibentuk untuk memodulasi fluks magnetik sehingga inner rotor dan outer rotor terlihat harmonik dan sesuai dengan jumlah gigi pada setiap poros. Rasio gigi pada outer- dan inner-rotor ditentukan oleh rasio gigi antara poros. Kerapatan torsi pada konfigurasi ini sangat tinggi dibandingkan

dengan desain tipe spur, karena sebagian besar gigi *gear* ditransfer torsi pada waktu tertentu. Permasalahan dari desain ini adalah desain yang terlalu kompleks membuat ukuran celah udara (*air gap*) tidak praktis. (Neuland, 1916)



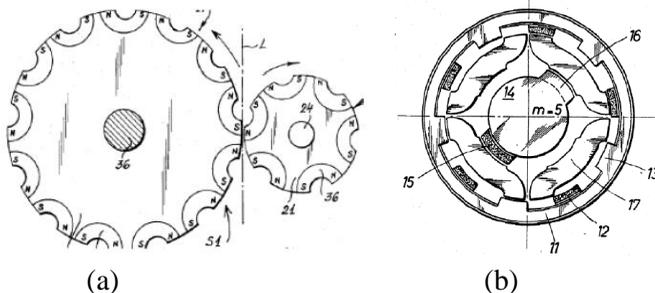
Gambar 2. 2 Coaxial magnetic gear (Neuland, 1916)

H.T. Faus merancang *gear* tipe spur magnetik pada tahun 1941. *Gear* tersebut dioperasikan dengan cara yang sama seperti *spur gear* elektromagnetik seperti yang dijelaskan di atas. Satu-satunya perbedaan adalah bahwa ia menggunakan magnet permanen (Gambar 2.3 mengilustrasikan desain asli dari paten). Semua kutub utara magnet mengarah ke luar radial, sehingga torsi dipindahkan antara poros oleh tolakan dari kutub identik dari magnet. Bila torsi maksimum terlampaui dalam desain ini, maka *gear* akan slip dan menyebabkan salah satu magnet permanen pecah, selama permanen magnet masih melakukan kontak. Dengan demikian desain ini tidak sesuai bila diperlukan proteksi *overload*. Pemanfaatan magnet permanen dalam desain tipe spur yang lemah membuat desain tidak praktis. (H.T. Faus, 1941)



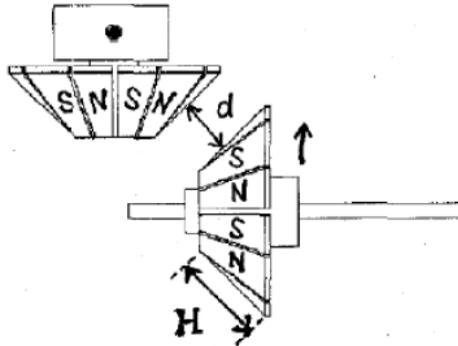
Gambar 2. 3 Permanen magnet spur gear (H.T. Faus, 1941)

Pada tahun 1970 Rand mengeluarkan sebuah paten untuk peralatan magnetik tipe spur sederhana. Dia merancang permanen magnet sehingga kedua kutub utara dan selatan menghadap secara radial ke arah luar (lihat Gambar 2.4 a). Hal ini meningkatkan jumlah bahan magnetik yang dibutuhkan dan biaya pembuatan. (Rand, 1970). Pada tahun 1972, Laing mengeluarkan sebuah paten untuk peralatan magnetik dengan modulator fluks di antara rotor permanen (lihat Gambar 2.4 b). Pada tahun 1973 Laing mengeluarkan paten lain, paten ini menggambarkan peralatan magnetik yang dimasukkan ke dalam pompa sentrifugal. Keuntungan menggunakan *magnetic gear* pada pompa adalah dua poros berputar yang memindahkan torsi tanpa kontak fisik, sehingga pompa bisa disegel. (Laing, 1972)



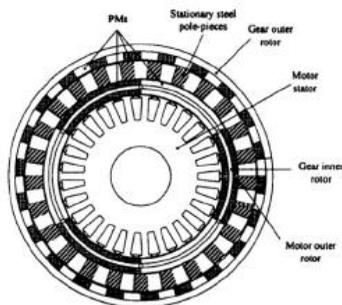
Gambar 2. 4 a) Spur *magnetic gear* dengan magnet U. (Rand, 1970) b) Coaxial magnet gear (Laing, 1972)

Pada tahun 1996 sebuah paper diterbitkan dimana *magnetic gear* tegak lurus dirancang, dibangun dan dievaluasi eksperimental (ilustrasi dari *gear* yang diusulkan dapat dilihat pada Gambar 2.5). paper ini menggambarkan jarak pemisahan kritis (d pada Gambar 2.5) di mana jika panjang celah udara lebih kecil dari pada jarak kritis, torsi yang ditransmisikan dapat ditingkatkan dengan meningkatkan jumlah kutub. (Y. D. Yao, dkk 1996)



Gambar 2. 5 Perpendicular magnetic gear (Y. D. Yao, dkk 1996)

Chau dan rekannya. menerbitkan sebuah paper, tentang desain terpadu baru pada tahun 2007. paper ini menggambarkan motor DC brushless PM yang diintegrasikan ke dalam *magnetic gear* koaksial (lihat Gambar 2.6). Sistem gabungan tersebut menawarkan kemampuan kecepatan rendah untuk *magnetic gear* dan membutuhkan kecepatan tinggi untuk desain motor kompak, yang mana membuat sistem gabungan memiliki torsi densitas yang tinggi dan efisiensi tinggi pada kecepatan yang relatif rendah. Mesin tersebut diusulkan untuk kendaraan listrik. (Chau dan rekannya, 2007)



Gambar 2. 6 *Magnetic geared permanent magnetic machine* (Chau dan rekannya, 2007)

Pada tahun 2009 Jian et al. mengusulkan konfigurasi yang sama untuk digunakan dalam aplikasi turbin angin. Sistem gabungan tersebut sangat ideal untuk pembangkit tenaga angin. Mesin yang diusulkan *planetary geared permanent magnet brushless machines* kemudian dibandingkan dengan sistem penggerak mekanik dengan spesifikasi listrik yang serupa. Topologi (desain) yang diusulkan berukuran lebih kecil dan bobotnya lebih ringan, dengan biaya bahan yang lebih rendah daripada sistem penggerak mekanik.

Dari sejarah ringkas mengenai *magnetic gear* diatas dapat diamati bahwa *gear* ini sangat serba guna, *magnetic gear* pada dasarnya dapat dikonfigurasi dalam pengaturan apa pun selayaknya *mechanical gear*. Namun, *magnetic gear* menawarkan keuntungan yang signifikan dibandingkan dengan *mechanical gear*. Pada dasarnya, *mechanical gear* mentransfer torsi hanya melalui satu sampai tiga gigi dari *gear* pada saat tertentu, sedangkan *magnetic gear* dapat mentransfer torsi dengan semua magnet permanen mereka pada waktu tertentu. *Magnetic gear* dapat menempati volume yang lebih kecil dan masih mentransfer jumlah daya yang sama bila dibandingkan dengan *mechanical gear*. (Sadra Mousavi, 2015)

Adapun keuntungan lainnya dari *magnetic gear*, antara lain:

- memiliki kemampuan mentrasfer daya tanpa kontak antar komponen
- memiliki rasio gear tinggi pada single stage
- dapat beroperasi tanpa perlu dilakukan pelumasan
- memiliki proteksi overload
- torsi *density* tinggi
- berpotensi untuk efisiensi tinggi
- sedikit atau bahkan tanpa perlu perawatan

2.2 Magnet

Magnet adalah suatu obyek yang mempunyai suatu medan magnet. Magnet dapat dibuat dari bahan besi, baja, dan

campuran logam serta telah banyak dimanfaatkan untuk industri otomotif dan lainnya. Sebuah magnet terdiri atas magnet-magnet kecil yang memiliki arah yang sama (tersusun teratur), magnet-magnet kecil ini disebut magnet elementer. Pada logam yang bukan magnet, magnet elementernya mempunyai arah sembarangan (tidak teratur) sehingga efeknya saling meniadakan, yang mengakibatkan tidak adanya kutub-kutub magnet pada ujung logam. Setiap magnet memiliki dua kutub, yaitu: utara (N) dan selatan (S). Kutub magnet adalah daerah yang berada pada ujung-ujung magnet dengan kekuatan magnet yang paling besar berada pada kutub-kutubnya.

Magnet dapat menarik benda lain, beberapa benda bahkan tertarik lebih kuat dari yang lain, yaitu bahan logam. Namun tidak semua logam mempunyai daya tarik yang sama terhadap magnet. Besi dan baja adalah dua contoh materi yang mempunyai daya tarik yang tinggi oleh magnet. Sedangkan oksigen cair adalah contoh materi yang mempunyai daya tarik yang rendah oleh magnet. Satuan intensitas magnet menurut sistem metrik Satuan Internasional (SI) adalah Tesla dan SI unit untuk total fluks magnetik adalah weber ($1 \text{ weber/m}^2 = 1 \text{ tesla}$) yang mempengaruhi luasan satu meter persegi. (S. Sutomo, 2012)

2.3 Bagian-Bagian Magnet

Pada magnet terdapat beberapa bagian, antara lain:

a. Kutub Magnet

Bagian magnet yang mempunyai gaya tarik terbesar disebut kutub magnet. Magnet selalu mempunyai dua kutub. Hal ini dapat diketahui bila sebuah magnet batang dicelupkan ke dalam serbuk besi. Di bagian tengah (daerah netral) tidak ada serbuk besi yang melekat, sedangkan bagian ke ujung makin banyak serbuk besi yang melekat pada magnet.

Bagian yang banyak dilekati serbuk besi merupakan kutub magnet. Hal ini menandakan, gaya magnet yang paling besar berada di ujung-ujung

magnet. Kutub utara dan kutub selatan magnet setiap magnet, apapun bentuknya selalu mempunyai kutub utara dan selatan. Dengan mengamati magnet jarum yang berputar pada porosnya, misalnya kompas. Dalam keadaan diam, salah satu ujung magnet akan menunjukkan ke arah utara, sedangkan ujung yang lainnya menunjuk ke arah selatan. Ujung kompas yang menunjuk ke arah utara disebut kutub utara dan ujung magnet yang mengarah selatan disebut kutub selatan. (S. Sutomo, 2012)

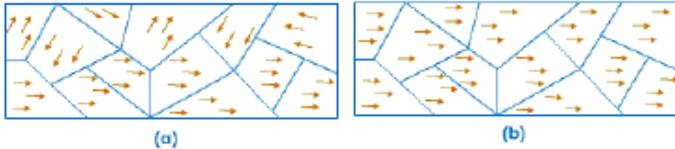
b. Magnet Elementer

Setiap benda magnetik pada dasarnya terdiri dari magnet-magnet kecil yang disebut magnet elementer. Magnet elementer adalah magnet yang paling kecil yang berupa atom. Suatu benda akan bersifat magnet jika magnet-magnet elementernya mempunyai arah yang cenderung sama/ beraturan dan benda tidak mempunyai sifat magnet jika magnet-magnet elementernya mempunyai arah acak (sembarang).

Pada sebuah magnet, magnet-magnet elementernya tersusun rapi dan menunjuk arah yang sama, sehingga menimbulkan kutub-kutub magnet. Antar magnet elementer tersebut terdapat gaya tolak-menolak dan gaya tarik-menarik. Akan tetapi, di bagian ujung magnet hanya terdapat gaya tolak-menolak. Itulah sebabnya pada ujung-ujung magnet terdapat gaya magnet paling kuat sedangkan bagian tengahnya lemah.

Pada benda bukan magnet, magnet-magnet elementernya tersusun dengan arah yang berlainan atau arah yang acak sehingga tidak menimbulkan kutub magnet. Karena arahnya acak, gaya tarik-menarik dan tolak-menolak antar magnet elementer saling

meniadakan. Itulah sebabnya pada besi bukan magnet tidak terdapat gaya magnet. (S. Sutomo, 2012)



Gambar 2. 7 (a) Susunan magnet elementer besi/baja sebelum menjadi magnet. (b) Susunan magnet elementer besi/baja sesudah menjadi magnet. (S. Sutomo, 2012)

2.4 Medan Magnet

Jika arus dialirkan pada suatu kumparan elektromagnetik, maka akan timbul medan magnet di sekitarnya. Medan magnet (H) adalah pengaruh yang dihasilkan oleh suatu sumber medan magnet (arus listrik) di suatu ruang dimana nilai H dipengaruhi oleh arus listrik dan panjang kumparan. Sehingga jika terdapat belitan panjang l maka kekuatan magnet yang dihasilkan adalah:

$$H = \frac{N.I}{l} \quad (2.1)$$

Dimana:

H	:	Kuat medan magnet (a/m)
N	:	Jumlah lilitan
I	:	Arus (ampere)
l	:	panjang kumparan/lilitan (m)

Sedangkan induksi magnet adalah pengaruh dari suatu ruang yang menghasilkan suatu gaya terhadap sebuah sumber arus di ruang itu. Jadi B dihitung dengan menghitung gaya yang dialami suatu sumber arus di suatu ruang.

Apabila dibuat suatu bentuk arus, maka arus tersebut akan menimbulkan medan magnet dengan kekuatan tertentu (H). Apabila medan magnet tersebut berada pada suatu ruang maka akan menyebabkan induksi magnet pada benda/medium di ruang

tersebut dimana induksi tersebut merupakan medan yang terdiri dari garis-garis fluks magnetik imajiner.

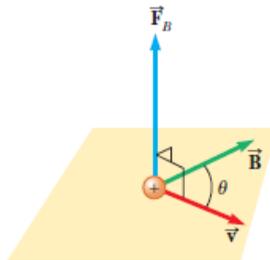
Fluks magnetik adalah jumlah medan magnetik (garis gaya magnet) yang dihasilkan sumber magnetik, dilambangkan dengan Φ (phi) dengan satuan weber (Wb). Kerapatan fluks magnet adalah jumlah total fluks yang menembus area yang tegak lurus dengan fluks tersebut. Hubungan antara fluks magnetik (Φ) dan kerapatan fluks magnetik ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.2)$$

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

Ketika sebuah partikel (proton atau elektron) bermuatan listrik yang bergerak melewati sebuah medan magnet, akan timbul sebuah gaya yang dirasakan oleh muatan itu. Gaya ini biasa disebut dengan gaya magnet. Gaya magnet merupakan besaran vektor, yaitu besaran yang memiliki nilai dan arah. Hubungan gaya magnet F (newton), fluks medan magnet B (Tesla), dan muatan listrik q (coulombs) dapat dilihat pada rumus dibawah ini:

$$F = qv \times B \quad (2.3)$$



Gambar 2. 8 Vektor gaya magnet (S. Sutomo, 2012)

Besar dari gaya magnet adalah:

$$|F| = qvB \sin \theta \quad (2.4)$$

Dimana v (m/s) adalah vektor kecepatan dari partikel. Arah gaya magnet akan selalu tegak lurus dengan medan magnet maupun arah gerak partikelnya. (S. Sutomo, 2012)

2.4.1 Permeabilitas magnet

Permeabilitas adalah perbandingan antara B dan H tersebut. Dari perbandingan tersebut didapatkan nilai permeabilitas dengan dimensi (volt second)/(amp meter), satuan ini dikenal juga sebagai (henry/m). Untuk udara dan bahan non magnetik, permeabilitas dinyatakan sebagai permeabilitas ruang kosong/ruang hampa dimana nilai permeabilitasnya adalah $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$. Hubungan keduanya:

$$B = \mu_0 H \quad (2.5)$$

Diatas dikatakan bahwa penyebab induksi magnet adalah medan magnet, selain itu ada penyebab lain induksi magnet yaitu magnetisasi. Magnetisasi adalah medan magnet yang berasal dari benda itu sendiri. Magnetisasi ini terjadi karena sebuah benda/medium yang memiliki kemampuan untuk menjadi magnet ditaruh di suatu medan magnet luar. Karena pengaruh luar, momen magnet benda itu (kumpulan atom-atomnya) melakukan suatu peyejajaran, akibatnya saat medan magnet dihilangkan benda itu sudah memiliki sifat kemagnetan sendiri.

Perbandingan antara magnetisasi ini dan medan penyebabnya yaitu medan magnet dinamakan suseptibilitas yang diberi simbol χ . Magnetisasi ini sering diberi simbol M . Tentu saja udara hampa tidak memiliki magnetisasi karena dia tidak bisa menyimpan sifat magnet.

$$M = \chi H \quad (2.6)$$

Selain permeabilitas dan suseptibilitas, juga dikenal permeabilitas relatif. Permeabilitas relatif ini adalah perbandingan nilai permeabilitas di suatu medium dengan nilainya di ruang hampa. Konsep ini diberi simbol μ_r . (C. Auditia, 2017)

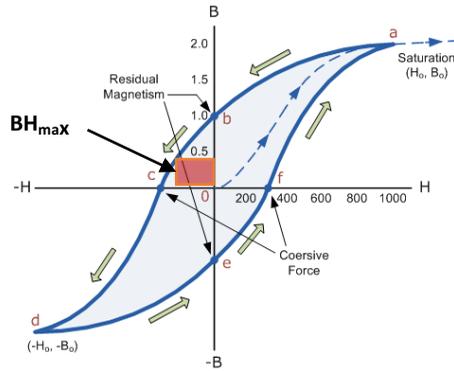
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (2.7)$$

2.4.2 Histerisis Magnet

Telah dijelaskan diatas bahwa selain medan magnet terdapat penyebab lain dari induksi magnet yaitu magnetisasi, dimana suatu bahan/ benda tersebut memiliki medan magnet sendiri.

Jika arus dialirkan pada suatu kumparan elektromagnetik, maka akan timbul medan magnet di sekitarnya, ketika arus dinaikkan maka medan magnet yang timbul akan meningkat sampai titik konstan, hal ini menandakan bahwa inti feromagnetik telah mencapai titik jenuhnya dan kerapatan fluks mencapai maksimal. Jika arus dihentikan fluks magnet tidak sepenuhnya hilang karena bahan inti elektromagnetik masih mempertahankan sifat kemagnetan.

Kemampuan untuk mempertahankan sifat magnet setelah arus dihentikan disebut *retentivity*, sedangkan jumlah fluks magnetik yang masih ada disebut *Magnetisme Residual*. Ketika fluks telah mencapai maksimal (jenuh) dan arus di turunkan maka akan terjadi pelebaran nilai H_c (*Coersive Force*). Sifat *retentivity*, *Magnetisme Residual* dan *Coersive Force* dijelaskan pada kurva histerisis yang ditunjukkan pada Gambar 2.9. (Taufik, 2012)



Gambar 2. 9 Kurva Histerisis (Taufik, 2012)

Bahan ferromagnetik mula-mula memiliki magnetisasi nol pada daerah yang bebas medan magnetik, bila bahan mendapat pengaruh medan magnetik (H) maka bahan akan memperoleh magnetisasi (B) yang besar. Jika H diperbesar maka akan makin besar pula magnetisasi B hingga sampai ke titik saturasi S . Apabila kurva magnetisasi dilanjutkan dengan mengurangi besar medan magnetik H hingga titik nol, magnetisasi B akan turun namun tidak kembali menjadi nol. Turunnya B akan membentuk kurva baru menuju titik B_r (*Ramenan Induction*) yaitu suatu kondisi dimana bahan tetap memiliki induksi magnet/magnetisasi meskipun medan magnet dari luar telah ditiadakan. Titik B_r disebut sebagai kerapatan fluk remanensi atau remanensi bahan yaitu besarnya rapat fluk magnetik B yang tertinggal pada bahan pada saat medan magnet H sama dengan nol.

Untuk menghilangkan remanensi tersebut yaitu menurunkan nilai B hingga ke titik nol, maka bahan diberikan medan magnet H bernilai negatif. Lalu akan terbentuk kurva menuju titik H_c (*coersive force*) dengan nilai negatif. Titik H_c ini disebut sebagai gaya koersif atau koersivitas bahan yaitu besarnya medan magnet atau

intensitas H yang diperlukan untuk mengembalikan rapat fluks magnetik menjadi nol.

Apabila siklus ini diteruskan maka akan didapat kurva dengan bentuk simetris yang dikenal dengan fenomena histeresis seperti pada gambar 2.9 di atas. Dari kurva histeresis dapat diketahui besarnya koersivitas bahan H_c , remanensi bahan B_r dan permeabilitas bahan μ yang besaran-besaran tersebut menentukan sifat dan karakteristik kemagnetan suatu bahan.

