

## TUGAS AKHIR - TM 141585

# ANALISIS PENGARUH VARIASI AIR GAP DAN RADIUS ENVELOPE TERHADAP TORSI MAGNETIC WORM GEAR

CHRISTIAN ROBBY SILALAHI NRP 02111645000021

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 DAN RADIUS ENVELOPE TERHADAP TORSI MAGNETIC WORM GEAR

CHRISTIAN ROBBY SILALAHI NRP 02111645000021

Dosen Pembimbing Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

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



FINAL PROJECT - TM 141585

# AN ANALYSIS OF THE EFFECT OF AIR GAP AND ENVELOPE RADIUS VARIATION TO MAGNETIC WORM GEAR TORQUE

CHRISTIAN ROBBY SILALAHI NRP 02111645000021

Dosen Pembimbing Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT Faculty of Industrial Technology Sepuluh Nopember Institute of Technology Surabaya 2018

#### ANALISIS PENGARUH VARIASI AIR GAP DAN RADIUS ENVELOPE TERHADAP TORSI MAGNETIC WORM GEAR

#### 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: CHRISTIAN ROBBY SILALAHI NRP. 021116 45 000021



SURABAYA JULI, 2018

### ANALISIS PENGARUH VARIASI AIR GAP DAN RADIUS ENVELOPE TERHADAP TORSI MAGNETIC WORM GEAR

Nama Mahasiswa	: Christian Robby Silalahi
NRP	: 02111645000021
Jurusan	: Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing	: Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

#### ABSTRAK

Roda gigi adalah yang transmisi daya dan gerak yang kelebihan dibandingkan transmisi memiliki ienis lain. diantaranya reliability yang lebih tinggi, kemampuan menerima beban yang tinggi, efisiensi baik karena kemungkinan slip kecil. dan sistem transmisi ringkas dengan putaran dan daya yang besar. Roda gigi cacing (worm gear) dimanfaatkan untuk mereduksi kecepatan tinggi menjadi rendah dan menghasilkan torsi yang besar, dan juga untuk merubah arah gearakan. Hampir di setiap mesin terdapat sistem transmisi sehingga sangat keberadaannya. Roda penting gigi magnetik adalah pengembangan dari roda gigi mekanik dimana roda gigi magnetik memiliki keunggulan diantaranya non-contact sehingga tidak ada gesekan, panas, dan noise yang ditimbulkan. Khusus untuk worm gear magnetik masih sangat jarang dilakukan penelitian. Oleh karena itu perlu diadakan penelitian lebih lanjut mengenai roda gigi magnetik terutama pada roda gigi cacing (worm gear).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh dari airgap dan radius envelope worm gear terhadap torsi yang dihasilkan. Pada bagian worm didesain dengan membuat adanya envelope. Desain dari worm gear magnetik ini adalah dengan memanfaatkan magnetisasi internal surface yang bertujuan agar semakin banyak bagian dari worm dan worm wheel yang saling berinteraksi. Selain itu juga untuk mengetahui perbandingan antara magnetic worm gear dengan mechanic worm gear pada volume density yang sama. Material magnet yang digunakan adalah permanen material magnet NdFeB (neodymium) dengan variasi air gap yang digunakan adalah 0,75 mm, 1 mm, dan 1,25 mm. Pada bagian worm (batang cacing) jumlah polenya 1, dan tetap di setiap analisis. Kemudian juga dilakukan analisis dengan variasi envelope pada worm yaitu R=170 mm, R=180 mm, dan R=190 mm pada masing-masing air gap. Analisis ini dilakukan dengan metode finite element dan menggunakan software Ansys Maxwell.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini berupa grafik perbandingan torsi maksimum terhadap air gap, dan perbandingan torsi maksimum terhadap radius envelope dan distribusi flux density. Torsi maksimum yang diperoleh di adalah 9,3 Nm yang didapatkan pada pengujian envelope worm radius 190 mm dengan air gap 0,75 mm. volume density-nya adalah sebesar 1,377 KNm/m<sup>3</sup>. Gear mekanik yang setara dengan hasil worm gear magnetik ini adalah High Impact Polystyrene dengan modul 0,6 mm.