Bahan feromagnetik memiliki *retentivity* tinggi (*hard magnetic material*) sangat baik untuk memproduksi magnet permanen. Sehingga salah satu ciri bahan magnet yang kuat yaitu memiliki nilai BH_{\max} (*energy product*) yang tinggi. BH_{\max} digambarkan sebagai persegi terluas yang bisa dibuat pada kuadran II kurva histeresis dengan satuan MGOe atau KJ/m^3 . Sedangkan bahan non feromagnetik yang memiliki *retentivity* rendah (*soft magnetic material*) ideal untuk digunakan dalam elektromagnet, solenoida atau relay. (Taufik, 2012)

2.5 Macam-macam Magnet permanen

Magnet permanen adalah suatu bahan yang dapat menghasilkan medan magnet yang besarnya tetap tanpa adanya pengaruh dari luar atau disebut magnet alam karena memiliki sifat kemagnetan yang tetap. Magnet ini dapat dihasilkan oleh alam atau dapat dibuat dari bahan feromagnetik (bahan yang memiliki respon yang kuat terhadap medan magnet). Magnet permanen dibuat orang dalam berbagai bentuk dan dapat dibedakan menurut bentuknya, berikut beberapa contoh magnet permanen:

1. *Neodymium Magnets*

Magnet *neodymium*, merupakan magnet permanen yang paling kuat. Magnet *neodymium* (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet Neo), merupakan jenis magnet bumi yang langka, terbuat dari campuran logam

Neodymium (Nd), Boron (B), Dysprosium (Dy), Gallium (Ga). Tetragonal $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ memiliki struktur kristal yang sangat tinggi uniaksial anisotropi magnetocrystalline ($H_A \sim 7$ teslas). Senyawa ini memberikan potensi untuk memiliki koersivitas yang tinggi (yaitu, ketahanan mengalami kerusakan magnetik).

Sinter $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ cenderung rentan terhadap korosi. Secara khusus, korosi sekecil apapun dapat menyebabkan kerusakan magnet sinter. 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. Contoh magnet *neodymium* dapat di lihat pada gambar 2.10. (S. Sutomo, 2012)

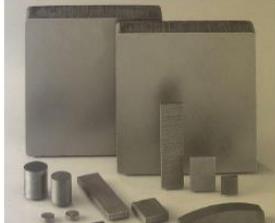


Gambar 2. 10 *Neodymium Magnet* (S. Sutomo, 2012)

2. *Samarium-Cobalt Magnets (SmCo)*

Magnet Samarium-Cobalt adalah salah satu dari dua jenis magnet bumi yang langka, merupakan magnet permanen yang kuat yang terbuat dari paduan samarium dan kobalt. Magnet ini dikembangkan pada awal tahun 1970. Magnet Samarium-Cobalt umumnya-terkuat kedua dari jenis magnet permanen, Sifat magnetik tinggi dan memiliki karakteristik suhu yang sangat baik. Magnet ini juga lebih mahal dari bahan magnet lainnya, rapuh, dan rawan terhadap retak dan *chipping*. Jenis magnet ini dapat

ditemukan di dalam alat-alat elektronik seperti VCD, DVD, VCR Player, Handphone, dan lain-lain. Contoh magnet SmCo dapat di lihat pada gambar 2.11.(S. Sutomo, 2012)



Gambar 2. 11 *Samarium-Cobalt Magnets* (S. Sutomo, 2012)

3. Alnico

Alnico adalah salah satu magnet komersial tertua yang ada dan telah dikembangkan dari versi sebelumnya dari baja magnetik. Komposisi dari magnet ini adalah Aluminium (Al), Nikel (Ni) dan Cobalt (Co). Meskipun memiliki induksi sisa yang tinggi, nilai magnetiknya relatif rendah karena mudahnya mengalami demagnetisasi. Namun, tahan terhadap panas dan memiliki mekanik yang baik. Contoh magnet alnico dapat di lihat pada gambar 2.12. (S. Sutomo, 2012)



Gambar 2. 12 Alnico magnet (S. Sutomo, 2012)

Sadra Mousavi (2015), telah membandingkan *magnetic gear* dengan menggunakan tipe magnet yang berbeda-beda yang hasilnya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. 1 perbandingan torsi *magnetic gear* dengan tipe magnet berbeda (S.Mousavi, 2015)

Magnetic gear	Steady state analysis at 330/60 min ⁻¹	Static analysis outer rotor rotates at 60 min ⁻¹
Surface mounted MG using NdFeB	97.09/17.6 N.m	283.07/51.46 N.m
Surface mounted MG using SmCo	77.49/14.08 N.m	228.03/41.46 N.m
Surface mounted MG using Alnico	10.15/1.86 N.m	47.14/8.5 N.m

Dari tabel diatas terlihat bahwa alnico adalah magnet bumi langka paling lemah dan NdFeB adalah yang terkuat. Setelah beberapa penelitian tentang harga magnet di pasar dunia, diketahui bahwa harga Alnico adalah 20 \$ / Kg, harga SmCo adalah 70 \$ / Kg dan harga NdFeB 35 \$ / Kg (Tabel 2.2).

Tabel 2. 2 Perbandingan biaya relatif magnet (S. Mousavi, 2015)

Type	BH _{max}	\$/kg	\$/BH _{max}
Alnico 9	5	20	4
SmCo	25	70	2.8
NdFeB	40	35	088

SmCo adalah jenis magnet yang mahal dan tidak sekuat NdFeB, sehingga menurut informasi pada Tabel 2.2 NdFeB adalah jenis magnet yang paling ekonomis. Oleh karena itu, lebih baik menggunakan Neodymium dalam mendesain *magnetic gear* karena selain kuat harganya juga lebih ekonomis. (Sadra Mousavi, 2015)

2.6 Sifat Kemagnetan Bahan

Berdasarkan sifat material magnetiknya, material magnetik dapat dikelompokkan dalam tiga kelompok utama :

- Diamagnetik : diamagnetik adalah bahan yang mempunyai nilai suseptibilitas kecil dan bernilai negatif. Karena nilainya negatif maka berarti magnetisasi yang dihasilkan oleh bahan ini akan melawan arah dari medan luar. Akibatnya tentu saja bahan diamagnetik ini akan selalu ditolak oleh magnet. Contoh dari diamagnetik adalah perak, emas, dan bismut.
- Paramagnetik : paramagnet adalah grup lain bahan magnet yang memiliki nilai suseptibilitas kecil dan positif, biasanya bernilai dari 10^{-3} sampai 10. contoh dari suseptibilitas ini adalah aluminium, mangan dan platinum.
- Ferromagnetik : bahan ini adalah jenis bahan yang paling umum dimiliki oleh bahan magnet. Nilai suseptibilitasnya berkisar dari 50 sampai 10000. Contoh material ini adalah besi, kobalt, dan nikel.

Satu hal yang menarik mengenai bahan diamagnetik dan paramagnetik adalah mereka hanya mengikuti sifat kesetaraan magnetisasi pada suhu rendah. Kata lainnya mereka memiliki suseptibilitas tetap hanya pada temperatur rendah. Pada temperatur tinggi hubungan suseptibilitas diatas sudah tidak berlaku lagi, suseptibilitasnya tidak konstan pada temperatur tinggi. (C. Auditia, 2017)

Setiap bahan magnet memiliki temperatur maksimum dimana diatas temperatur tersebut setiap bahan magnet akan kehilangan sifat kemagnetannya. Temperatur tersebut dinamakan temperatur Curie. Temperature Curie untuk permanen magnet dapat dilihat ditabel berikut.

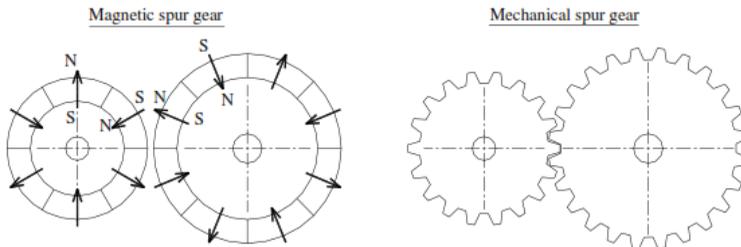
Tabel 2. 3 Temperature Curie Permanen magnet

Magnet Permanen	Temperatur Curie
NdFeB	310°C
SmCo	700-850°C
Alnico	450-550°C

2.7 Dasar *Magnetic* dan *Mechanical Gear*

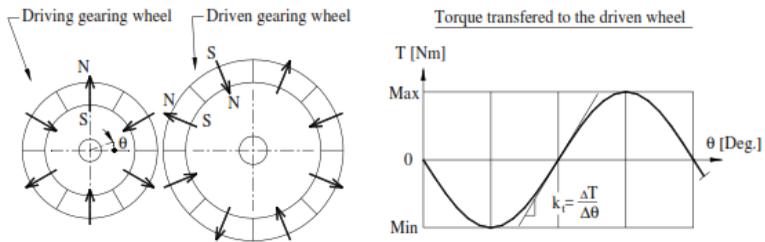
Gear dapat didefinisikan sebagai suatu mekanisme untuk mentransfer torsi dari satu poros ke poros lainnya dengan menggunakan magnet atau gigi mekanis. Beberapa *mechanical gear* memiliki bentuk yang sama dengan *magnetic gear* sebagai contoh yaitu *magnetic spur gear*. Kesamaan pada kedua tipe gear tersebut ditunjukkan pada gambar berikut:

Gambar 2. 13 *Magnetic spur gear* dengan magnet permanen



dan *mechanical spur gear* (F.T. Jorgensen, 2010)

Mechanical gear pada umumnya menggunakan gigi-gigi dari material baja untuk mentransfer torsi. Gigi pada gear saling bersentuhan satu sama lain dalam proses mentransfer torsi, hal tersebut dapat menyebabkan keausan pada kedua gigi dari gear tersebut. Sedangkan pada *magnetic gear* tidak mengalami keausan, karena tidak terjadi kontak antara kedua gear. Magnet permanen pada gear mentransfer torsi melalui celah (*air gap*) antara keduanya. Selama *magnetic gear* tidak mengalami kontak, maka akan terjadi efek pegas torsi fiktif diantara kedua roda tersebut. Efek pegas dapat dijelaskan dengan mengilustrasikan satu roda diam dan satu roda yang diputar dengan sudut kecil. Kemudian akan terjadi interaksi torsi diantara gear, yang besarnya tergantung dari perpindahan sudut pada roda penggerak. Fenomena tersebut diilustrasikan pada gambar 2.14 dimana *magnetic gear* terdiri dari gear penggerak dan gear yang digerakkan.



Gambar 2. 14 *Magnetic gear* dan diagram torsi, dimana menunjukkan hubungan antara torsi dengan sudut putar pada roda gear penggerak. (F.T. Jorgensen, 2010)

Sebuah *magnetic gear* memiliki batas torsi T_{\max} dimana *gear* mencapai torsi maksimal. Jika torsi yang diberikan melebihi batas maksimal, maka akan terjadi masalah dikarenakan akan terjadi slip. Masalah slip tidak bisa diabaikan dalam berbagai aplikasi peralatan yang menggunakan *gear*. *Magnetic gear* harus dioperasikan dibawah batas torsi maksimalnya. Torsi yang terbatas dapat memberikan keuntungan seperti halnya pada peralatan atau mesin dimana sistem penggeraknya diproteksi dengan batas torsi tersebut.

Torque density adalah sebuah kriteria unjuk kerja yang biasa digunakan pada mesin-mesin listrik dimana torsi dibagi dengan volume rotor atau torsi dibagi dengan volume total. Kriteria ini dapat diaplikasikan untuk *magnetic gear*. Sebuah *magnetic gear* dengan magnet permanen memiliki volume rotor tertentu. Perbandingan antara volume tersebut dengan torsi maksimum yang ditransmisikan biasa disebut dengan *active torque density*. Persamaan untuk *active torque density* adalah sebagai berikut:

$$\rho_A = \frac{T_{\max}}{V_A} \quad (2.8)$$

dimana ρ_A : *active torque density* (Nm/m³)
 T_{\max} : torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)
 V_A : volume rotor (m³)

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

$$\rho_T = \frac{T_{max}}{V_T} \quad (2.9)$$

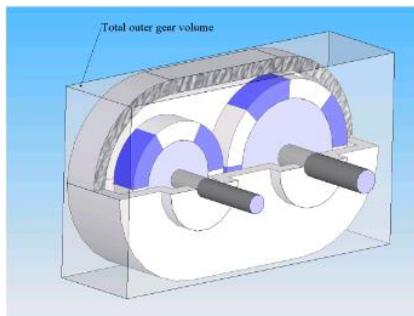
dimana ρ_T : *total torque density* (Nm/m³)
 T_{max} : torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)
 V_T : volume total (m³)

Sedangkan untuk *mechanical gear* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\rho_T = \frac{T_{nom}}{V_T} \quad (2.10)$$

dimana ρ_T : *total torque density* (Nm/m³)
 T_{nom} : *rated nominal torque* (Nm)
 V_T : volume total (m³)

Volume total (V_T) adalah volume total *gear* terluar. Karena bentuk dari *gearbox* bermacam-macam, perhitungan untuk V_T menjadi lebih rumit. Maka dari itu, perhitungan volume total menggunakan pendekatan dimana volume total adalah volume sekitar *gearbox* kecuali as roda gigi. Gambar 2.6 *Total Outer Gear Volume* adalah ilustrasi sederhana dari V_T . (F.T. Jorgensen, 2010)



Gambar 2. 15 gambar volume total gear terluar V_T (F.T. Jorgensen, 2010)

Berikut perbandingan kelebihan dan kelemahan dari magnetik gear dengan mechanical gear yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini:

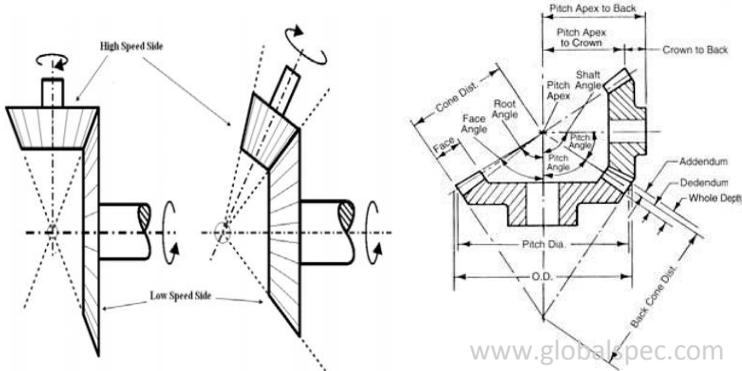
Tabel 2. 4 Perbandingan magnetic gear dan mechanical gear (Wang, 2015)

No	Magnetic Gear	Mechanical Gear
1	(+) Tidak terjadi kontak antar <i>gear</i> , sehingga tidak membutuhkan pelumasan, tidak ada gesekan sehingga tidak terjadi keausan, dan meminimalkan perawatan.	(-) Terjadi kontak antar <i>gear</i> , sehingga membutuhkan pelumasan, ada gesekan sehingga memungkinkan terjadinya keausan, dan membutuhkan perawatan.
2	(+) Menghasilkan getaran dan suara yang relatif kecil	(-) Menghasilkan getaran dan suara yang cukup besar
3	(+) Menghasilkan gerak yang halus sehingga tidak terjadi <i>backlash</i> (<i>zero backlash</i>)	(-) Menghasilkan gerak yang kurang halus sehingga terjadi <i>backlash</i>
4	(+) Ketika terjadi slip tidak akan merusak sistem	(-) Ketika terjadi slip dapat merusak sistem
5	(+) Proses manufaktur lebih mudah	(-) Proses manufaktur sulit
7	(-) Mahal	(+) Murah
8	(-) Bahan baku agak susah didapat	(+) Bahan baku lebih mudah didapat

2.8 Pengetahuan Tentang *Bevel gear*

Pada *bevel gear*, sumbu dua poros saling berpotongan dan permukaan bantalan gigi berbentuk kerucut. *Bevel gear* secara

konvensional dipasang pada poros yang dipindahkan 90° seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.16. *Gear* tersebut dapat dirancang untuk bekerja pada sudut lain seperti ditunjukkan pada Gambar 2.16.



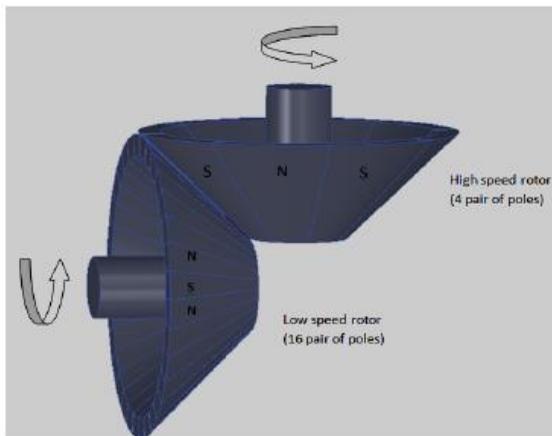
Gambar 2. 16 Perpendicular *bevel gear* dan *bevel gear* untuk beberapa sudut (G. Muruganandam et al., 2013)

Bevel gear digunakan di banyak aplikasi seperti sebagai penggerak di pabrik tekstil, kincir angin dan untuk membuka dan menutup bak bendungan pembangkit listrik tenaga air. Namun, perlu perawatan rutin untuk menghindari korosi dan keausan sistem. Oleh karena itu, *magnetic gear* memainkan peran penting dalam memperbaiki kekurangan ini. Bantalan gigi bisa diganti dengan magnet permanen yang tersusun atas kutub utara dan selatan. Susunan kutub ditunjukkan pada Gambar 2.16 Jenis gigi ini dapat digunakan sebagai *magnetic gear* dimana rasio *gear* bergantung pada jumlah pasangan kutub. Jenis gigi magnetik ini tidak memerlukan perawatan apapun.

Beberapa keuntungan penting dari peralatan magnetik yaitu mengurangi tindak perawatan, keandalan yang meningkat, bebas pelumasan, efisiensi yang lebih tinggi daripada *gear* konvensional, memiliki perlindungan *overload*, tidak ada kontak fisik antara poros *input* dan *output*, kebisingan dan getaran rendah. Sedangkan pada *mechanical bevel gear* yang digunakan

dalam berbagai aplikasi mengalami masalah seperti penggantian oli gigi yang sering, masalah perawatan, berkurangnya umur *gear*, dan lain-lain. (G. Muruganandam et al., 2013)

Pada penelitian Y. D. Yao, dkk (1996), dilakukan pembuatan desain *magnetic miter bevel gear* yang ditunjukkan pada gambar 2.5. Didapatkan bahwa apabila panjang celah udara (H) lebih kecil dari jarak pemisah kritis (d), torsi yang ditransmisikan dapat ditingkatkan dengan meningkatkan jumlah kutub. Dari hasil tersebut dapat kita ketahui bahwa torsi dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti celah udara (*Air gap*) dan jumlah magnet. G. Muruganandam et al., (2012), melakukan penelitian mengenai penggunaan material permanen magnet yang berbeda pada desain *perpendicular gear (bevel gear)* yang ditunjukkan pada gambar 2.17. Desain yang dibuat terdiri dari 16 pasang kutub pada sisi rotor low speed (penggerak) dan 4 pasang kutub pada sisi high speed (sisi beban). Diameter rotor high speed dan rotor low speed dibuat sama pada desain yang mereka buat. Disebutkan bahwa besar torsi magnetik bergantung pada jumlah kutub magnet. Pada penelitiannya analisis torsi dilakukan dengan metode *finite elemen* menggunakan *software MagNet*. Tabel 2.5 menunjukkan dimensi magnetik *bevel gear* yang dibuat.



Gambar 2. 17 Magnetik bevel gear

Tabel 2. 5 Dimensi *bevel gear*

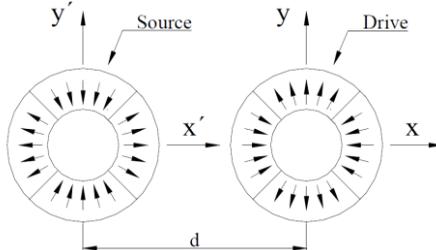
Description	Perpendicular Magnetic Gear
No of low speed rotor poles	16 pair
No of high speed rotor poles	4 pair
Outer radius of low speed rotor	240mm
Inner radius of low speed rotor	61mm
Outer radius of high speed rotor	240mm
Inner radius of high speed rotor	61mm
Length of rotor poles	100mm
Airgap length	3mm to 5mm
Permanent magnet material	NdFeB & SM_2CO_{17}
Permeability of air region μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A
Relative permeability of magnets $\mu_r = \mu/\mu_0$	1.0523

Tabel 2. 6 Hasil perbandingan torsi berdasarkan material magnet

Magnetic material		SM_2CO_{17}	
Air gap distance in mm	3	4	5
Torque in Nm	27.9	20.5	16.1
Magnetic material		NdFeB	
Air gap distance in mm	3	4	5
Torque in Nm	30.2	24.6	19.0

Hasil yang didapatkan dari penelitian tersebut yaitu desain topologi *magnetic gear* yang dibuat dengan menggunakan permanen magnet langka NdFeB & SM_2CO_{17} menghasilkan torsi *density* yang tinggi. Akan tetapi, material permanen magnet yang menghasilkan torsi *density* yang tertinggi yaitu magnet NdFeB (*Neodymium Iron Boron*). Dan didapatkan kesimpulan juga mengenai pengaruh *air gap* yaitu semakin jauh jarak *air gap* semakin turun torsi yang mampu ditransmisikan oleh desain *magnetic bevel gear* yang dibuat.