### Kata kunci : magnetic worm gear, finite element, air gap, pole, envelope

### AN ANALYSIS OF THE EFFECT OF AIR GAP AND ENVELOPE RADIUS VARIATION TO MAGNETIC WORM GEAR TORQUE

Student Name	: Christian Robby Silalahi
NRP	: 02111645000021
Major	: Mechanical Engineering FTI-ITS
Advisor	: Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

#### ABSTRACT

The gears are transmission of power and motion that have adventages over other types of transmissions, including higher reliability, high load-receiving capability, good efficiency due to the possibility of small slippage, and a compact transmission system with large rotation and power. The worm gear is used to reduce high speed to low and produce large torque, and also to change the direction of the movement. There is a transmission system almost in every machine, so the existence is very important. Magnetic gears are the development of mechanical gears where the magnetic gears have the advantage of being noncontact so that there is no friction, heat, and noise are generated. Especially, research about magnetic worm gear is still very rarely conducted. Therefore, it is necessary to hold further research on magnetic gears especially on worm gear.

This study aims to analyze the effect of air gap and envelope worm gear radius on the resulting torque. The worm is designed to make the envelope. The design of this magnetic worm gear is to utilize the internal magnetization of the internal surface which purposes to make more parts of the worm and worm wheel interact with each other. In addition, it is used to know the comparison between magnetic worm gear with mechanic worm gear on the same volume density. The magnetic material used is permanent NdFeB (neodymium) magnetic material with variation of air gap used is 0.75 mm, 1 mm, and 1.25 mm. In the worm, the number of pole is 1, and remain in each analysis. Then, an analysis with envelope variation of the worm is conducted by using R = 170 mm, R = 180 mm, and R = 190 mm in each air gap. This analysis is done by using the finite element method and Ansys Maxwell software.

The result obtained from this study is the fraph of comparison of maximum torque to air gap, and the ratio of maximum torque to envelope radius and flux density distribution. The maximum torque obtained at 9,3 Nm which is obtained on the trial test of 190 mm radius with 0.75 mm gap air, the density volume is 1.377 KNm /  $m^3$ . Mechanical gear equivalent to the results of this magnetic gear worm is High Impact Polystyrene with a module of 0.6 mm.

# Keywords: magnetic worm gear, finite element, air gap, pole, envelope

# KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Tuhan Yesus atas penyertaan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul "Analisis Pengaruh Variasi *Air Gap* dan Radius *Envelope* terhadap Torsi *Magnetic Worm Gear*" selesai sesuai dengan harapan. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini, antara lain:

- 1. Orangtua serta adik-adik terkasih dan seluruh keluarga besar yang selalu memberikan dukungan, doa dan segalanya kepada saya.
- 2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam memberikan masukan dan saran dalam penyusunan tugas akhir ini.
- 3. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Eng,Sc., Ph.D selaku ketua jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- 4. Dr. Eng. Sutikno, ST, MT selaku dosen wali yang memberikan arahan, bimbingan, dan dukungan selama berada di kampus ini.
- 5. Semua anggota kabinet komting ITS yang selalu dan saling mendukung selama berada di kampus ini.
- 6. Semua teman-teman bimbingan Bapak Agus Sigit dan juga teman-teman *magnetic gear* yang sangat membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Terutama kepada gustri, doni, alfi, tiar, fisa terimakasih untuk ilmu, masukan, dukungan, dan bantuannya.
- 7. Seluruh tema-teman LJ 2016 yang saya banggakan, yang selalu memberikan dukungan dan semangat.

- 8. Seluruh civitas akademika Jurusan Teknik Mesin yang telah ramah kepada saya selama menempuh pendidikan di kampus yang tercinta.
- 9. Yang tersayang Zefanya Alanza Christabel Loveldy, terimakasih telah mendukung dan memberi semangat, selalu sabar dan mau mendengarkan keluh kesah penulis selama menyelesaikan tugas akhir ini.