2.9 Perhitungan Torsi Magnetik



Gambar 2. 18 Sketsa *source* dan *drive* magnet untuk radial *magnetic gear* (F.T. Jorgensen, 2010)

Pada gambar 2.18 menunjukkan *source* magnet dan *drive* magnet yang mana digunakan dalam diskripsi teoritikal. Penjelasan teori tersebut dibagi menjadi dua bagian. Bagian pertama yaitu teori *Boundary Value Problem* (BVP) dimana digunakan untuk mendapatkan bidang ruang bebas pada *source* magnet. Pada bagian kedua perhitungan *drive* magnet diuraikan menjadi *current density* yang ekuivalen dan torsi dihitung dengan mempertimbangkan distribusi *current density* dibawah pengaruh medan eksternal dari *source* magnet.

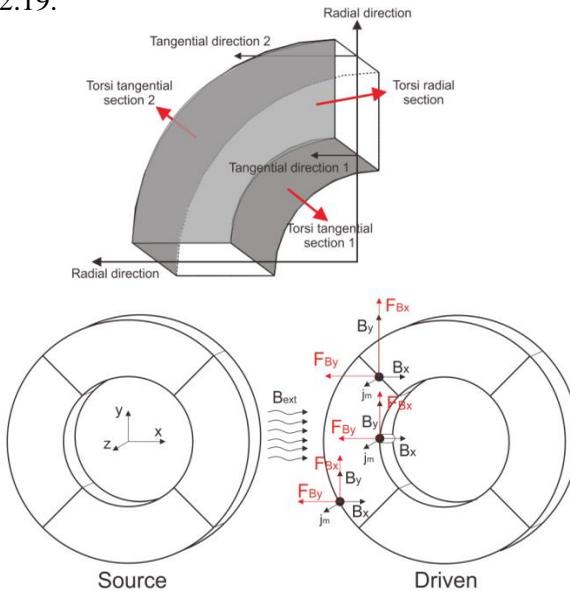
Bidang ruang bebas adalah subjek yang agak rumit, itulah sebabnya mengapa topik ini dijelaskan dibagian terpisah. Hasil penting dari bagian ini adalah untuk dapat menunjukkan fluks medan magnet B sebagai fungsi koordinat posisi. Penyelesaian bidang ruang bebas didefinisikan untuk *source* magnet, sedangkan *drive* magnet tidak memiliki pengaruh terhadap penyelesaian tersebut oleh karena itu permeabilitas relatif diasumsikan menjadi satu. Langkah terakhir dari penyelesaian tersebut yaitu mentransformasikan medan fluks magnetik B yang didefinisikan ke dalam sistem koordinat *drive* magnet, dimana torsi akan dihitung. *Drive* magnet kemudian diuraikan menjadi distribusi *current density* yang ekuivalen. *Current density* terdapat pada permukaan luar setiap kutub magnet di sisi *drive* magnet. Selama *current density* terjadi dipermukaan, maka dinyatakan dalam persatuan jarak pada permukaan. Pada bagian terakhir, torsi pada akhirnya akan dihitung dengan dilakukannya integrasi di sepanjang *drive* magnet. Integrasi torsi dilakukan dengan mempertimbangkan fluks medan magnet B dari *source* magnet dan *current density* dari *drive* magnet yang kemudian akan digunakan untuk menghitung torsi.

Untuk menentukan torsi pada *drive* magnet, hal pertama yang dilakukan adalah mengurai sistem menjadi distribusi yang seimbang antara *current densities* volume dan permukaan (J_m dan j_m). Persamaan torsi terdiri atas dua integral dimana V dan S secara berurutan adalah volume dan permukaan magnet. (F.T. Jorgensen, 2010)

$$T_d = \int_V r \times (J_m(r, \varnothing) \times B_{ext}) r dr d\varnothing dz + \int_S r \times (j_m \times B_{ext}) da \quad (2.11)$$

- dimana
- T_d : torsi pada drive (Nm)
 - r : vector jarak ke arah radial
 - J_m : *volume current density* (A/m²)
 - j_m : *surface current density* (A/m)
 - B_{ext} : *external flux density field* (Wb)

Current *density* yang terjadi pada inti/volume sangat kecil $J_m = \nabla \times M = 0$, maka integral volume yang pertama menjadi nol dan yang tersisa hanya hasil integral permukaan. Semua *current density* pada permukaan harus dilalui oleh B_{ext} dari *source magnet* untuk menciptakan torsi pada *drive magnet*. Perkalian *cross* tersebut dapat diilustrasikan dengan sketsa isometrik pada gambar 2.19.



Gambar 2. 19 Ilustrasi Perhitungan Torsi

Terdapat dua integrasi pada perhitungan torsi yaitu, integrasi permukaan radial dan integrasi permukaan tangensial. Integrasi radial dilakukan pada arah radial dari bidang permukaan magnet. Persamaan untuk torsi radial didapatkan dengan menggunakan metode integrasi Simpson. Berikut adalah persamaan torsi radial.

$$\text{Tr}(\emptyset) = \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right) L(R_2 - R_1)}{N_r} \sum_{p=0}^{N_d-1} \sum_{q=0}^{N_s} (-1)^p S_r(q) r(q) \times \left[\cos\left(\emptyset_{edge}(\emptyset, p) B_x^{ext}(r(q), \emptyset_{edge}(\emptyset, p))\right) \right] \quad (2.12)$$

dimana	$T_r(\emptyset)$	: torsi radial (Nm)
	M_s	: magnetisasi <i>source magnet</i> (A/m)
	N_s	: jumlah magnet pada <i>source magnet gear</i>
	N_d	: jumlah magnet pada <i>drive magnet gear</i>
	N_r	: <i>radial mesh coefficient</i>
	L	: panjang/tinggi magnet (m)
	R_1	: radius dalam <i>drive magnet</i> (m)
	R_2	: radius luar <i>drive magnet</i> (m)
	p	: jumlah kutub magnet
	q	: parameter dari integrasi
	$S_r(q)$	: parameter dari integrasi simpson
	\emptyset_{edge}	: sudut tertentu dari <i>drive magnet</i> (rad)
	\emptyset	: sudut putar <i>drive magnet</i> (rad)
	B_x^{ext}	: <i>x-direction external flux density field</i> (Wb)
	B_y^{ext}	: <i>y-direction external flux density field</i> (Wb)

Sedangkan untuk integrasi permukaan tangensial dilakukan pada dua permukaan radial. Untuk mendapatkan hasilnya digunakan metode integrasi Simpson. Berikut adalah persamaan torsi tangensial.

$$\begin{aligned}
& T_{t1}(\emptyset) \\
&= \frac{M_S L R_1^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}} \right)}{N_t} \sum_{p=0}^{N_d-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[\cos \left(\theta(q) \right. \right. \\
&+ p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset) B_x^{ext} \left(R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) \\
&+ \left. \left. \sin \left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) B_y^{ext} \left(R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) \right]
\end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}
& T_{t2}(\emptyset) \\
&= - \frac{M_S L R_2^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}} \right)}{N_t} \sum_{p=0}^{N_d-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[\cos \left(\theta(q) \right. \right. \\
&+ p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset) B_x^{ext} \left(R_2, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) \\
&+ \left. \left. \sin \left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) B_y^{ext} \left(R_2, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_d} + \emptyset \right) \right]
\end{aligned} \tag{2.14}$$

dimana	$T_t(\emptyset)$	: torsi tangensial (Nm)
	M_S	: magnetisasi <i>source magnet</i> (A/m)
	N_t	: parameter integrasi torsi
	N_d	: jumlah magnet pada <i>drive magnet gear</i>
	L	: panjang/tinggi magnet (m)
	R_1	: radius dalam <i>drive magnet</i> (m)
	R_2	: radius luar <i>drive magnet</i> (m)
	p	: jumlah kutub magnet
	q	: parameter dari integrasi
	$S_r(q)$	: parameter dari integrasi simpson
	θ	: sudut tertentu dari <i>drive magnet</i> (rad)
	\emptyset	: sudut putar <i>drive magnet</i> (rad)
	B_x^{ext}	: <i>x-direction external flux density field</i> (Wb)

B_y^{ext} : *y-direction external flux density field*
(Wb)

Persamaan total torsi dari *drive magnet* didapatkan dari penjumlahan dari integral permukaan. Berikut adalah persamaannya.

$$T(\emptyset) = T_r(\emptyset) + T_{t1}(\emptyset) + T_{t2}(\emptyset) \quad (2.15)$$

dimana $T(\emptyset)$: torsi total (Nm)
 $T_r(\emptyset)$: torsi radial (Nm)
 $T_{t1}(\emptyset)$: torsi tangensial dalam (Nm)
 $T_{t2}(\emptyset)$: torsi tangensial luar (Nm)

2.9.1 Perhitungan Drive Magnet Surface Current Density

Kesetimbangan *surface current density* adalah distribusi *current density* yang memberikan medan magnet yang sama seperti magnet permanen. Persamaan *current density* untuk permukaan luar dan dalam adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} j_m(p, r, \phi, \theta) &= M_S \sin(\theta) \hat{z} ; r = R_2 \\ j_m(p, r, \phi, \theta) &= -M_S \sin(\theta) \hat{z} ; r = R_1 \\ \phi - \frac{\pi}{N_d}(1 + 2p) &\leq \theta \leq \phi + \frac{\pi}{N_d}(1 + 2p) \end{aligned} \quad (2.16)$$

dimana j_m : *surface current density* (A/m²)
 M_S : magnetisasi *source magnet* (A/m)
 θ : sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)
 \hat{z} : vector jarak ke arah z

2.9.2 Perhitungan External Flux Density Field

Berikut adalah persamaan untuk B_x^{ext} dan B_y^{ext} pada *drive magnet* yang dihasilkan dari medan *source magnet*.

$$\begin{aligned} B_x^{ext}(r, \phi) &= \\ B_{r,r}^{ext}(r'(r, \phi), \phi'(r, \phi) \cos(\phi'(r, \phi))) &- \\ B_{\phi'}^{ext}(r'(r, \phi), \phi'(r, \phi) \sin(\phi'(r, \phi))) & \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned}
& B_y^{ext}(r, \phi) = \\
& B_{r'}^{ext}(r'(r, \phi), \phi'(r, \phi) \cos(\phi'(r, \phi))) - \\
& B_{\phi'}^{ext}(r'(r, \phi), \phi'(r, \phi) \sin(\phi'(r, \phi))) \quad (2.18)
\end{aligned}$$

Dimana B_x^{ext} : *x-direction external flux density field* (Wb)
 B_y^{ext} : *y-direction external flux density field* (Wb)
 $B_{r'}^{ext}$: *radial external flux density field* (Wb)
 $B_{\phi'}^{ext}$: *tangential external flux density field* (Wb)
 r' : transformasi radius ke koordinat *drive magnet*
 Φ' : transformasi tangensial ke koordinat *drive magnet*

2.9.3 Perhitungan Magnetisasi

Magnetisasi merupakan siklus momen dipole, yang mana momen dipole tersebut disebabkan atau muncul dikarenakan kutub utara dan selatan magnetik dipisahkan oleh jarak yang sangat kecil. Dalam kasus *magnetic gear* jarak tersebut dapat didefinisikan sebagai *air gap*. Jarak tersebut mempengaruhi besar fluks *density air gap* (Bg) yang terjadi, untuk mempermudah mengetahui pengaruh tersebut dilakukan simulasi menggunakan FEMM yang ditunjukkan pada gambar 2.20. Untuk magnetisasi sendiri terdapat pada arah radial dan tangensial. Berikut adalah persamaan untuk mendapatkan magnetisasi paralel. (F.T. Jorgensen, 2010)

$$M_s(r, \emptyset) = M_r \cdot \hat{r} + M_\emptyset \cdot \hat{\phi} \quad (2.19)$$

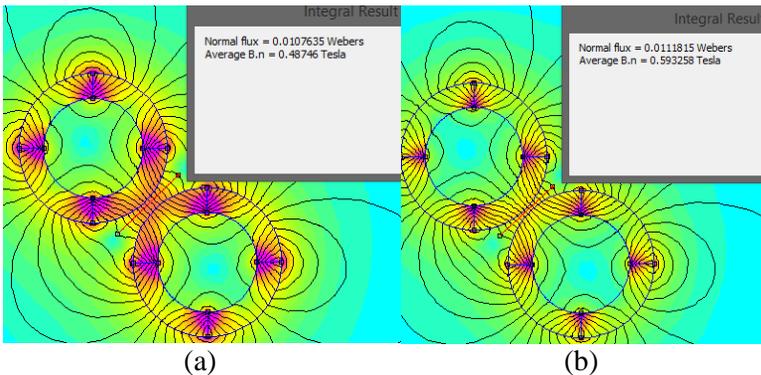
dimana M_r : magnetisasi arah radial (A/m)
 M_\emptyset : magnetisasi arah tangensial (A/m)

$$M_r(\phi) = \sum_{i=1,3,5}^{\infty} M_{ri} \cos\left(\frac{1}{2}iN_p\phi\right) \quad (2.20)$$

$$M_\phi(\phi) = \sum_{i=1,3,5}^{\infty} M_{\phi i} \sin\left(\frac{1}{2}iN_p\phi\right) \quad (2.21)$$

$$M_{ri} = \frac{B_r}{\mu_0\pi} \cdot \frac{2N_p}{1-\left(\frac{1}{2}iN_p\right)^2} \left[\sin\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}i\right) - \frac{1}{2}iN_p \cos\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}i\right) \right]$$

$$M_{\phi i} = \frac{B_r}{\mu_0\pi} \cdot \frac{2N_p}{1-\left(\frac{1}{2}iN_p\right)^2} \left[\cos\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}i\right) - \frac{1}{2}iN_p \sin\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}i\right) \right]$$



Gambar 2. 20 (a) fluks *density air gap* 5 mm (b) fluks *density air gap* 2 mm

Dari gambar 2.20 terlihat jelas pengaruh *air gap* terhadap fluks *density air gap* (B_g), yaitu apabila jarak celah semakin kecil nilai fluks *density air gap* semakin besar yang ditunjukkan pada gambar (b) untuk *air gap* 2 mm $B_g = 0,593258$ T sedangkan pada gambar (a) untuk *air gap* 5 mm $B_g = 0.48746$ T. Untuk rumus persamaan B_g dapat dilihat pada persamaan 2.23. (M. Kasim, dkk, 2011)

$$B_g = \frac{C\emptyset}{1 + \frac{\mu_r K_c K_{ml}}{PC}} B_r \quad (2.23)$$

Dimana : B_g = Fluks *density air gap* (T)
 $C\emptyset$ = Faktor kerapatan fluks
 K_c = koefisien permenace
 μ_r = relative permeability
 K_{ml} = koefisien magnet bocor
 B_r = remanensi kerapatan fluks

2.10 Penentuan Rasio gear

Rasio gear diturunkan oleh (Jorgensen et al., 2008; Jian et al., 2009) yang mencakup semua jenis operasi gigi magnetik dengan menentukan N_p dan N_L , jumlah pasangan kutub penggerak utama dan rotor beban masing-masing. Perbedaan besar antara pasangan kutub N_p dan N_L menghasilkan rasio gigi yang lebih tinggi.

$$G_r = \frac{\omega_p}{\omega_L} = -\frac{N_L}{N_p} \quad (2.24)$$

dimana ω_p adalah kecepatan putar rotor penggerak utama, ω_L adalah kecepatan putar rotor sisi beban, N_L adalah jumlah pasangan kutub pada rotor sisi beban dan jumlah N_p adalah jumlah pasangan kutub pada rotor sisi penggerak utama.

Tanda minus menunjukkan bahwa kedua rotor berputar berlawanan arah. Untuk mendapatkan rasio gigi yang lebih baik, komutasikan medan magnet di sisi kecepatan tinggi dengan sedikit kutub magnet permanen dan sisi kecepatan rendah dengan banyak kutub.

2.11 Software Analisis

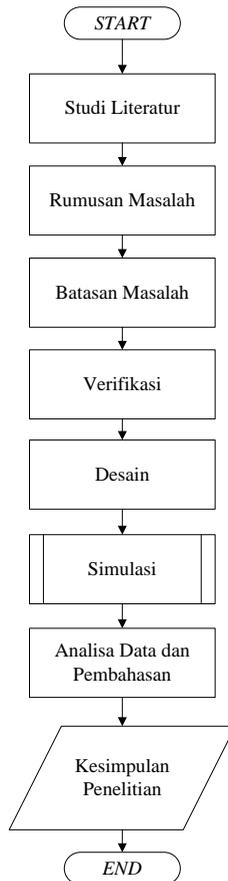
Finite element analysis (FEA) telah digunakan untuk mensimulasikan variasi pergerakan *gear* yang berbeda. *Maxwell* oleh *Ansoft*, digunakan dalam proyek ini. *Maxwell* menggunakan metode kerja virtual untuk menghitung torsi untuk benda bergerak dalam simulasi transiennya. *Ansoft maxwell* juga adalah 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.

(Halaman ini sengaja di kosongkan)

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 *Flowchart* Penelitian

Untuk menunjang penelitian ini, maka disusunlah *flowchart* yang berguna untuk mempermudah mengetahui urutan prosesnya.



Gambar 3. 1 *Flowchart* Penelitian

3.2 Penjelasan *Flowchart*

Pada bab ini akan dibahas metode penelitian yang digunakan, metode penelitian yang digunakan yaitu metode analisis finite element menggunakan piranti lunak *ANSYS Maxwell electromagnetic* untuk menganalisis torsi dari desain *magnetic gear*. Analisis menggunakan metode ini dilakukan dengan beberapa asumsi dan variasi yang akan dijelaskan pada variabel yang digunakan pada penelitian ini.

Secara umum, metodologi pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Studi literatur
Studi literatur dilakukan untuk mencari serta mempelajari beberapa literatur yang terkait dengan tema penelitian, seperti mengumpulkan informasi berupa artikel ilmiah, jurnal, *text book*, serta hasil penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya.
2. Rumusan Masalah
Berisi pertanyaan-pertanyaan yang akan dicari jawabannya melalui penelitian yang akan dilakukan.
3. Batasan Masalah
Meliputi ruang lingkup masalah atau upaya untuk membatasi ruang lingkup masalah yang terlalu luas atau lebar sehingga penelitian dapat lebih fokus pada tujuan yang akan dicapai.
4. Verifikasi
Pemeriksaan apakah program komputer simulasi yang digunakan berjalan dengan benar dan sesuai.
5. Simulasi
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi *air gap* dan jumlah magnet, serta menentukan desain terbaik berdasarkan torsi maksimum dari *magnetic bevel gear*. Pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*.

6. Pengolahan Data

Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan data- data yang diperlukan. Kemudian data tersebut akan diproses untuk di analisis dan setelah itu dapat ditarik kesimpulan dari hasil proses analisis untuk menjawab rumusan masalah yang sudah dibuat dalam penelitian ini.

3.3 Variable Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan beberapa variabel yang disebutkan pada subab variabel bebas, sementara variabel lain yang dijaga tetap ditunjukkan pada subab variabel terkontrol.

3.3.1 Variabel Bebas

1. Desain *magnetic bevel gear*

Akan dibuat tiga desain berbeda dengan menggunakan rasio dan parameter (dimensi magnet, dll) *gear* yang sama untuk mendapatkan torsi terbaik.

2. *Air gap* (celah udara)

Jarak *air gap* divariasikan masing-masing pada 3 nilai, yaitu 0,2 mm, 0,5 mm, 1 mm, 2 mm. Variasi tersebut dilakukan dengan cara menggeser *gear* penggerak sejauh nilai tersebut terhadap *gear* yang digerakkan.

3. Jumlah magnet

Jumlah magnet pada rotor *high speed* (HS) dan rotor *low speed* (LS yang digunakan divariasikan namun masih mengacu pada rasio *gear* yang digunakan.