Akhir kata penulis berharap tugas akhir ini dapat berguna untuk semuanya. Penulis meminta maaf apabila dalam tugas akhir ini masih ditemui banyak kesalahan. Kritik dan saran yang membangun penulis harapkan agar dapat memperbaiki diri kembali.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

# **DAFTAR ISI**

LEMBAR	PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	r 	iii
KATA PEN	NGANTAR	vii
DAFTAR I	[SI	ix
DAFTAR (	GAMBAR	xi
DAFTAR 1	ГАВЕЬ	xiii
BAB I		1
PENDAHU	JLUAN	1
1.1 Latar	Belakang	1
1.2 Rumu	ısan Masalah	3
1.3 Batas	an Masalah	
1.4 Tujua	n Penelitian	4
1.5 Manfa	aat Penelitian	4
<b>BAB II</b>		5
TINJAUA	N PUSTAKA	5
2.1 Magn	et	5
2.1.1	Karakteristik Magnet Permanen	6
2.1.2	Magnet Neodymium (NdFeB)	11
2.2 Roda	Gigi	12
2.2.1	Worm Gear	13
2.2.2	Magnetic Gear	19
2.2.3	Dasar Perhitungan Magnetic Gear	
2.3 Finite	e Element Method (FEM)	
2.4 Studi	Literatur	
BAB III		
METODO	LOGI	
3.1 Flowe	chart Penelitian	
3.2 Varia	bel Penelitian	
3.2.1	Variabel Kontrol	
3.2.2	Variabel Moderator	

3.2.3	Variabel Respon	42
3.3 Perala	atan Penelitian	42
3.3.1	Perangkat Keras	42
3.3.2	Perangkat Lunak	43
3.4 Langl	cah Penelitian	43
3.4.1	Studi Literatur	43
3.4.2	Pemodelan Magnetic Gear	44
3.4.3	Pre-processing	45
3.4.4	Processing	48
3.4.5	Post-Processing	49
3.5 Metoo	de Analisis dan Pembahasan	50
3.6 Diagr	am Alir Proses Simulasi	50
BAB IV		53
ANALISIS	DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Data	Hasil Simulasi	53
4.2 Anali	sis Pengaruh Variasi Air gap terhadap Torsi	55
4.3 Anali	sis Pengaruh Radius Envelope terhadap Tors	si62
4.4 Perba	ndingan antara Magnetic Worm Gear dengan	n
Mech	anical Worm Gear	69
BAB V		71
KESIMPU	LAN DAN SARAN	71
5.1 Kesin	mpulan	71
5.2 Sarai	n	72
DAFTAR I	PUSTAKA	73
LAMPIRA	N	75
<b>BIODATA</b>	PENULIS	77

# DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Magnet	5
Gambar 2. 2 Kurva Histerisis (Taufik, 2012)	8
Gambar 2. 3 Perkembangan material berdasarkan produksi energi	i
maksimum yang dihasikan	9
Gambar 2. 4 Magnet neodymium (Shewane.P, 2014)12	2
Gambar 2. 5 Jenis-jenis roda gigi13	3
Gambar 2. 6 worm gear14	4
Gambar 2. 7 Gerakan pasangan worm gear (Jelaska.D, 2012) 14	4
Gambar 2. 8 Garis kontak pada worm dan worm gear set1	5
Gambar 2. 9 Dimensi worm gear1!	5
Gambar 2. 10 Gaya-gaya yang diberikan pada worm oleh worm	
gear1	7
Gambar 2. 11 Magnetik gear pertama19	9
Gambar 2. 12 Magnetik permanen gear jenis spur20	0
Gambar 2. 13 Topologi magnetik <i>gear</i> berdasarkan mekanikal	
Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear	1
Gambar 2. 13 Topologi magnetik <i>gear</i> berdasarkan mekanikal <i>gear</i> 2: <i>Gambar 2. 14 Concentric, harmonic dan planetary magnetik</i>	1
Gambar 2. 13 Topologi magnetik <i>gear</i> berdasarkan mekanikal <i>gear</i> 2: <i>Gambar 2. 14 Concentric, harmonic dan planetary magnetik</i> <i>gear</i> 2:	1 1
Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear	1
Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear	1
Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear	1
Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear	1 1 2
Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear	1 1 2 3
<ul> <li>Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear</li></ul>	1 1 2 3 6
Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear	1 1 2 3 6 1
Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear	1 1 2361 5
<ul> <li>Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear</li></ul>	1 1 23615
<ul> <li>Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear</li></ul>	1 23615 6
<ul> <li>Gambar 2. 13 Topologi magnetik gear berdasarkan mekanikal gear</li></ul>	1 23615 6

Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	41
Gambar 3. 2 Desain worm 2D dan 3D	44
Gambar 3. 3 Desain 3D worm wheel	45
Gambar 3. 4 Assembly 3D magnetic worm gear	46
Gambar 3. 5 Penentuan material dan penyusunan kutub magnet	47
Gambar 3. 6 Gambar 3.6 Pembuatan region pada worm	47
Gambar 3. 7 Pengaturan motion pada magnetic worm gear	49
Gambar 3. 8 Diagram alir proses simulasi	52
Gambar 4. 1 Desain geometri magnetic worm gear	53
Gambar 4. 2 Grafik torsi terhadap waktu hasil simulasi	54
Gambar 4. 3 Distribusi flux density pada magnetic worm gear	54
Gambar 4. 4 Grafik torsi terhadap <i>air-gap</i> pada <i>envelope</i> R170	
mm	55
Gambar 4. 5 Grafik torsi terhadap <i>air-gap</i> pada <i>envelope</i> R180	
mm	56
Gambar 4. 6 Grafik torsi terhadap air-gap pada envelope R190	
mm	57
Gambar 4.7 Perubahan distribusi flux density dengan variasi	59
Gambar 4. 8 Distribusi <i>flux density</i> 2 dimensi pada kondisi <i>air</i>	
<i>gap</i> a) 0,75 mm, dan b) 1 mm	60
Gambar 4. 9 a) Grafik <i>flux density</i> pada arah x, y, dan z	62
Gambar 4. 10 Grafik perbandingan Tmax terhadap envelope	63
Gambar 4. 11 distribusi <i>flux density</i> pada kondisi 2 dimensi	
envelope a). 190 mm dan b) 170 mm	65
Gambar 4. 12 Perubahan distribusi flux density dengan variasi	67
Gambar 4. 13 a) Grafik Flux density pada arah x, y, dan z	68
Gambar 4. 14 a) mechanical worm gear, dan b) magnetic worm	
gear	69

# **DAFTAR TABEL**

Tabel 2. 1 Karakteristik material magnet permanen	10
Tabel 2. 2 Keuntungan dan kerugian material magnet	10
Tabel 2. 3 Sifat fisik magnet NdFeB	12
Tabel 3. 1 Besaran properti worm	44
Tabel 3. 2 Besaran properti worm wheel	45
Tabel 3. 3 variasi air-gap pada gear pada tiap percobaan	45
Tabel 3. 4 Variasi radius worm pada tiap percobaan	46
Tabel 3. 5 Lembar Data penelitian	50
Tabel 4. 1 Data torsi maksimum hasil simulasi	55
Tabel 4. 2 Perbandingan gear mekanik dan gear magnetik	69

# BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Setelah magnet alam pertama kali ditemukan, magnet hanya dimanfaatkan sebagai kompas penunjuk arah mata angin. Sifat magnet yang unik adalah tolak menolak antar dua kutub yang sama dan tarik menarik antara dua kutub yang berbeda dan. Keunikan dari magnet kemudian mulai menarik perhatian peneliti dan mengembangkannya di bidang-bidang lain seperti kesehatan, kelistrikan, mekanik, dan bidang lainnya.