Part	Jumlah magnet		
Rotor LS (yang digerakkan)	8	12	16
Rotor HS (penggerak)	4	6	8

3.3.2 Variable Terkontrol

1. Jumlah kutub magnet pada *magnetic gear*, yang ditentukan berdasarkan rasio gear yang digunakan yaitu 2:1.

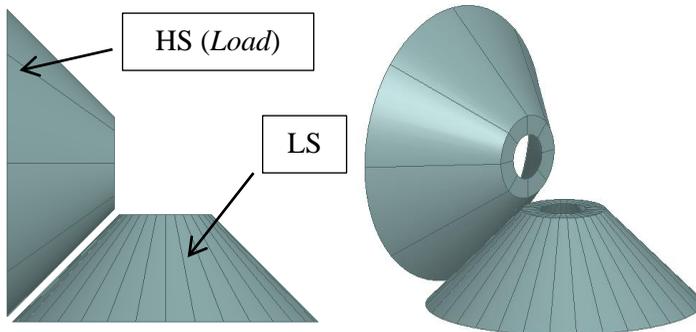
2. Magnet yang digunakan yaitu magnet NdFeB (N35).
3. Input kecepatan sudut pada *software ansys* yaitu sebesar 600 rpm.
4. Jenis *gear* yang dibuat yaitu *gear* tipe *bevel*/kerucut untuk sudut poros 90°.
5. Panjang magnet 50 mm, tebal magnet 10 mm, dan Lebar magnet mengikuti geometri *gear*.

3.4 Proses Verifikasi

Pada tahap ini dilakukan verifikasi software simulasi yang akan digunakan yaitu *Ansys Maxwell Electromagnetic*. Verifikasi dilakukan dengan cara membandingkan data hasil simulasi oleh muruganandam et al. (2012) menggunakan software MagNet, dengan data hasil simulasi menggunakan software *Ansys Maxwell Electromagnetic*. Verifikasi dikatakan sudah benar ketika hasil yang didapat menggunakan software Ansys mendapatkan nilai yang sama dengan hasil yang dilakukan oleh muruganandam et al. (2012) menggunakan software MagNet. Adapun data desain magnetic bevel gear yang akan digunakan sebagai obyek simulasi untuk melakukan verifikasi, yaitu ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Data objek simulasi

Description	Perpendicular Magnetic Gear
No of low speed rotor poles	16 pair
No of high speed rotor poles	4 pair
Outer radius of low speed rotor	240mm
Inner radius of low speed rotor	61mm
Outer radius of high speed rotor	240mm
Inner radius of high speed rotor	61mm
Length of rotor poles	100mm
Airgap length	3mm to 5mm
Permanent magnet material	NdFeB & SM_2CO_{17}
Permeability of air region μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}$ Tm/A
Relative permeability of magnets $\mu_r = \mu / \mu_0$	1.0523



Gambar 3. 2 Model obyek simulasi

Tabel 3. 2 Proses Verifikasi

No	Material magnet	Air gap	Software MagNet	Software Ansys maxwell	Verifikasi	
			T_{\max}	T_{\max}	Sesuai	Tidak sesuai
1	NdFeB	5	19.0			

3.5 Metode *Finite Elemen Analysis*

Penelitian ini menggunakan piranti lunak *Ansys Maxwell Electromagnetic* untuk melakukan analisis metode *finite elemen* dan untuk membuat model geometri digunakan piranti lunak *solidwork*. Secara umum, urutan kerja yang dilakukan pada penelitian ini dibagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap *pre-processing*, *processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

3.5.1 Tahap *Pre-processing*

Dalam menentukan dimensi magnetic *bevel gear* langkah awal yang dilakukan yaitu dengan menentukan rasio *gear* yang akan dibuat. Kemudian dengan menentukan rasio tersebut dapat ditentukan jumlah magnet dan diameter *gear* yang akan digunakan pada rotor kecepatan tinggi ataupun pada rotor kecepatan rendah. Hal-hal tersebut dapat ditentukan dengan

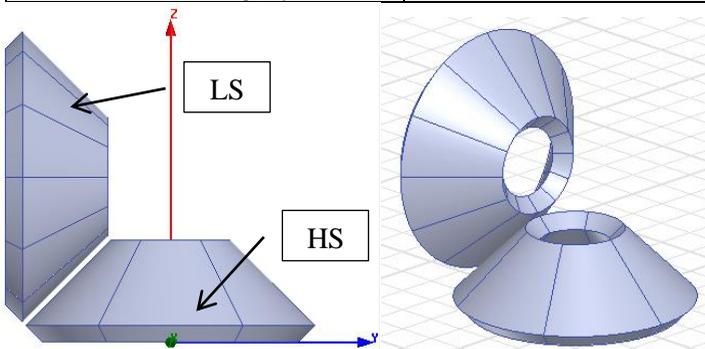
mengikuti persamaan 2.23 pada bab sebelumnya. Dalam penelitian ini akan dibuat 3 desain *bevel gear*. Dimensi tiap *bevel gear* secara keseluruhan dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

1. Desain 1

Rasio *gear* yang digunakan yaitu 2:1. Diameter rotor *high speed* (HS) dan diameter rotor *low speed* (LS) dibuat sama.

Tabel 3. 3 Dimensi Desain 1

Deskripsi	Dimensi
Jumlah kutub rotor LS	8, 12, 16
Jumlah kutub rotor HS	4, 6, 8
Jari-jari luar rotor LS	60 mm
Sudut kontak (<i>Pitch angle</i>) rotor LS	45°
Jari-jari luar rotor HS	60 mm
Sudut kontak (<i>Pitch angle</i>) rotor HS	45°
Panjang magnet	50 mm
Tebal magnet	10 mm
Jarak <i>air gap</i> (celah udara)	0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm
Material permanan magnet	NdFeB (N35)
Permeabilitas ruang μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A



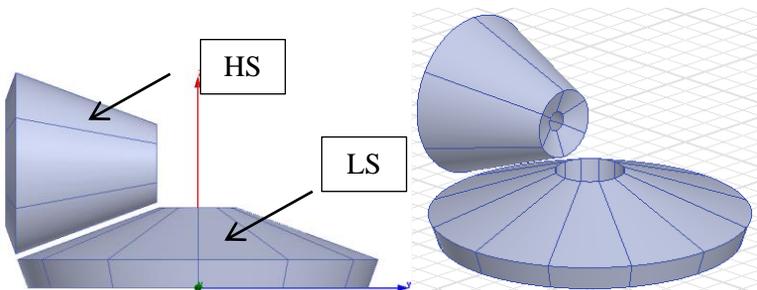
Gambar 3. 3 Design 1 solidwork

2. Desain 2

Dengan rasio yang sama yaitu 2:1, pada desain 2 ini diameter rotor *high speed* dan diameter *low speed* ikut di rasiokan.

Tabel 3. 4 Dimensi Desain 2

Deskripsi	Dimensi
Jumlah kutub rotor LS	8, 12, 16
Jumlah kutub rotor HS	4, 6, 8
Jari-jari luar rotor LS	60 mm
Sudut kontak (<i>Pitch angle</i>) rotor LS	70°
Jari-jari luar rotor HS	30 mm
Sudut kontak (<i>Pitch angle</i>) rotor HS	20°
Panjang magnet	50 mm
Tebal magnet	10 mm
Jarak <i>air gap</i> (celah udara)	0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm
Material permanan magnet	NdFeB (N35)
Permeabilitas ruang μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A



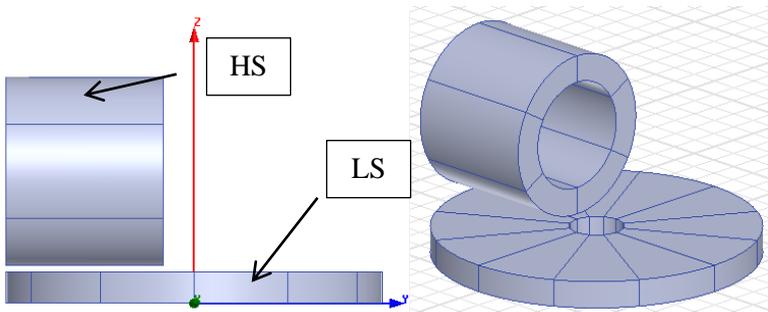
Gambar 3. 4 Design 2 solidwork

3. Desain 3

Pada desain ke tiga ini rasio yang digunakan sama dengan kedua desain sebelumnya yaitu 2:1. Diameter rotor *high speed* dan *low speed* juga ikut dirasioikan, yang membedakan adalah pada desain topologi yang dibuat akan tetapi tetap mengacu pada fungsi utamanya yaitu mentransmisikan torsi ke sudut 90° .

Tabel 3. 5 Dimensi Desain 3

Deskripsi	Dimensi
Jumlah kutub rotor LS	8, 12, 16
Jumlah kutub rotor HS	4, 6, 8
Jari-jari luar rotor LS	60 mm
Sudut kontak (<i>Pitch angle</i>) rotor LS	90°
Jari-jari luar rotor HS	30 mm
Sudut kontak (<i>Pitch angle</i>) rotor HS	0°
Panjang magnet	50 mm
Tebal magnet	10 mm
Jarak <i>air gap</i> (celah udara)	0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm
Material permanan magnet	NdFeB (N35)
Permeabilitas ruang μ_0	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A}$



Gambar 3. 5 Design 3 solidwork

3.5.2 Tahap Processing

a. Import model 3D

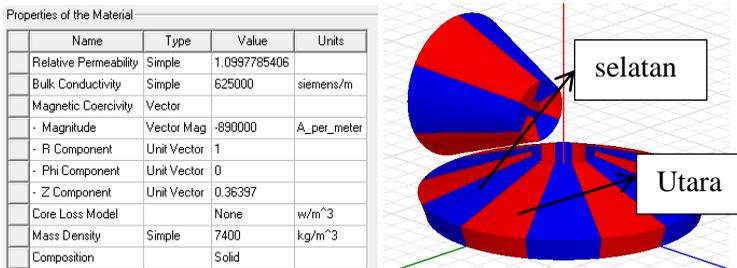
Setelah pembuatan model 3D *magnetic bevel gear* berdasarkan dimensi yang sudah ditentukan, dilakukan proses *import* model dari software *solidwork* ke *Ansys Maxwell* untuk memulai tahap *processing*.

b. Model solver

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik, meliputi pemilihan model *solver* yaitu *Magnetostatic analysis*. Analisis tersebut bertujuan untuk mendapatkan nilai panjang mesh yang sesuai agar simulasi yang dilakukan mencapai kriteria konvergen.

c. Material

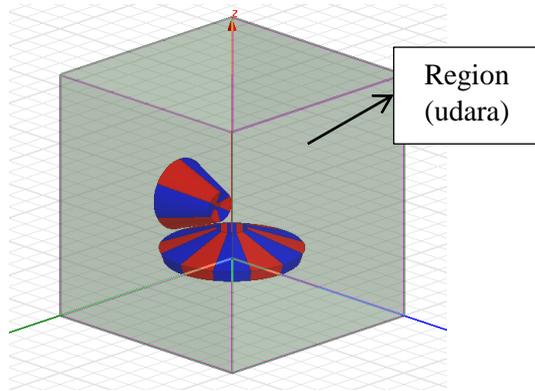
Menentukan material magnet gear yang digunakan yaitu NdFeB (N35) dengan spesifikasi yang dapat dilihat pada gambar 3.5. Pada tahap ini juga dilakukan penentuan posisi pemasangan kutub magnet. Kutub selatan dan utara disusun berselingan sepanjang permukaan geometri.



Gambar 3. 6 Penyusunan kutub magnet & spesifikasi material

d. Region

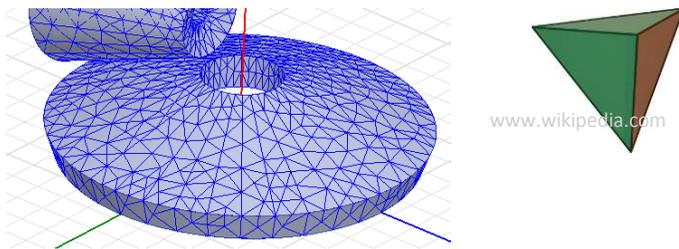
Region merupakan daerah ruang operasi disekitar *magnetic gear* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. *Region* tersebut dibuat dengan cara membuat model 3D bervolume udara diluar komponen *magnetic gear* seperti pada gambar 3.5.



Gambar 3. 7 pembuatan region *magnetic gear*

e. *Mesh*

Pembuatan mesh dilakukan pada model 3D yang telah dibuat. Meshing volume yang digunakan adalah tipe *tetrahedra*. Metode meshing yang digunakan adalah *length-Based mesh* (*mesh* berbasis panjang). Contoh hasil *mesh* dapat dilihat pada gambar 3.6 dibawah.



Gambar 3. 8 *mesh tetrahedra*

f. *Boundary Conditions dan Excitations*

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*.

g. Initialize

Merupakan langkah awal untuk proses iterasi agar mudah mencapai konvergen, langkah ini dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan analisis *magnetostatic* pada desain 3D menggunakan software *Ansys maxwell electromagnetic*. Dengan menggunakan metode *adaptive pass* yang tersedia pada *Ansys* dan menentukan batas prosentase error yang diijinkan. Dalam penelitian ini *number adaptive passes* yang digunakan yaitu 10 dengan batas prosentase error 1 %.

h. Iterate

Langkah selanjutnya setelah menetapkan nilai *adaptive pass* dan prosentase *error* adalah *iterate*, yang merupakan langkah perhitungan piranti lunak *Ansys Maxwell*. *Iterate* akan secara otomatis berhenti apabila prosentase error yang didapat $\leq 1\%$ dapat dikatakan iterasi sudah konvergen dimana dapat dilihat pada gambar 3.8. Apabila tidak tercapai kriteria konvergen maka dilakukan tahapan untuk memperbaiki pembuatan mesh dengan cara mengatur ulang panjang mesh. Namun apabila telah dicapai kriteria konvergen, maka simulasi bisa dilanjutkan ke *Analysis transient*.

Convergence

Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)
1	17528	47.4	15.942	N/A
2	22781	47.124	8.749	0.58312
3	29645	47.295	5.4907	0.36418
4	38527	47.732	3.9074	0.92441
5	50118	48.031	2.9141	0.6254
6	65166	48.185	2.3052	0.32063
7	84700	48.294	1.7876	0.22528
8	110116	48.394	1.3728	0.20756
9	143149	48.492	1.0336	0.20292
10	186136	48.524	0.78543	0.06682

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

Energy Error/Delta Energy (%): Target [1, 1], Current [0.78543, 0.06682]

View: Table Plot

Export...

Gambar 3. 9 Konvergensi

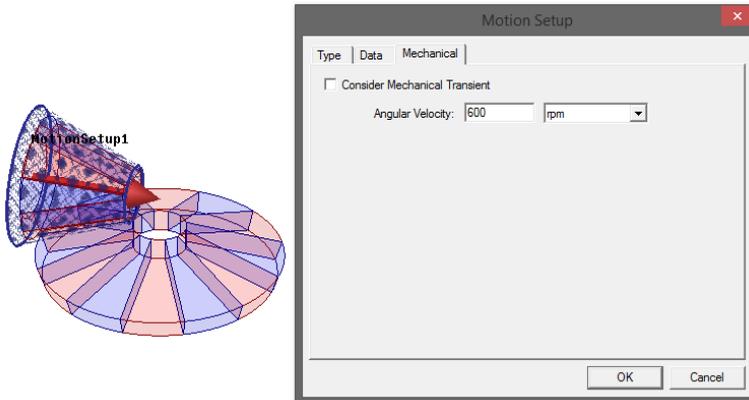
Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisis *transient* adalah sebagai berikut:

1. Mengganti Model *solver*

Pada langkah ini dilakukan penggantian model solver yaitu dari *Magnetostatic analysis* ke *Transient analysis*.

2. Setting Motion

Selanjutnya menentukan part yang dianggap sebagai *driving part* dengan cara memberikan *motion* pada *part* tersebut. *Driving part* yang ditentukan adalah rotor HS yang diberi *input* kecepatan sudut putar sebesar 600 rpm.



Gambar 3. 10 Part Motion pada Magnetic gear

3. Parameter *output*

Menentukan dua parameter *output* pada desain 3D yang telah dibuat yaitu torsi rotor *high speed* (HS) untuk rotor dengan jumlah magnet yang sedikit dan torsi rotor *low speed* (LS) untuk rotor dengan jumlah magnet yang lebih banyak.

4. *Analysis Setup*

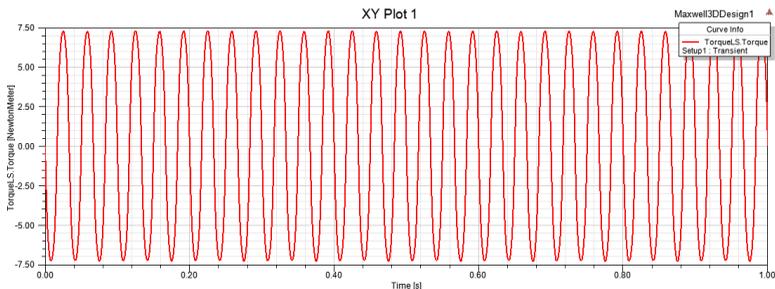
Menentukan set analisis pada *software*. Pada simulasi ini, analisis diatur pada lama waktu putaran yaitu selama 1 detik, dengan *time step* 0,01 detik dengan kecepatan sudut putar 600 rpm. Artinya, pengaturan ini bertujuan untuk mencatat besar torsi pada rotor setiap 0,01 detik dalam 1 detik.

5. *Analyze Process*

Pada tahap ini proses analisis Transient dijalankan.

3.5.3 Tahap *Post-Processing*

Tahap *post-processing* merupakan tahap pengambilan data hasil simulasi. Hasil yang di ambil tersebut berupa data kuantitatif yaitu nilai torsi pada rotor sisi beban (LS). Selain itu juga didapatkan data berupa grafik torsi terhadap waktu yang ditunjukkan pada gambar 3.10. Pada grafik tersebut dapat dilihat torsi maksimum dari desain *magnetic bevel gear* yang telah di buat.



Gambar 3. 11 Torsi LS vs Time

Post-processing dilakukan pada masing-masing desain yang sudah dibuat dengan variasi jarak *air gap* dan jumlah magnet yang sudah ditentukan. Kemudian data yang didapat dicatat pada tabel 3.4 dibawah untuk memudahkan dalam melakukan analisis.

Tabel 3. 6 Data penelitian

Geometri	Jumlah magnet		T_{max}			
	HS	LS	<i>Air gap</i> (0.2 mm)	<i>Air gap</i> (0.5 mm)	<i>Air gap</i> (1 mm)	<i>Air gap</i> (2 mm)
Desain 1	4	8				
	6	12				
	8	16				
Desain 2	4	8				
	6	12				
	8	16				
Desain 3	4	8				
	6	12				
	8	16				

3.6 Langkah-langkah Simulasi

Langkah-langkah Simulasi dapat dijelaskan dengan menggunakan tabel sehingga dapat diilustrasikan pada tabel 3.7.

Tabel 3. 7 Langkah-langkah penelitian

Langkah-langkah Simulasi
Melakukan pembuatan geometri <i>magnetic bevel gear</i> menggunakan <i>solidwork</i> .
Input geometri <i>magnetic bevel gear</i> pada <i>software Ansys Maxwell Electromagnetic (pre-processing)</i> .
Menentukan batas operasi pada <i>Ansys</i> dalam simulasi model uji , meliputi : <i>materials, Region, boundary condition, initialize</i> .
Membuat <i>meshing</i> dengan metode <i>length based mesh</i> . Tipe <i>mesh</i> yang digunakan yaitu <i>tetrahedra</i> .
Melakukan iterasi hingga mencapai konvergen. Bila simulasi belum konvergen, maka pembuatan <i>mesh</i> pada model uji diulangi lagi.
Setelah didapatkan hasil konvergen maka selanjutnya dilakukan <i>Transient Analysis</i> . Analisis tersebut dilakukan pada ke-tiga desain yang telah dibuat.

Melakukan simulasi pada ke-tiga desain dengan variasi yang ditentukan yaitu : variasi jarak <i>air gap</i> (0.2 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm) dan variasi jumlah magnet pada rotor HS (4, 6, 8) sedangkan pada rotor LS (8, 12, 16).
Melakukan <i>post-processing</i> tiap variasi.
Analisis hasil dan penarikan kesimpulan.