Di sisi lain, perkembangan teknologi khususnya bidang mekanik terjadi dengan sangat pesat. Sistem mekanik itu sendiri sangat erat kaitannya dengan sistem pemindah dan penggerak. Hampir di setiap konstruksi mesin terdapat sistem-sistem transmisi yang berfungsi untuk memindahkan daya, merubah arah, merubah kecepatan, dan lainnya. Salah satu transmisi yang paling banyak digunakan di konstruksi mesin adalah roda gigi. Dibandingkan dengan transmisi lain, roda gigi memiliki beberapa kelebihan diantaranya *reliability* yang lebih tinggi, kemampuan menerima beban yang tinggi, efisiensi baik karena kemungkinan slip kecil, dan sistem transmisi ringkas dengan putaran dan daya yang besar.

Dalam prosesnya, roda gigi yang bekerja dengan saling kontak antar gigi, dan sangat banyak digunakan dalam putaran tinggi maupun pemindah daya yang cukup besar. Hal tersebut menjadikan salah satu kerusakan yang paling sering terjadi pada roda gigi adalah diakibatkan dari gesekan antar gigi diantaranya *pitting, scoring* maupun gigi patah, selain kesalahan-kesalahan (*error*) dalam perancangan, pemasangan, dan manufaktur roda gigi. Hal tersebut berpengaruh terhadap kinerja roda gigi, menyebabkan *noise* dan getaran yang berlebih.

Roda gigi cacaing (*worm gear*) adalah roda gigi yang digunakan untuk mentransmisikan dengan hasil perbandingan reduksi yang besar hingga 1:300. Maka roda gigi cacing dapat

menghasilkan putaran rendah namun mendapatkan torsi yang tinggi. Karakteristik dari roda gigi cacing itu sendiri kemudian dimanfaatkan di berbagai bidang. Rasio *gear* yang besar membuat *gear* ini meghasilkan pekerjaan yang presisi sehingga dimanfaatkan dalam permesinan. Begitu juga dengan pekerjaanpekerjaan tambang dan konstruksi dan mesin uji puntir memanfaatkan roda gigi ini karena dapat menghasilkan torsi yang sangat besar. Kekurangan roda gigi jenis ini adalah adanya gesekan yangn cukup besar antar gigi. Hat tersebut terjadi karena beban besar yang harus ditransmisikan. Akibat dari gesekan yang cukup besar, dapat menimbulkan banyak panas, keausan, sehingga membutuhkan pelumasan dan perawatan yang intens.

Kerusakan-kerusakan pada roda gigi yang diakibatkan oleh kontak dan gesekan dapat diatasi dengan memanfaatkan sifat dari magnet yang dapat menghasilkan daya. Dengan merancang pemindah daya menggunakan magnet, maka dihasilkan suatu transmisi nonkontak, sehingga tidak dibutukan pelumasan yang biasa dilakukan pada transmisi mekanik biasa. Amstrong.C (1901) pertama kali memperkenalkan konsep roda gigi noncontact dengan membuat elektromagnetic gear, dimana salah satu roda gigi dibuat dengan elektromagnet dan satunya adalah steel. Kemudian dilakukan pengembangan-pengembangan magnetic gear seperti yang dilakukan Wu dan Wang (2015) yang melakukan analisis pada magnetic spur gear dengan material permanent magnet. Wu dan Wang menganalisis pengaruh air-gap terhadap torsi yang dianalisis menggunakan metode finite element. Untuk roga gigi cacing magnetik sendiri telah dilakukan pengembangan yaitu pada paper Shinki Kikuchi dan Katsuo Tsurumoto (1993) yang membuat percobaan dengan desain internal worm gear magnetic, dimana desain ini membuat meshing pada permukaan menjadi lebih besar dan mereduksi dimensi gear.