3.7 Metode Analisis Data dan Pembahasan

Metode analisis data adalah suatu metode yang digunakan untuk mengolah hasil penelitian guna memperoleh suatu kesimpulan. Dengan melihat kerangka pemikiran teoritis, maka teknik analisis data yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis kuantitatif. Proses analisis data yang dilakukan adalah dengan melakukan simulasi pada desain *magnetic gear* untuk semua parameter-parameter yang telah ditentukan sebelumnya. Dalam proses simulasi dilakukan variasi jarak *air gap* dan jumlah magnet untuk mengetahui pengaruh variabel tersebut terhadap torsi dari desain *magnetic gear*. Simulasi dilakukan pada 3 desain yang telah dibuat dengan nilai variasi yang sama. Dari proses tersebut didapatkan nilai torsi maksimal, dimana T_{max} tersebut merupakan batas maksimum torsi yang mampu ditransmisikan oleh desain *magnetic gear* yang telah dibuat.

Untuk dapat menjelaskan pengaruh variabel *air gap* dan jumlah magnet terhadap berubahnya torsi, maka data – data yang diperoleh dicantumkan dalam sebuah grafik. Data-data yang akan dibuat dalam bentuk grafik diantaranya:

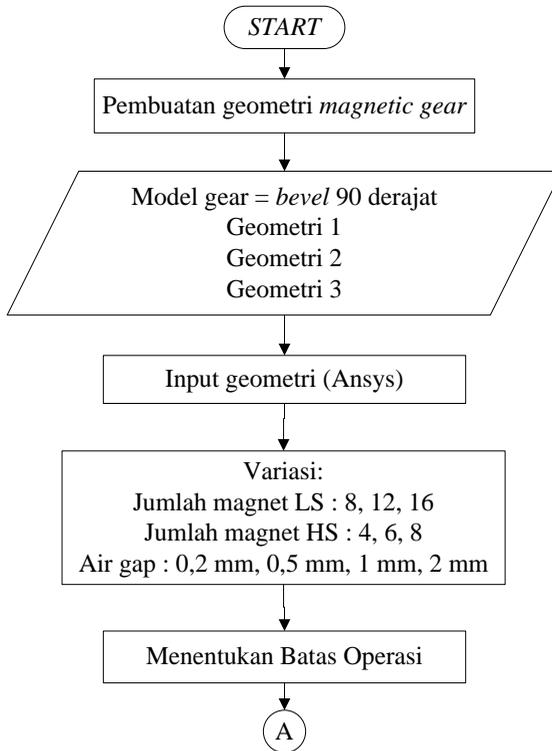
1. Pengaruh jarak antar magnetic gear terhadap besarnya torsi
2. Pengaruh banyaknya pole magnet terhadap besarnya torsi

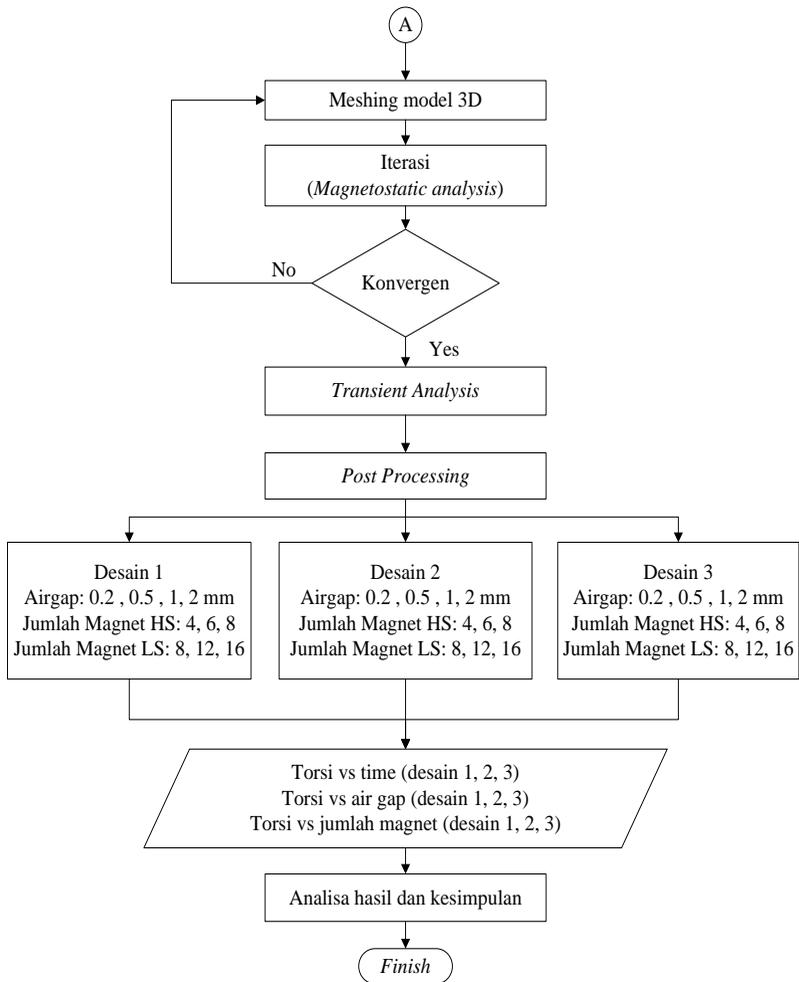
Setelah didapatkan nilai torsi maksimal dari masing-masing desain tersebut, akan di ambil nilai torsi terbaik yang akan digunakan untuk menjadi faktor pembanding besar volume antara *mechanical gear* dengan *magnetic gear*. Data torsi dan volume dari *mechanical gear* di dapat/di lihat pada *data sheet mechanical*

bevel gear yang tersedia. Dari semua hasil yang di peroleh kemudian akan dilakukan analisis untuk menjawab rumusan-rumusan masalah yang telah diangkat dan kemudian dapat di tarik kesimpulan dari hasil analisis tersebut.

3.8 Flowchart Simulasi

Secara singkat prosedur simulasi pada *magnetic bevel gear* ini dapat dijelaskan dengan menggunakan *flowchart* yang ditunjukkan pada gambar 3.11.





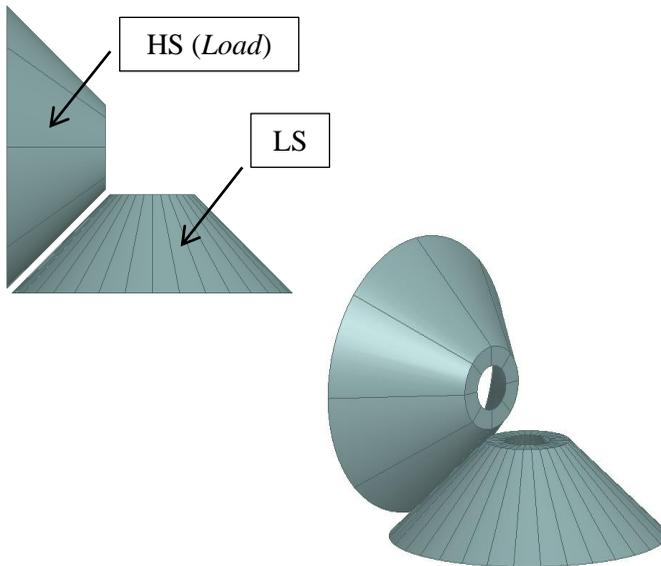
Gambar 3. 12 Flowchart Simulasi

(Halaman ini sengaja di kosongkan)

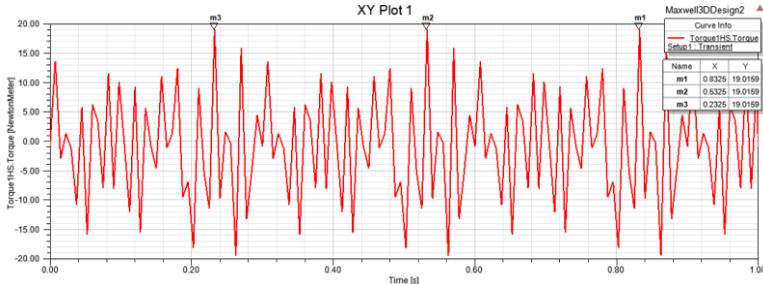
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Verifikasi

Verifikasi merupakan suatu langkah evaluasi suatu software dengan menentukan apakah nilai yang dihasilkan sudah sesuai dengan kebutuhan. Langkah ini bertujuan untuk membuktikan bahwa software yang akan digunakan memiliki data kinerja yang sama dengan software yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Verifikasi dilakukan dengan cara membandingkan data hasil simulasi oleh muruganandam et al. (2012) menggunakan software MagNet, dengan data hasil simulasi menggunakan software *Ansys Maxwell Electromagnetic*. Desain yang digunakan sebagai obyek simulasi ditunjukkan pada gambar 4.1. Setelah dilakukan simulasi dengan menggunakan software *Ansys Maxwell Electromagnetic* didapatkan hasil berupa grafik torsi terhadap waktu yang ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4. 1 Desain obyek simulasi



Gambar 4. 2 Grafik torsi terhadap waktu menggunakan *Ansys Maxwell Electromagnetic*

Dari hasil yang didapat tersebut kemudian dilakukan proses verifikasi dengan membandingkan data hasil dari muruganandam et al. (2012) menggunakan software MagNet, yang ditunjukkan pada tabel 4.1 dibawah.

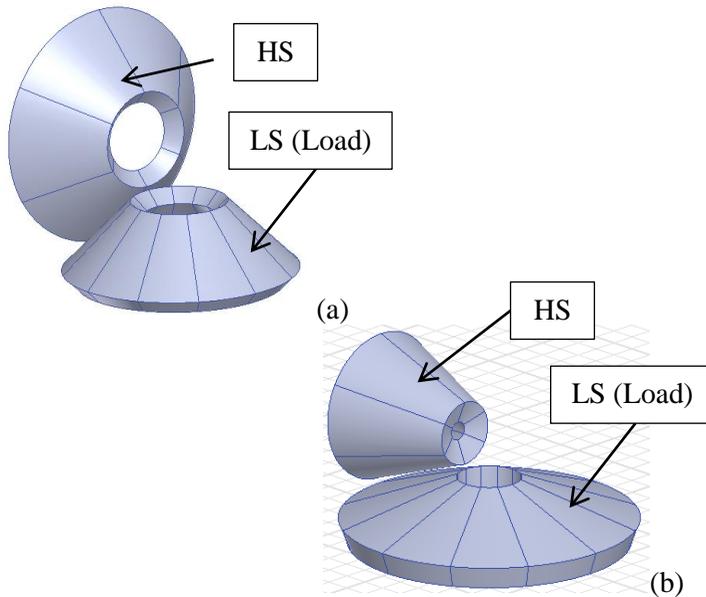
Tabel 4. 1 Hasil Verifikasi

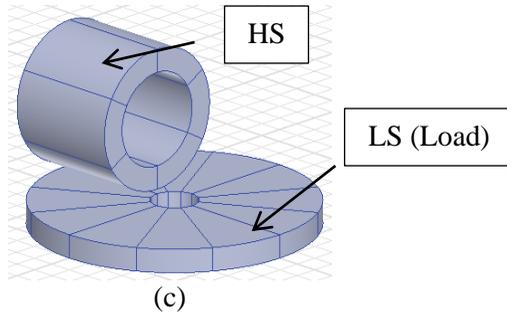
No	Material magnet	Air gap	Software MagNet	Software Ansys maxwell	Verifikasi	
			T_{\max}	T_{\max}	Sesuai	Tidak sesuai
1	NdFeB	5	19.0	19.0159	√	-

Dari tabel tersebut diketahui bahwa nilai T_{\max} yang didapat menggunakan software *ansys maxwell* memiliki nilai yang hampir sama, hanya berbeda sedikit saja. Dari hal tersebut dapat dinyatakan bahwa verifikasi software yang sudah dilakukan sesuai atau valid, yang artinya langkah-langkah yang dilakukan menggunakan software yang berbeda dengan sebelumnya sudah benar dengan didapatkannya nilai yang mendekati tersebut. Sehingga penelitian dapat dilanjutkan dengan melakukan simulasi menggunakan desain yang telah ditentukan.

4.2 Hasil simulasi

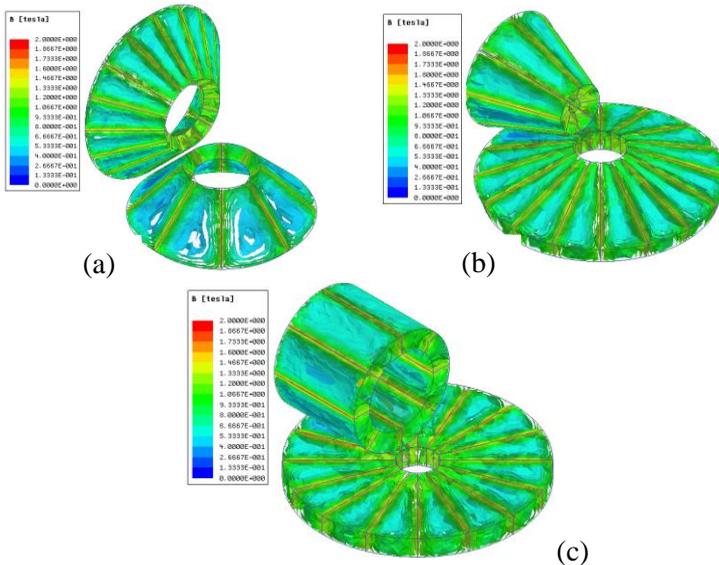
Dengan menggunakan software *Ansys Maxwell Electromagnetic* dilakukan simulasi untuk mendapatkan data berupa grafik torsi terhadap waktu yang kemudian dapat dilihat nilai torsi maksimumnya. Prinsip utama dari magnetic bevel gear yang dirancang adalah sirkuit magnetik radial yang digunakan untuk mewujudkan kopling magnetik dari rotor *high speed* (HS) dan rotor *low speed* (LS). Rotor HS dan rotor LS dirancang memiliki jumlah kutub magnet yang berbeda sesuai dengan rasio yang ditentukan yaitu 2:1 untuk menjadi dua bagian yang terpisah. Magnet permanen dipasang pada kedua permukaan rotor secara berselingan utara dan selatan. Simulasi dilakukan menggunakan desain geometri 1, 2, dan 3 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4 untuk setiap variasi *air gap* dan jumlah magnet yang sudah ditentukan, yaitu untuk *air gap* sebesar 2, 1, 0,5 dan 0,2 mm, sedangkan jumlah magnet sebanyak 4, 6, 8 untuk *rotor high speed* (HS) dan 8, 12, 16 untuk *rotor low speed* (LS).





Gambar 4. 3 Desain (a) geometri 1 (b) geometri 2 (c) geometri 3

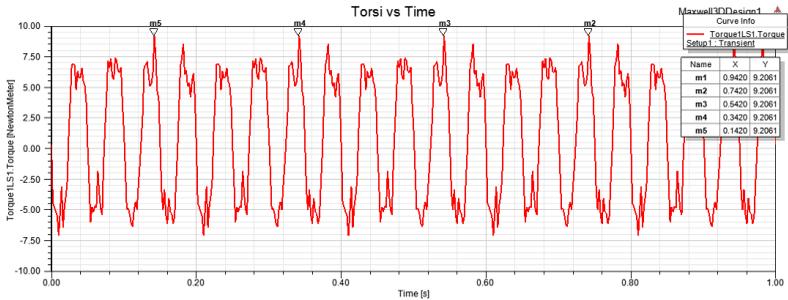
Ketiga desain tersebut kemudian dilakukan analisis magnetostatik untuk mendapatkan *mesh* yang konvergen sebelum nantinya dilakukakn analisis transient. Dari analisis magnetostatik tersebut dapat dilihat hasil berupa distribusi kerapatan fluks medan magnet yang ditunjukkan pada gambar 4.4.



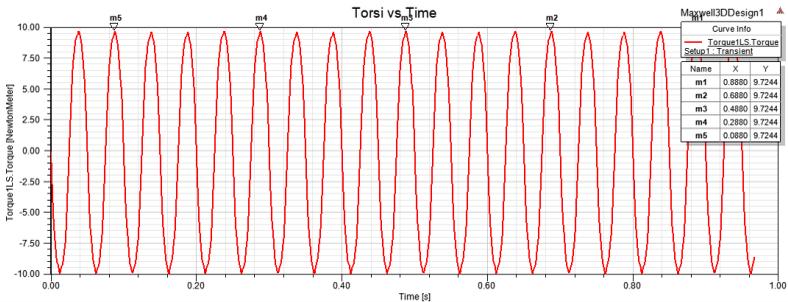
Gambar 4. 4 Distribusi kerapatan fluks medan magnet (a) desain geometri 1 (b) desain geometri 2 (c) desain geometri 3

Dari ketiga gambar distribusi kerapatan fluks medan magnet (B) diatas terlihat bahwa pada desain geometri 1 yaitu pada gambar (a) memiliki daerah dengan kerapatan fluks medan magnetnya yang sangat kecil atau bahkan tidak ada, ditandai dengan daerah berwarna putih. Berbeda dengan gambar (b) dan (c) yang tidak memilikinya. Pada desain geometri 2 terlihat bahwa semua daerah pada susunan magnet memiliki nilai kerapatan fluks medan magnet, akan tetapi fluks *density* terbesar terdapat pada tepi atau titik temu antara kutub magnet selatan dengan kutub magnet utara dan pada bagian tengah magnet memiliki nilai fluks *density* yang kecil ditunjukkan oleh warna biru tua pada gambar 4.4 (b). Pada desain geometri 3, sama halnya dengan desain geotmeri 2 bahwa fluks *density* terbesar terdapat pada tepi atau titik temu antara kutub magnet selatan dengan kutub magnet utara, akan tetapi pada bagian tengah magnet memiliki nilai fluks *density* yang lebih besar dari pada desain geometri 2 yang ditunjukkan oleh warna biru muda yang dapat dilihat pada gambar 4.4 (c). Tidak terkecuali pada desain geometri 1 juga, fluks *density* terbesar terdapat pada tepi atau titik temu antara kutub magnet selatan dengan kutub magnet utara. Dari hal tersebut dapat kita ketahui bahwa pada desain geometri 2 dapat menghasilkan kerapatan fluks medan magnet yang tinggi dan *uniform* pada rotor HS maupun LS yang berpusat di titik temu antara kutub yang berlawanan. Untuk plot lintasan fluks *density* dapat dilihat pada lampiran 2.

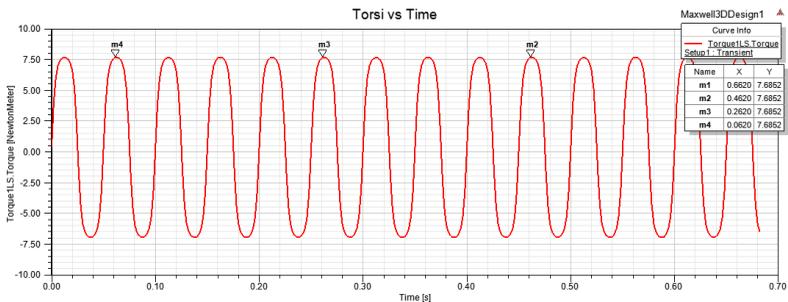
Kemudian setelah itu dilakukan analisis transient dengan menginput kecepatan yaitu pada simulai ini sebesar 300 rpm pada rotor HS untuk mendapatkan atau mem-plot grafik torsi terhadap waktu dari masing-masing desain geometri yang ditunjukkan pada gambar 4.5.



(a)



(b)



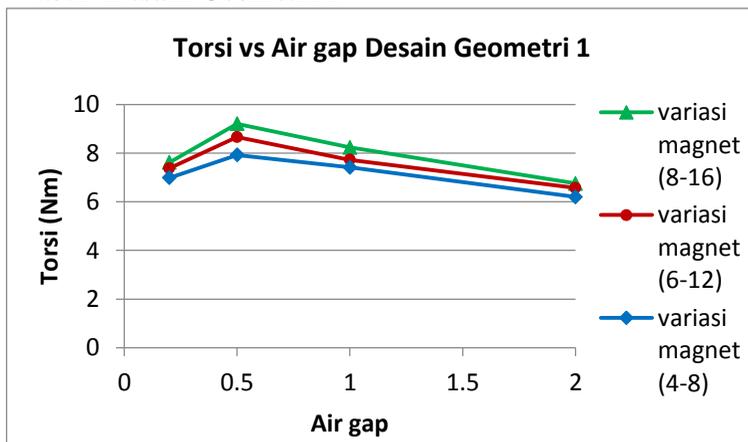
(c)

Gambar 4. 5 Grafik torsi terhadap waktu untuk desain (a) geometri 1 (b) geometri 2 (c) geometri 3

Pada grafik (a) yaitu desain geometri 1 dapat dilihat bahwa gelombang yang terbentuk tidak sempurna, hal tersebut dikarenakan terdapat daerah magnet dengan nilai kerapatan fluks medan magnet yang sangat kecil atau bahkan tidak ada. Lain halnya dengan grafik yang terbentuk pada desain geometri 2 dan 3 yang memiliki bentuk gelombang yang sempurna dikarenakan pada keseluruhan daerah magnet memiliki nilai kerapatan fluks medan magnet. Dari grafik tersebut didapatkan data berupa torsi maksimum (T_{\max}) yang ditunjukkan pada titik tertinggi dari gelombang yang dihasilkan. Torsi maksimum (T_{\max}) sendiri merupakan batas torsi yang mampu diterima oleh desain magnetik bevel gear yang telah dibuat, apabila magnetik gear tersebut mendapatkan atau diberikan torsi melebihi torsi maksimumnya, maka akan terjadi slip. Analisis transient dilakukan pada desain geometri 1, 2, dan 3 untuk tiap variasi *air gap* dan jumlah magnet. Data hasil simulasi berupa nilai torsi maksimum tersebut dapat dilihat pada lampiran 1.

4.3 Analisis dan Pembahasan Grafik Hasil Simulasi

4.3.1 Desain Geometri 1

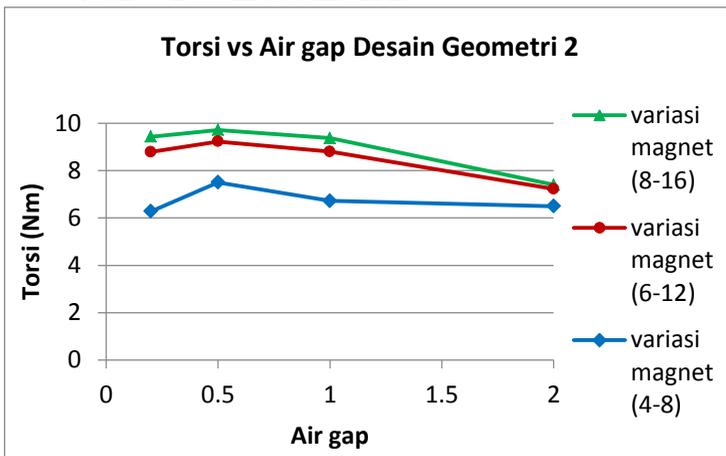


Gambar 4. 6 Grafik torsi terhadap *air gap* untuk desain geometri 1

Pada gambar 4.6 terlihat grafik pengaruh jumlah magnet terhadap torsi maksimum sebagai fungsi jarak *air gap* pada desain geometri 1. Torsi maksimum (T_{\max}) sendiri adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan batas maksimum torsi yang mampu diterima oleh desain magnetik gear yang dibuat. Trendline grafik menunjukkan besarnya nilai torsi maksimum pada desain geometri 1 *magnetic bevel gear* dengan variasi jumlah magnet yang digunakan yaitu 4-8, 6-12 dan 8-16. Nilai perubahan torsi pada jumlah magnet 4-8 dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut mengalami kenaikan yaitu sebesar 6,1991 ; 7,4115 ; dan 7,9189 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi mulai menunjukkan penurunan yaitu 6,9817 Nm. Nilai perubahan torsi pada jumlah magnet 6-12 dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut juga mengalami kenaikan yaitu sebesar 6,5647 ; 7,7201 ; dan 8,6560 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi mulai menunjukkan penurunan yaitu 7,3748 Nm. Begitu juga pada jumlah magnet 8-16 nilai perubahan torsi dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut mengalami kenaikan yaitu sebesar 6,7533 ; 8,2326 ; dan 9,2061 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi mulai menunjukkan penurunan yaitu 7,6166 Nm. Dari data grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin dekat jarak *air gap* semakin besar torsi yang mampu diterima oleh desain magnetik gear. Akan tetapi, pada jarak tertentu justru mengakibatkan penurunan pada nilai torsi maksimum. Terlihat pada grafik bahwa jarak *air gap* maksimum untuk mendapatkan torsi maksimum yang optimal terdapat pada jarak 0,5 mm yaitu 9,2061 Nm. Selain itu penambahan jumlah magnet juga mempengaruhi nilai torsi maksimum, ditunjukkan pada grafik yaitu terlihat pada garis hijau yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 8-16 terdapat pada posisi teratas, kemudian diikuti garis berwarna merah yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 6-12 terdapat

pada posisi kedua, dan garis berwarna biru yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 4-8 terdapat pada posisi ketiga. Hal tersebut menjelaskan bahwa semakin banyak magnet yang digunakan semakin tinggi torsi maksimum yang didapatkan. Namun, pada penambahan jumlah magnet dari 6-12 ke 8-16 kenaikan T_{\max} yang terjadi tidak terlalu besar yaitu hanya sekitar 0,1886 Nm.

4.3.2 Desain Geometri 2

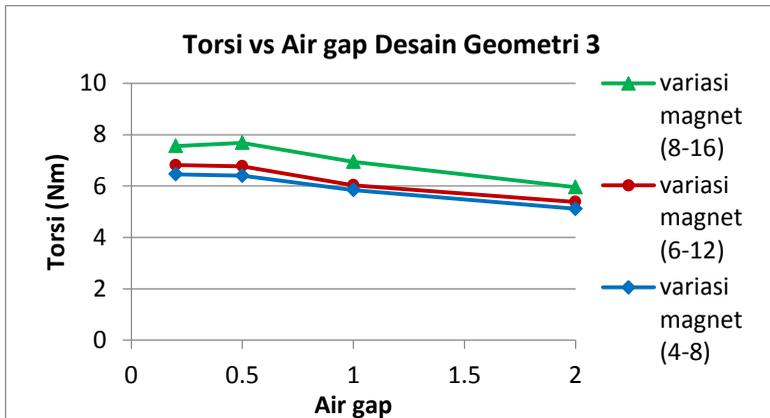


Gambar 4. 7 Grafik torsi terhadap *air gap* untuk desain geometri 2

Pada gambar 4.7 terlihat grafik pengaruh jumlah magnet terhadap torsi maksimum sebagai fungsi jarak *air gap* pada desain geometri 2. Torsi maksimum (T_{\max}) sendiri adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan batas maksimum torsi yang mampu diterima oleh desain magnetik gear yang dibuat. Trendline grafik menunjukkan besarnya nilai torsi maksimum pada desain geometri 2 *magnetic bevel gear* dengan variasi jumlah magnet yang digunakan yaitu 4-8, 6-12 dan 8-16. Nilai perubahan torsi pada jumlah magnet 4-8 dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut

mengalami kenaikan yaitu sebesar 6,5006 ; 6,7261 ; dan 7,5030 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi mulai menunjukkan penurunan yaitu 6,2829 Nm. Nilai perubahan torsi pada jumlah magnet 6-12 dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut juga mengalami kenaikan yaitu sebesar 7,2270 ; 8,8057 ; dan 9,2291 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi mulai menunjukkan penurunan yaitu 8,7932 Nm. Begitu juga pada jumlah magnet 8-16 nilai perubahan torsi dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut mengalami kenaikan yaitu sebesar 7,4022 ; 9,3767 ; dan 9,7244 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi mulai menunjukkan penurunan yaitu 9,4330 Nm. Dari data grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin pendek jarak *air gap* semakin besar torsi yang mampu diterima oleh desain magnetik gear. Akan tetapi, pada jarak tertentu justru mengakibatkan penurunan pada nilai torsi maksimum. Terlihat pada grafik bahwa jarak *air gap* maksimum untuk mendapatkan torsi maksimum yang optimal terdapat pada jarak 0,5 mm yaitu 9,7244 Nm. Selain itu penambahan jumlah magnet juga mempengaruhi nilai torsi maksimum, ditunjukkan pada grafik yaitu terlihat pada garis hijau yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 8-16 terdapat pada posisi teratas, kemudian diikuti garis berwarna merah yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 6-12 terdapat pada posisi kedua, dan garis berwarna biru yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 4-8 terdapat pada posisi ketiga. Hal tersebut menjelaskan bahwa semakin banyak magnet yang digunakan semakin tinggi torsi maksimum yang didapatkan. Namun, pada penambahan jumlah magnet dari 6-12 ke 8-16 dengan *air gap* 2 mm kenaikan T_{\max} yang terjadi tidak terlalu besar yaitu hanya sekitar 0,1752 Nm.

4.3.3 Desain Geometri 3



Gambar 4. 8 Grafik torsi terhadap *air gap* untuk desain geometri 3

Pada gambar 4.8 terlihat grafik pengaruh jumlah magnet terhadap torsi maksimum sebagai fungsi jarak *air gap* pada desain geometri 3. Torsi maksimum (T_{\max}) sendiri adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan batas maksimum torsi yang mampu diterima oleh desain magnetik gear yang dibuat. Trendline grafik menunjukkan besarnya nilai torsi maksimum pada desain geometri 3 *magnetic bevel gear* dengan variasi jumlah magnet yang digunakan yaitu 4-8, 6-12 dan 8-16. Nilai perubahan torsi pada jumlah magnet 4-8 dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut mengalami kenaikan yaitu sebesar 5,1129 ; 5,8430 ; dan 6,3998 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi masih menunjukkan kenaikan namun tidak signifikan yaitu 6,4591 Nm. Nilai perubahan torsi pada jumlah magnet 6-12 dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut juga mengalami kenaikan yaitu dari 5,3817 ; 6,0350 ; dan 6,7739 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi masih menunjukkan kenaikan namun tidak signifikan yaitu 6,8188 Nm. Begitu juga pada jumlah magnet 8-16 nilai

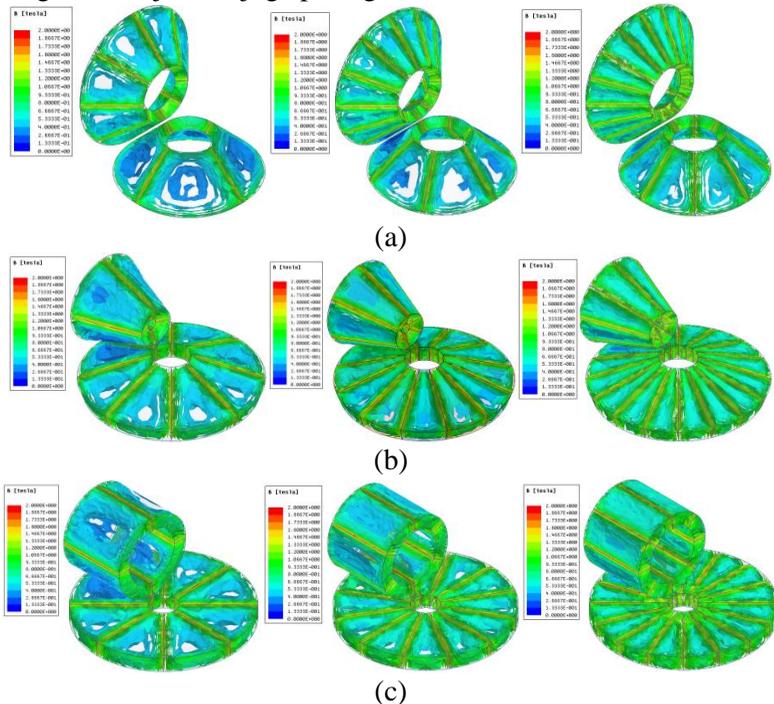
perubahan torsi dari jarak *air gap* 2 mm, 1 mm, dan 0,5 mm secara berturut-turut mengalami kenaikan yaitu sebesar 5,9594 ; 6,9479 ; dan 7,6852 Nm. Namun, pada jarak *air gap* 0,2 mm nilai torsi mulai menunjukkan penurunan yaitu 7,5618 Nm. Dari data grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin pendek jarak *air gap* semakin besar torsi yang mampu diterima oleh desain magnetik gear. Akan tetapi, pada jarak tertentu justru mengakibatkan penurunan pada nilai torsi maksimum. Terlihat pada grafik bahwa jarak *air gap* maksimum untuk mendapatkan torsi maksimum yang optimal terdapat pada jarak 0,5 mm yaitu 7,6852 Nm. Selain itu penambahan jumlah magnet juga mempengaruhi nilai torsi maksimum, ditunjukkan pada grafik yaitu terlihat pada garis hijau yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 8-16 terdapat pada posisi teratas, kemudian diikuti garis berwarna merah yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 6-12 terdapat pada posisi kedua, dan garis berwarna biru yang menunjukkan nilai T_{\max} variasi jumlah magnet 4-8 terdapat pada posisi ketiga. Hal tersebut menjelaskan bahwa semakin banyak magnet yang digunakan semakin tinggi torsi maksimum yang didapatkan.

Kenaikan nilai torsi yang ditunjukkan berdasarkan semakin dekatnya jarak *air gap* pada hasil simulasi yang didapatkan tidak sesuai dengan teori yang ada, yaitu semakin dekatnya jarak *air gap* menyebabkan nilai fluks *density air gap* (Bg) semakin besar yang akan mempengaruhi nilai magnetisasi yang terjadi. Hal tersebut dapat dilihat pada rumus torsi dibawah :

$$T_r(\theta) = \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{poles}}\right) L(R_2 - R_1)^{N_d-1} \sum_{p=0}^{N_s} \sum_{q=0}^{N_s} (-1)^p S_r(q)r(q)}{N_r} \times \left[\cos\left(\theta_{sdge}(\theta, p) B_x^{ext}(r(q), \theta_{sdge}(\theta, p))\right) \right]$$

Dari rumus diatas menunjukkan bahwa besar magnetisasi (M_s) berbanding lurus dengan torsi itu sendiri, dengan semakin besarnya nilai magnetisasi maka semakin besar pula nilai

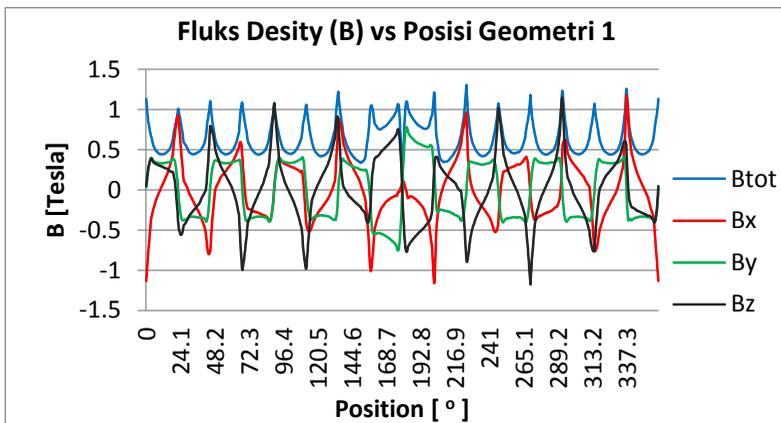
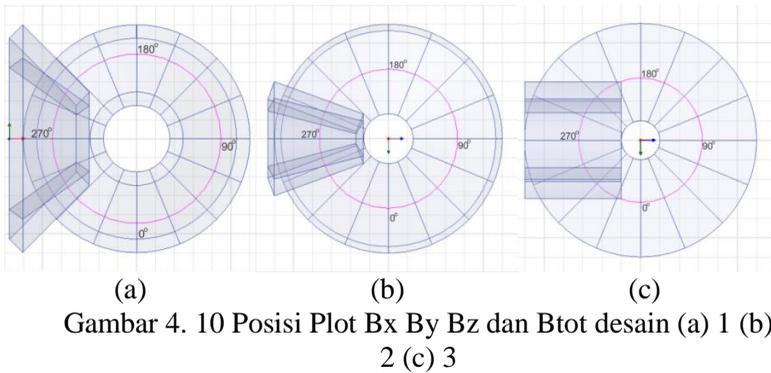
torsinya. Namun pada hasil simulasi didapatkan bahwa terdapat jarak air gap minimum yang menyebabkan torsi maksimum menjadi turun. Selain itu, untuk meningkatnya nilai torsi dengan penambahan jumlah magnet telah sesuai dengan teori yang ada, ditunjukkan pada rumus torsi diatas yaitu jumlah magnet (jumlah pole) berperan sebagai pembagi pada fungsi \cos dimana semakin banyak jumlah magnet maka angka yang mengisi pada rumus fungsi \cos semakin kecil, yang mana angka dengan nilai kecil yang dimasukkan fungsi \cos akan menghasilkan angka yang besar sehingga nilai torsi akan semakin besar. Pengaruh semakin tingginya nilai torsi maksimum akibat penambahan jumlah magnet ditunjukkan juga pada gambar 4.9.



Gambar 4. 9 Perubahan distribusi fluks *density* dengan ditambahnya jumlah magnet (a) desain 1 (b) desain 2 (c) desain 3

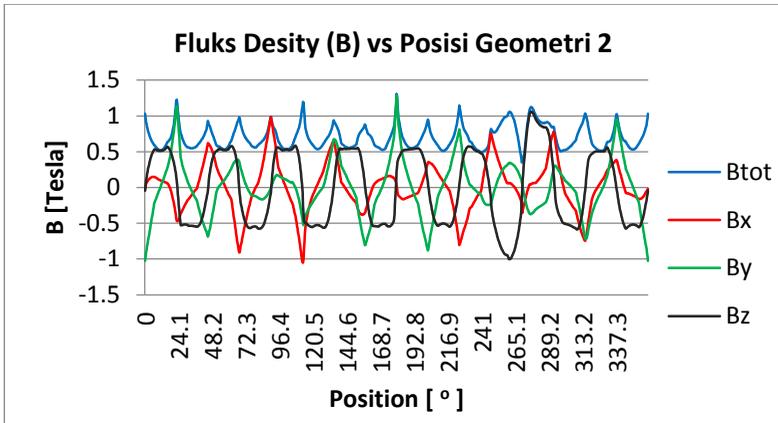
Pada gambar 4.9 menunjukkan terjadinya perubahan jumlah fluks *density*, dimana semakin banyak jumlah magnet semakin besar fluks *density* yang dihasilkan. Hal tersebut ditunjukkan gambar ke-3 pada gambar (a), (b) dan (c) yang memiliki daerah berwarna kuning lebih banyak yang menunjukkan tingginya fluks *density* medan magnet yang terjadi. Sedangkan sebelum dilakukan penambahan jumlah magnet, dilihat pada gambar ke-1 dari gambar (a), (b) dan (c) terdapat bagian yang tidak memiliki nilai fluks *density* medan magnet yaitu bagian yang tidak berwarna. Hal tersebut menandakan bahwa fluks *density* yang dihasilkan lebih kecil dibandingkan sesudah dilakukan penambahan jumlah magnet. Dan dengan melihat rumus diatas dapat diketahui bahwa semakin tinggi fluks *density* maka semakin tinggi pula T_{max} . Dengan begitu peristiwa tersebut menunjukkan bahwa dengan melakukan penambahan jumlah magnet dapat memperbesar torsi maksimum yang mampu diterima desain *magnetic bevel gear*.

Selain itu, pada persamaan diatas diketahui bahwa torsi dipengaruhi oleh fluks *density* external yang menyebabkan munculnya fluks *density* kearah x (B_x), kearah y (B_y) dan kearah z (B_z) pada rotor LS. Berikut adalah plot grafik B_x , B_y , B_z , dan B_{tot} pada masing-masing desain geometri yang telah dibuat untuk mengetahui manakah yang paling berperan besar terhadap nilai torsi maksimum yang dapat dilihat pada gambar 4.11 untuk desain geometri 1, gambar 4.12 untuk desain geometri 2, dan gambar 4.13 untuk desain geometri 3. Grafik tersebut diplot sesuai posisi yang ditunjukkan pada gambar 4.10.



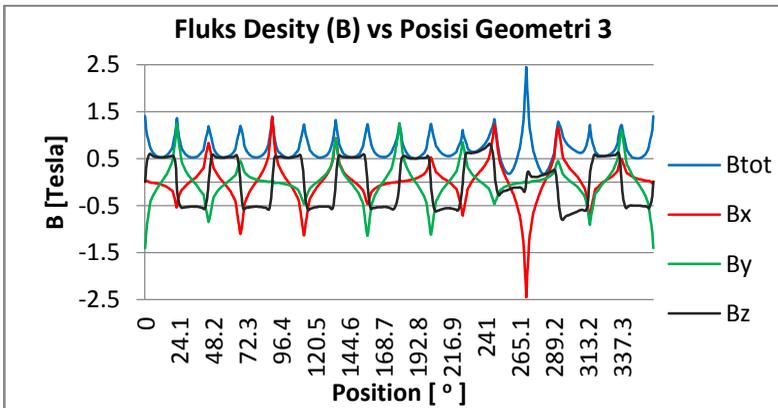
Gambar 4. 11 Bx By Bz dan Btot pada desain geometri 1

Pada gambar 4.11 diatas menunjukkan bahwa fluks *density* yang berpengaruh besar terhadap nilai torsi maksimum pada desain geometri 1 adalah Bz. Hal tersebut ditunjukkan oleh garis berwarna hitam (gambar 4.11) pada posisi 270° yang dapat dilihat pada gambar 4.10 (a), Bz memiliki nilai lebih besar dari pada garis berwarna merah (Bx) dan hijau (By) yaitu sebesar -1,17756 T, nilai negatif yang didapat menunjukkan arah dari Bz tersebut.



Gambar 4. 12 Bx By Bz dan B tot pada desain geometri 2

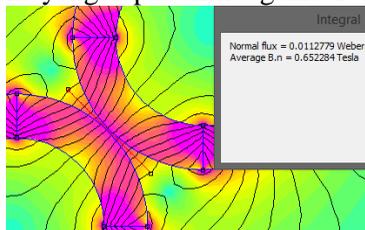
Pada gambar 4.12 diatas menunjukkan bahwa fluks *density* yang berpengaruh besar terhadap nilai torsi maksimum pada desain geometri 2 adalah Bz. Hal tersebut ditunjukkan oleh garis berwarna hitam (gambar 4.12) pada posisi $274,8^\circ$ yang dapat dilihat pada gambar 4.10 (b), Bz memiliki nilai lebih besar dari pada garis berwarna merah (Bx) dan hijau (By) yaitu sebesar 1,00817 T.



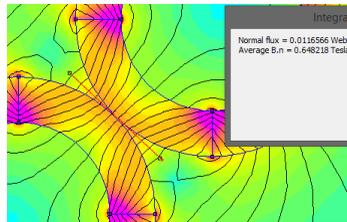
Gambar 4. 13 Bx By Bz dan Btot pada desain geometri 3

Pada gambar 4.13 diatas menunjukkan bahwa fluks *density* yang berpengaruh besar terhadap nilai torsi maksimum pada desain geometri 3 adalah Bx. Hal tersebut ditunjukkan oleh garis berwarna merah (gambar 4.13) pada posisi 270° yang dapat dilihat pada gambar 4.10 (c), Bx memiliki nilai lebih besar dari pada garis berwarna hijau (By) dan hitam (Bz). Namun, pada kali ini Bx terbesar terdapat pada nilai negatif yang menunjukkan arah sebaliknya.

Menurut teori yang ada yaitu magnetisasi yang merupakan siklus momen dipole dimana momen yang timbul akibat kutub utara dan selatan magnetik dipisahkan oleh jarak yang sangat kecil. Jarak tersebut mempengaruhi besar fluks *density air gap* (Bg) yang terjadi. pengaruh tersebut ditunjukkan pada gambar 2.19 di bab 2 yang menunjukkan bahwa semakin dekat/kecil jarak *air gap* semakin besar nilai fluks *density air gap* (Bg) yang menyebabkan semakin besar nilai torsi maksimum. Hal tersebut juga dibuktikan pada penelitian sebelumnya bahwa semakin dekat jarak *air gap* semakin tinggi torsi maksimumnya, Namun pada penelitian kali ini didapatkan penurunan nilai torsi maksimum pada jarak *air gap* 0,2 mm. Terjadinya penurunan nilai torsi maksimum pada desain magnetic bevel gear dengan jarak *air gap* 0,2 mm bisa menjadi indikasi bahwa sudah mulai terjadi adanya kontak fisik antar *magnetic gear*. Ditunjukkan dengan menurunnya nilai kerapatan fluks *density air gap* (Bg) pada jarak tersebut. Menurunnya nilai kerapatan fluks *air gap* (Bg) tersebut diilustrasikan menggunakan FEMM dengan model spur gear sederhana yang dapat dilihat gambar 4.14 dibawah.



(a)

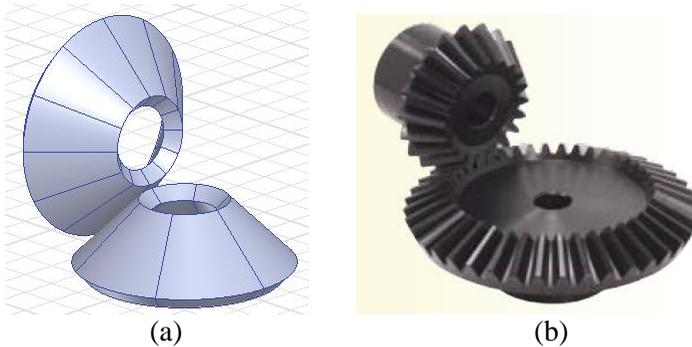


Gambar 4. 14 Fluks *density* (a) *air gap* 0,5 mm (b) *air gap* 0,2 mm

Terlihat pada gambar 4.14 (b) dengan *air gap* 0,2 mm nilai fluks *density air gap* menunjukkan penurunan yang ditunjukkan dengan warna yang orange kekuningan dengan nilai 0,648218 T, dibandingkan gambar (a) dengan *air gap* 0,5 mm yang memiliki warna orange kemerahan menunjukkan nilai fluks *density air gap* yang lebih tinggi yaitu 0.652284 T. Hal tersebutlah yang menyebabkan turunnya nilai torsi maksimum pada jarak tertentu yaitu pada kasus ini pada jarak 0,2 mm. Namun penurunan yang terjadi tidak terlalu signifikan pada desain geometri 3.

4.4 Perbandingan antara mekanik *bevel gear* dengan magnetik *bevel gear*

Dari data yang didapat dari hasil simulasi kemudian diambil nilai torsi tertinggi untuk masing-masing desain geometri, yang kemudian dilakukan perbandingan volume berdasarkan torsi maksimum yang didapatkan, dengan gear mekanik berdasarkan datasheet yang tersedia. Kemudian untuk mempermudah analisis dibuatlah tabel perbandingan untuk masing masing desain geometri yang dapat dilihat pada tabel 4.4 di bawah ini.



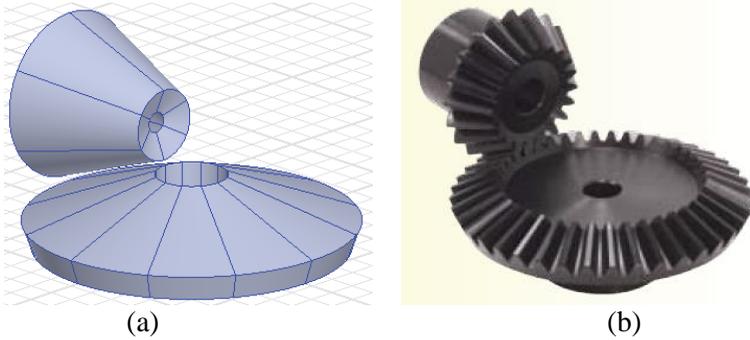
Gambar 4. 15 (a) Desain geometri 1 magnetik *bevel gear* (b) mekanik *bevel gear*

Tabel 4. 2 Perbandingan *magnetic gear* desain 1 dengan gear mekanik

Gear	Magnetik	Mekanik		Satuan
	desain 1	S45C	<i>stainless steel</i>	
Modul	-	3	3	mm
allowable torsi (T_{\max})	9,2061	10,1	7,19	Nm
Volume	$20,7 \times 10^{-4}$	$9,97 \times 10^{-4}$	$9,97 \times 10^{-4}$	m^3
Torsi <i>density</i>	4447,4	10130,4	7211,6	Nm/m^3

Gambar 4.15 merupakan gambar perbandingan antara desain geometri 1 *magnetic bevel gear* dan mekanik *bevel gear*, ditunjukkan pada tabel 4.3 bahwa desain geometri 1 *magnetic bevel gear* untuk torsi yang sama dengan mekanik *bevel gear* bermaterial baja S45C modul 3 mm memiliki volume yang lebih besar dua kali lipat, perbandingan volume antara keduanya yaitu 2:1. Hal tersebut juga ditunjukkan melalui torsi *density* dari *magnetic bevel gear* dan mekanik *bevel gear* bermaterial baja S45C yaitu 4447,4 dan 10130,4 Nm/m^3 . Sedangkan, dibandingkan dengan mekanik bevel gear bermaterial *stainless steel* yang mempunyai setengah volume dari magnetik bevel gear

memiliki torsi *density* yang lebih besar. Hal tersebut menunjukkan bahwa untuk desain geometri 1 tidak efisien, karena volumenya yang terlalu besar untuk torsi yang mampu diterima.



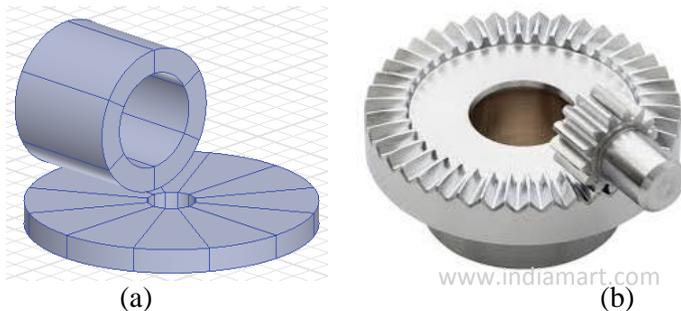
Gambar 4. 16 (a) Desain geometri 2 magnetik *bevel gear* (b) mekanik *bevel gear*

Tabel 4. 3 Perbandingan *magnetic gear* desain 2 dengan gear mekanik

Gear	Magnet	Mekanik		Satuan
	desain 2	S45C	<i>stainless steel</i>	
Module	-	3	3	Mm
<i>Allowable</i> torsi (T_{max})	9,7244	10,1	7,19	Nm
Volume	$10,7 \times 10^{-4}$	$9,97 \times 10^{-4}$	$9,97 \times 10^{-4}$	m^3
Torsi <i>density</i>	9088,2	10130,4	7211,6	Nm/m^3

Gambar 4.16 merupakan gambar perbandingan antara desain geometri 2 *magnetic bevel gear* dan mekanik *bevel gear*, ditunjukkan pada tabel 4.4 bahwa desain geometri 2 *magnetic bevel gear* untuk torsi yang sama dengan mekanik *bevel gear* bermaterial baja S45C memiliki volume yang hampir sama atau mendekati, perbandingan volume antara keduanya yaitu

1,070375:1. Hal tersebut juga ditunjukkan melalui torsi *density* dari *magnetic bevel gear* dan mekanik *bevel gear* bermaterial baja S45C yaitu 9088,2 dan 10130,4 Nm/m³. Namun, untuk volume yang sama, torsi maksimum dari *magnetic bevel gear* desain geometri 2 lebih tinggi dibandingkan torsi maksimum dari mekanik *bevel gear* bermaterial *stainless steel* yaitu untuk *magnetic bevel gear* 9,7244 Nm sedangkan mekanik *bevel gear stainless steel* 7,19 Nm.



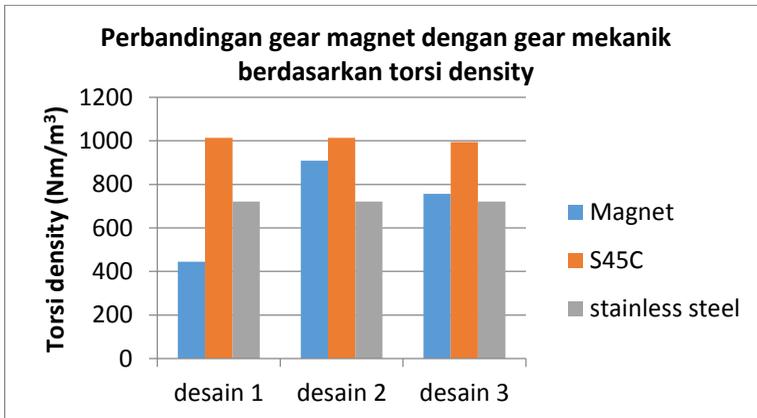
Gambar 4. 17 (a) Desain geometri 3 *magnetic bevel gear* (b) mekanik *bevel gear* (*crown gear*)

Tabel 4. 4 Perbandingan *magnetic gear* desain 3 dengan gear mekanik

Gear	Magnet	Mekanik		Satuan
	desain 3	S45C	<i>stainless steel</i>	
Module	-	3	3	mm
<i>allowable</i> torsi (T_{max})	7,6852	7,34	7,19	Nm
Volume	$10,15 \times 10^{-4}$	$7,38 \times 10^{-4}$	$9,97 \times 10^{-4}$	m ³
torsi <i>density</i>	7571,6	9945,8	7211,6	Nm/m ³

Gambar 4.17 merupakan gambar perbandingan antara desain geometri 3 *magnetic bevel gear* dan mekanik *bevel gear* (*crown gear*), ditunjukkan pada tabel 4.5 bahwa desain geometri 3 *magnetic bevel gear* untuk torsi yang sama dengan mekanik

bevel gear bermaterial baja S45C memiliki volume yang lebih besar, perbandingan volume antara keduanya yaitu 1,376256:1. Hal tersebut juga ditunjukkan melalui torsi *density* dari *magnetic bevel gear* dan mekanik *bevel gear* bermaterial baja S45C yaitu 7571,6 dan 9945,8 Nm/m³. Namun, untuk volume yang sama, torsi maksimum dari *magnetic bevel gear* desain geometri 3 memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan torsi maksimum dari mekanik *bevel gear* bermaterial *stainless steel* yaitu untuk *magnetic bevel gear* 7,6852 Nm sedangkan mekanik *bevel gear* *stainless steel* 7,19 Nm.

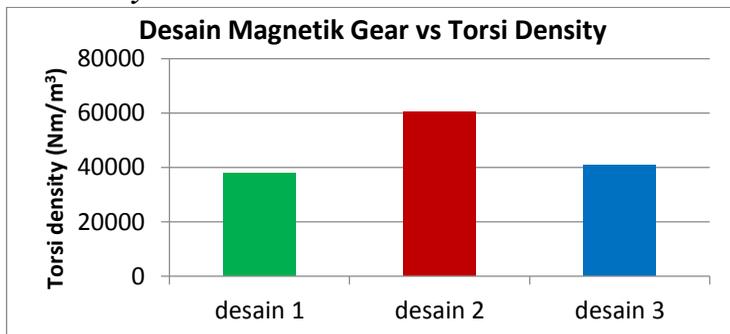


Gambar 4. 18 Perbandingan gear magnet dengan gear mekanik berdasarkan torsi density

Dari gambar 4.18 dapat kita ketahui bahwa desain geometri 2 untuk *magnetic bevel gear* merupakan desain yang paling optimal untuk mendapatkan torsi maksimum yang tinggi. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai torsi maksimum dari masing-masing desain, yaitu untuk desain 2 sebesar 9,7244 Nm sedangkan desain 1 dan 3 sebesar 9,2061 dan 7,6852 Nm. Pada desain geometri 2 perbandingan torsi *density*-nya dengan mekanik *bevel gear* bermaterial baja S45C yaitu 1 : 1,114676. Hal tersebut menunjukkan bahwa, torsi *density* dari *magnetic bevel gear*

menggunakan desain geometri 2 hampir menyamai atau mendekati torsi *density* mekanik bevel gear bermaterial baja S45C modul 3 mm, yang artinya kekuatan dari *magnetic gear* tersebut setara dengan mekanik gear bermaterial baja pada volume yang sama. Dan juga lebih kuat dari mekanik *bevel gear* bermaterial *sainless steel*. Dianalisis dari segi kinerja sistem berdasarkan beban penuh yang mampu diterima antara sistem gear magnet dengan mekanik. Dengan sistem *bevel gear* magnetik, jika beban melebihi batas maksimum, slip akan terjadi. Untuk sistem *bevel gear* mekanik, jika beban melebihi batas maksimum, akan terjadi kerusakan pada gigi-giginya. Hasil ini menunjukkan bahwa magnetik *bevel gear* dapat diterapkan secara dominan untuk semua aplikasi industri untuk mencapai kinerja transmisi torsi yang baik.

4.5 Perbandingan desain magnetik gear berdasarkan torsi *density*



Gambar 4. 19 Grafik desain gear magnet vs torsi *density*

Gambar 4.19 merupakan grafik torsi *density* dari masing-masing desain magnetik *bevel gear* berdasarkan volume total magnet permanen pada rotor HS-LS dan dapat diketahui bahwa desain magnetik *bevel gear* menggunakan geometri 2 memiliki torsi *density* yang terbesar yaitu 60621 Nm/m³. Berdasarkan persamaan 2.9 untuk torsi yang mampu ditransmisikan desain

magnetic bevel gear geometri 2 memiliki volume yang kecil yaitu untuk torsi maksimum sebesar 9,7244 Nm memiliki volume $1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Dibandingkan desain geometri 1 dan 3 yang memiliki torsi density yang lebih kecil. Pada desain geometri 1 dengan torsi density sebesar 37775 Nm/m^3 untuk torsi maksimum 9,2061 Nm memiliki volume $1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ dan pada desain geometri 2 dengan torsi density sebesar 40772 Nm/m^3 untuk torsi maksimum 7,6852 Nm memiliki volume sebesar $1,88 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Hal tersebut menunjukkan bahwa dalam pembuatan *magnetic gear* tipe *bevel* 90° disarankan untuk menggunakan desain geometri 2. Desain geometri 2 memiliki volume yang lebih kecil dan mampu mentransmisikan torsi yang relatif lebih besar yaitu 5,63 % lebih besar dari desain geometri 1 dan 26,5 % lebih besar dari geometri 3. Selain itu ditinjau dari fluks density-nya, pada desain geometri 2 mampu menghasilkan fluks density yang besarnya cenderung uniform pada rotor HS maupun LS yaitu pada rotor HS berkisar 0,2661-1,7942 T dan pada rotor LS berkisar 0,1449-1,3068 T yang dapat dilihat pada gambar 4.9, sehingga transfer torsi mampu berlangsung secara optimal. Sedangkan untuk desain geometri 1 dan 3 tidak disarankan, dikarenakan untuk torsi yang mampu ditransmisikan volume yang dimiliki relatif besar yaitu untuk desain geometri 1 memiliki volume 48,3 % lebih besar dari desain geometri 2 dengan T_{\max} sebesar 9,2061 Nm sedangkan desain geometri 3 memiliki volume 0,05 % lebih besar dari desain geometri 2 dengan T_{\max} sebesar 7,6852 Nm dan besar fluks density yang dihasilkan antara rotor HS dan LS cenderung tidak uniform, yaitu pada desain geometri 1 besar fluks density rotor HS berkisar 0,0849-1,2962 T dan rotor LS berkisar 0,0892-1,3684 T sedangkan pada desain geometri 3 besar fluks density pada rotor HS berkisar 0,0542-2,866 T dan rotor LS berkisar 0,1251-2,3854 T. Pada desain geometri 1 dan 3 terdapat beberapa bagian daerah pada magnet permanen yang memiliki nilai fluks density yang sangat kecil sehingga transfer torsi yang berlangsung kurang optimal. Hal tersebut menunjukkan bahwa desain geometri 1 dan 3 kurang efisien untuk digunakan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal yang penting pada penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Dari penelitian yang sudah dilakukan, didapatkan bahwa semakin dekat jarak *air gap* torsi maksimum yang di dapat semakin besar, dikarenakan semakin dekat jarak *air gap* semakin besar fluks *density air gap* (B_g) yang dihasilkan. Hal tersebut menyebabkan nilai magnetisasi semakin besar. Dan semakin besar nilai magnetisasi akan menyebabkan nilai torsi maksimum (T_{max}) semakin besar, sesuai dengan persamaan (2.9). Namun, pada jarak tertentu nilai torsi maksimum (T_{max}) yang didapatkan justru menurun yaitu pada jarak *air gap* 0,2 mm. Dengan hasil tersebut dapat dikatakan bahwa pada jarak itu diindikasikan bahwa sudah mulai terjadi kontak fisik antar gear magnet. Sedangkan, untuk torsi maksimum (T_{max}) terbesar didapatkan pada jarak *air gap* 0,5 mm dan jarak tersebut menjadi jarak maksimum untuk mendapatkan T_{max} yang optimal dari desain *magnetic bevel gear* yang dibuat.
2. Dengan dilakukannya penambahan jumlah magnet pada desain *magnetic bevel gear* yang dibuat didapatkan hasil, yaitu semakin banyak jumlah magnet yang digunakan semakin tinggi pula torsi maksimum (T_{max}) yang didapatkan. Hal tersebut dikarenakan semakin banyak jumlah magnet pada desain *magnetic bevel gear* semakin besar kerapatan fluks medan magnet yang dihasilkan, sehingga mempengaruhi besar torsi maksimumnya. Perubahan jumlah fluks medan magnet tersebut dapat dilihat pada gambar 4.9.
3. Setelah didapatkan data hasil berupa nilai T_{max} yang paling optimal dari desain geometri 1, 2, dan 3. Dilakukan

perbandingan dengan mekanik *bevel gear* sesuai *datasheet* yang sudah ada. Dilihat dari torsi *density*-nya dibandingkan dengan mekanik gear bermaterial baja S45C, *magnetic bevel gear* memiliki torsi *density* yang lebih kecil dan yang paling kecil dihasilkan oleh desain geometri 1. Sedangkan, dibandingkan gear mekanik bermaterial *stainless steel* untuk desain geometri 2 dan 3 memiliki nilai torsi *density* yang lebih besar artinya untuk torsi yang mampu ditransmisikan volume dari *magnetic bevel gear* lebih kecil dari pada mekanik *bevel gear*. Namun, pada desain geometri 1 torsi *density*-nya lebih besar dari mekanik *bevel gear*.

4. Dilihat pada gambar 4.19 berdasarkan torsi *density* dari ketiga desain geometri gear magnet, desain geometri 2 merupakan yang paling efisien dikarenakan untuk torsi yang mampu ditransmisikan memiliki volume yang kecil dibandingkan kedua desain lainnya yaitu dengan T_{\max} sebesar 9,7244 Nm dengan volume $1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan berikut adalah beberapa saran yang penulis anjurkan untuk dilakukan, yaitu:

1. Perlu dilakukannya pembuatan *prototype* untuk mengetahui apakah hasil simulasi yang didapatkan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.
2. Dalam pembuatan *motion band* pada *software ansys maxwell electromagnetik*, usahakan untuk membuatnya sesuai dengan bentuk geometri dari *magnetic bevel gear* yang dibuat agar mendapatkan hasil yang akurat.
3. Gunakan *time step* yang kecil pada proses analisis *transient* agar grafik torsi yang didapatkan membentuk pola gelombang yang bagus.

DAFTAR PUSTAKA

- Neuland, A. 1916. *Apparatus for transmitting power*. US Patent 117 1351.
- Auditia, C. 2017. Teori Dasar Kemagnetan. www.pdfdokumen.com. Diakses pada 18 Maret 2018.
- Armstrong, C. 1901. *Power Transmitting Device*. US patent 687 292.
- Muruganandam, G. dan Jayakumar, K. S. 2012. *A Novel Perpendicular Magnetic Gear with High Gear Ratio*. European Journal of Scientific Research. ISSN 1450-216X Vol.69 No.4, pp. 593-598.
- Muruganandam, G., Padma, S., dan Selvakumar, P. 2013. Design and Implementation of a Novel Magnetic *Bevel gear*. Salem, Tamilnadu, India: Sona Collage of Technology. Vol.15, No.2 pp. 30-37, 2013.
- Faus, H. 1941. *Magnet Gearing*. US Patent 2243 555.
- Jorgensen, F T. 2010. Design and Construction of Permanent Magnet Gear. Denmark: Aalborg University.
- Chau, K. T., Zhang, D., Jiang, J. Z., Liu, C., dan Zhang, Y.. 2007. *Design of a magnetic-gearing outer-rotor permanent magnet brushless motor for electric vehicles*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 43, pp. 2504–2506
- Jian, L. and Chau, K. 2009. *Analytical calculation of magnetic field distribution in coaxial magnetic gears*. Progress in Electromagnetics Research, PIER 92, pp. 1–16, 2009.
- Mousavi, S. 2015. *Design of New Type High Efficiency Magnetic Gear*. Istanbul Technical University.
- Laing, N. 1972. *Magnetic transmission*. US Patent 345 650.

- Laing, N. 1973. *Centrifugal pump with magnetic drive*. US Patent 3 762 839.
- Rand, S. 1970. *Magnetic Transmission System*. US Patent 3 523 204.
- Sutomo, S. 2012. *Pemodelan dan Simulasi Sistem Control Magnetic Levitation Ball*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Taufik, Mulyani, E., Santosa, S., dan Kusminarto. 2012. Analisis Komposisi Dan Kurva B-H Bahan Low Carbon Steel Pt. Krakatau Steel Menggunakan VSM Dan EDX Untuk Keperluan Desain Magnet Siklotron 13-MeV. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Akselerator dan Aplikasinya*. Januari 2012. 13.
- Wang, Y.-L. 2015. A wave energy converter with magnetic gear. *Ocean Engineering* , 1.
- Raj, Y., Nair, V.M., Varghese, L.K., Vincent, M., dan Wilson, D. 2016. *Magnetic Gearing System*. International Journal for Innovative Research in Science & Technology. IJRST, Vol.2 (12).
- Yao, Y. D., Huang, D. R., Hsieh, C. C., Chiang, D. Y., Wang, S. J., dan Ying, T. F. 1996. *The Radial Magnetic Coupling Studies of Perpendicular Magnetic Gears*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol.32, No.5.
- Kasim, M., Fitriana, dan Irasari, P. 2011. Analisis Pengaruh Rapat Fluks Celah Udara Terhadap Karakteristik Generator Magnet Permanent. *Ketenagalistrikan Dan Energi Terbarukan*, ISSN 1978-2365, Vol. 10, No. 2.

Lampiran 1

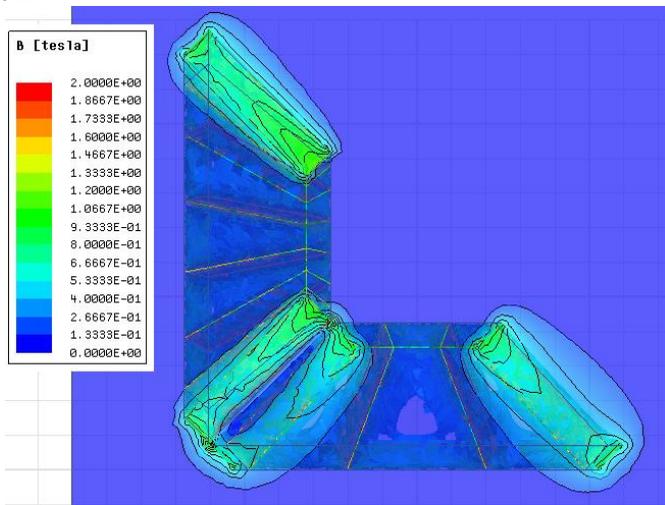
Data Hasil Simulasi

Geometri	Jumlah magnet		T_{\max}			
	HS	LS	<i>Air gap (0.2 mm)</i>	<i>Air gap (0.5 mm)</i>	<i>Air gap (1 mm)</i>	<i>Air gap (2 mm)</i>
Desain 1	4	8	6.9817	7.9189	7.4115	6.1991
	6	12	7.3748	8.6560	7.7201	6.5647
	8	16	7.6166	9.2061	8.2326	6.7533
Desain 2	4	8	6.2829	7.5030	6.7261	6.5006
	6	12	8.7932	9.2291	8.8057	7.2270
	8	16	9.4330	9.7244	9.3767	7.4022
Desain 3	4	8	6.4591	6.3998	5.8430	5.1129
	6	12	6.8188	6.7739	6.0350	5.3817
	8	16	7.5618	7.6852	6.9479	5.9594

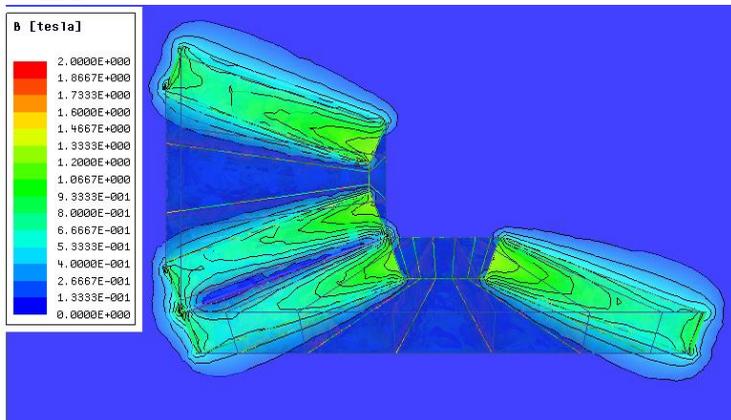
Lampiran 2

Plot garis fluks *density* desain geometri 1, 2, dan 3 pada variasi jumlah magnet untuk HS-LS yaitu 8-16 dengan air gap 0.5 mm.

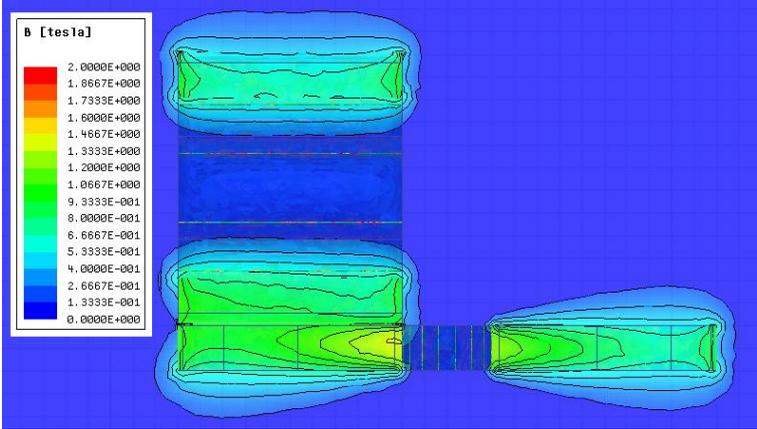
Desain 1



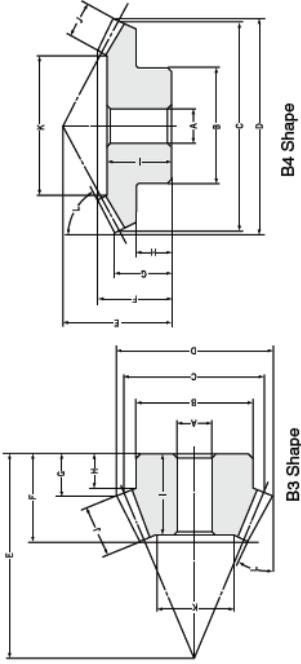
Desain 2



Desain 3

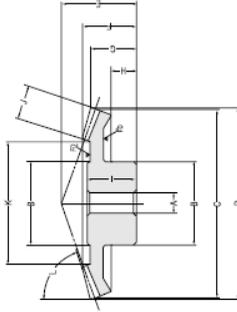


Lampiran 3



Gear Ratio 2 ■ Modules 1-8

Catalog No.	Module m	No. of teeth z	Bore A-r7	Hub dia. B	Pitch dia. C	Outside dia. D	Mounting distance E	Total length F	Gear's face length G	Hub width H	Length of bore I	Face width J
SB1 -4020	1	40	8	25	40	40.59	22	15.07	12.59	8	12	6
SB1 -2040		20	6	16	20	22.41	28	13.78	8.6	7	12	
SB1.25-4020	1.25	40	10	32	50	50.73	27	18.54	15.23	10	16	8
SB1.25-2040		20	8	22	25	28.01	36	18.66	11.75	10.25	17	
SB1.5 -4020	1.5	40	10	38	60	60.88	35	25.01	20.88	15	22	10
SB1.5 -2040		20	8	25	30	33.61	46	25.54	16.9	14.75	24	
SB2 -4020	2	40	12	40	80	81.17	45	32.37	26.17	18	27	15
SB2 -2040		20	12	32	40	44.81	60	34.16	21.2	18	32	
SB2.5 -4020	2.5	40	15	50	100	101.46	55	39.73	31.46	20	35	20
SB2.5 -2040		20	12	40	50	56.01	75	43.78	26.5	22.5	41	
SB3 -4020	3	40	20	60	120	121.76	65	45.85	36.76	24	38	22
SB3 -2040		20	16	50	60	67.22	90	50.81	31.8	27.5	47	
SB4 -4020	4	40	20	70	160	162.34	80	53.92	42.34	28	45	28
SB4 -2040		20	20	60	80	89.62	120	66.59	42.41	35	62	28



B5 Shape (Type SB)

*FD has die-forged finish.

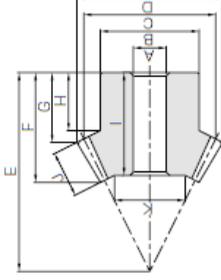
Specifications

Precision grade	JIS B 1704 grade 3	Tooth hardness	Less than 194HB
Heat treat	Gleason	Surface treatment	Black oxide
Pressure angle	20°	Tooth surface finish	Cut
Material	S45C	Heat treatment volume per cutting	Bore
Heat treatment	—	Secondary Operations	Possible

K	Holding surface etc.	Face angle	Shape	Allowable torque (N·m) max.		Allowable torque (kgf·m)		Backlash (mm)	Weight (kgf)	Cutting No.
				Bending strength	Surface durability	Bending strength	Surface durability			
26.98	65°36'	B4	B4	2.613	0.2932	(0.2665)	(0.0299)	0.03 ~ 0.13	0.07	SB1 -4020
9.17	30°29'	B3	B3	1.316	0.1471	(0.1342)	(0.015)		0.02	SB1 -2040
33.61	65°36'	B4	B4	5.334	0.6139	(0.5439)	(0.0626)	0.04 ~ 0.14	0.14	SB1.25-4020
13.22	30°29'	B3	B3	2.686	0.3069	(0.2739)	(0.0313)		0.05	SB1.25-2040
39.64	65°36'	B4	B4	9.467	1.112	(0.9654)	(0.1134)	0.05 ~ 0.15	0.23	SB1.5 -4020
17.28	30°29'	B3	B3	4.768	0.556	(0.4862)	(0.0567)		0.09	SB1.5 -2040
48.46	65°36'	B4	B4	24.15	2.919	(2.463)	(0.2977)	0.06 ~ 0.16	0.5	SB2 -4020
20.92	30°29'	B3	B3	12.16	1.459	(1.24)	(0.1488)		0.2	SB2 -2040
60.28	65°36'	B4	B4	48.97	6.043	(4.994)	(0.6162)	0.07 ~ 0.17	1.1	SB2.5 -4020
24.56	30°29'	B3	B3	24.66	3.021	(2.515)	(0.3081)		0.4	SB2.5 -2040
73.81	65°36'	B4	B4	80.41	10.12	(8.2)	(1.082)	0.08 ~ 0.18	1.9	SB3 -4020
29.61	30°29'	B3	B3	40.3	5.061	(4.13)	(0.5161)		0.7	SB3 -2040
102.39	65°36'	B4	B4	185.2	24.08	(18.89)	(2.456)	0.12 ~ 0.27	3.3	SB4 -4020
42.78	30°29'	B3	B3	93.27	12.04	(9.511)	(1.228)		1.5	SB4 -2040

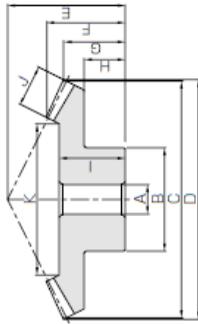


Specifications	
Precision grade	JIS B 1704 : 1976 grade 3
Gear teeth	Gleason
Pressure angle	20°
Material	SUS303
Heat treatment	—
Tooth hardness	(less than 187HB)



83

Catalog No.	Gear ratio	Module	No. of teeth	Shape	Bore A ₁₇₇	Hub dia. B	Pitch dia. C	Outside dia. D	Mounting distance E	Total length F	Crown to back length G	Hub width H
SUB1.5-3020	1.5	m1.5	30	B4	10	30	45	46.24	28	18.53	13.93	8
SUB1.5-2030			20	B3	8	25	30	33.13	33	18.63	11.54	8.83
SUB2-3020			30	B4	10	35	60	61.65	40	26.87	21.24	15
SUB2-2030			20	B3	10	35	40	44.18	45	25.06	16.39	13.33
SUB2.5-3020	1.5	m2.5	30	B4	15	45	75	77.07	50	34.22	26.55	18
SUB2.5-2030			20	B3	12	40	50	55.22	55	31.06	19.24	14.16
SUB3-3020			30	B4	15	60	90	92.48	55	35.56	26.86	17
SUB3-2030			20	B3	15	50	60	66.27	70	40.48	27.09	21.66
SUB1.5-4020	2	m1.5	40	B4	10	38	60	60.88	35	25.01	20.88	15
SUB1.5-2040			20	B3	8	25	30	33.61	46	25.54	16.9	14.75
SUB2-4020			40	B4	12	50	80	81.17	45	32.37	26.17	18
SUB2-2040			20	B3	12	32	40	44.81	60	34.16	21.2	18
SUB2.5-4020	2	m2.5	40	B4	15	60	100	101.46	55	39.73	31.46	20
SUB2.5-2040			20	B3	12	40	50	56.01	75	43.78	26.5	22.5
SUB3-4020			40	B4	20	70	120	121.76	65	45.85	36.76	24
SUB3-2040			20	B3	16	50	60	67.22	90	50.81	31.8	27.5



B4

Length of bore	Face width		Holding surface is		Allowable torque (N·m)		Allowable torque (kgf·m)		Backlash (mm)	Weight (kg)	Catalog No.
	I	J	K	Bending strength	Surface durability	Bending strength	Surface durability				
16	9	27.37	3.22	0.46	0.33	0.047	0.12	SUB1.5-3020	0.05~0.15	0.12	SUB1.5-3020
17	9	17.05	2.23	0.31	0.23	0.032	0.063	SUB1.5-2030		0.063	SUB1.5-2030
23	11	37.56	7.22	1.08	0.74	0.11	0.26	SUB2-3020	0.06~0.16	0.26	SUB2-3020
22	11	21.34	5.01	0.72	0.51	0.074	0.16	SUB2-2030		0.16	SUB2-2030
30	15	45.61	14.9	2.28	1.52	0.23	0.54	SUB2.5-3020	0.07~0.17	0.54	SUB2.5-3020
28	15	27.42	10.3	1.52	1.05	0.15	0.28	SUB2.5-2030		0.28	SUB2.5-2030
31	17	57.14	24.8	3.87	2.53	0.39	0.94	SUB3-3020	0.08~0.18	0.94	SUB3-3020
37	17	34.71	17.2	2.58	1.76	0.26	0.55	SUB3-2030		0.55	SUB3-2030
22	10	39.64	5.23	0.79	0.53	0.081	0.27	SUB1.5-4020	0.05~0.15	0.27	SUB1.5-4020
24	10	17.28	2.64	0.40	0.27	0.040	0.088	SUB1.5-2040		0.088	SUB1.5-2040
27	15	48.46	13.4	2.07	1.36	0.21	0.61	SUB2-4020	0.06~0.16	0.61	SUB2-4020
32	15	20.92	6.72	1.04	0.69	0.11	0.19	SUB2-2040		0.19	SUB2-2040
35	20	60.28	27.1	4.29	2.76	0.44	1.21	SUB2.5-4020	0.07~0.17	1.21	SUB2.5-4020
41	20	24.56	13.6	2.15	1.39	0.22	0.40	SUB2.5-2040		0.40	SUB2.5-2040
38	22	73.81	44.4	7.19	4.53	0.73	1.86	SUB3-4020	0.08~0.18	1.86	SUB3-4020
47	22	29.61	22.4	3.60	2.28	0.37	0.69	SUB3-2040		0.69	SUB3-2040

BIODATA



Penulis tugas akhir ini bernama Gustri Erwin Rasyidwanto. Tugas Akhir ini diselesaikan sebagai persyaratan untuk kelulusan S-I di Teknik Mesin ITS. Penulis dilahirkan di Tuban, 03 April 1994, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu SDN Kebonsari 01 Tuban, SMPN 01 Tuban, dan SMAN 01 Tuban. Pada tahun 2013 Penulis diterima di Jurusan D-III Teknik Mesin FTI-ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 2113 030 089. Konversi Energi merupakan bidang studi yang dipilih penulis. Pada tahun 2016 penulis diterima di program lintas jalur jurusan S-I Teknik Mesin FTI-ITS dan terdaftar sebagai mahasiswa dengan NRP 02111645000034.

Selama duduk di bangku kuliah D-III penulis aktif mengikuti kegiatan perkuliahan. Penulis juga pernah mengikuti berbagai kegiatan dan bergabung dalam organisasi. Kegiatan yang pernah diikutinya antara lain : Menjadi Staff Badan Semi Otonom Pers Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Mesin FTI-ITS 2014-2015 , Staf Departemen Lingkar Kampus HMDM FTI-ITS 2014-2015, dan Kabiro Hubungan Dalam Departemen HUMAS Himpunan Mahasiswa D3 Teknik Mesin FTI-ITS 2015-2016. Menjadi ASLab Mekatronika D3 Teknik Mesin FTI-ITS.

Email : gustri.erwin@gmail.com