Seperti diketahui, *worm gear* telah banyak digunakan di industri karena kelebihannya terutama sebagai pereduksi kecepatan dengan torsi yang besar. Pengembangan *worm gear*  dengan material magnet permanen layak untuk dipertimbangkan untuk kemajuan teknologi, namun masih sedikit jurnal atau buku yang membahas mengenai *worm gear* magnetik. Perlu diadakan penelitian lebih lanjut mengenai magnetik *worm gear* dengan membandingkan jarak (*air-gap*) antara *internal worm wheel* dan *worm*, dan juga menganalisis pengaruh dari *envelope worm*. Untuk itu dilakukanlah penelitian tentang **"Analisis Pengaruh Variasi** *Air Gap* dan Radius *Envelope* Terhadap Torsi *Magnetic Worm Gear*". Diharapkan dengan penelitian ini, dapat menghasilkan informasi dan pengetahuan mengenai magnetik *gear* khususnya jenis *worm gear* untuk perkembangan teknologi kedepannya.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

- 1. Bagaimana pengaruh *air gap* pada *magnetic worm gear* terhadap torsi yang dihasilkan?
- 2. Bagaimana pengaruh *envelope* pada *worm wheel* terhadap torsi yang dihasilkan?
- 3. Bagaimana perbandingan *torsi density* yang dihasilkan dari *mechanical worm gear* dan *magnetic worm gear* pada rasio yang sama?

## 1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- 1. Bahan magnet yang digunakan adalah magnet permanen NdFeB
- 2. Tipe roda gigi yang dimodelkan adalah worm gear
- 3. Rasio roda gigi yang digunakan adalah 60:1
- 4. Analisis yang digunakan adalah analisis finite element
- 5. *Software* yang digunakan untuk melakukan analisis adalah *Ansys Maxwell*
- 6. Media di sekitar roda gigi adalah udara

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian pada Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

- 1. Mengetahui pengaruh *air gap* pada *magnetic worm gear* terhadap torsi yang dihasilkan
- 2. Mengetahui pengaruh ukuran *envelope* pada *worm wheel* terhadap torsi yang dihasilkan
- 3. Mengetahui perbandingan *torsi density* yang dihasilkan dari *mechanical worm gear* dan *magnetic worm gear* pada rasio yang sama

# 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dati Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

- 1. Mengetahui perbandingan antara *mechanical gear* dan *magnetic gear* berupa kelebihan masing-masing.
- 2. Menambah pengetahuan tentang ilmu magnetik
- 3. Sebagai referensi untuk kedepannya

# BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Magnet

Magnet adalah benda (material) yang memiliki kemampuan untuk menarik benda lain, dapat terbuat dari bahan besi dan campuran logam. Setiap magnet terdiri dari sepasang kutub, yaitu utara dan selatan. Benda yang mengandung unsur logam dapat tertarik lebih kuat dibanding benda lainnya. Namun tidak semua logam dapat ditarik dengan daya tarik yang sama oleh magnet. Material yang mempunyai daya tarik magnet magnet yang kuat adalah baja dan besi. 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. Secara sederhana, magnet dan kutubnya dapat dilihat ada gambar 2.1.



Gambar 2. 1 Magnet

Berdasarkan sifat kemagnetannya, magnet dapat dibagi menjadi magnet permanen dan magnet sementara. Magnet permanen adalah magnet yang mampu mempertahankan kekuatan gaya magnetnya dalam jangka waktu yang lama dan terbuat dari suatu bahan feromagnetik, sedangkan magnet sementara adalah suatu magnet yang akan menjadi magnet jika ditempatkan di dalam medan magnet sehingga material magnet akan berlangsung selama medan magnet eksternal diaktifkan, dan akan menghilang saat medan magnet eksternal tersebut tidak diaktifkan.

### 2.1.1 Karakteristik Magnet Permanen

Magnet permanen adalah magnet dengan medan magnet yang tidak hilang dalam keadaan normal. Magnet permanen terbuat dari bahan feromagnetik yang tahan terhadap demagnetisasi. Beberapa karakteristik dari magnet permanen adalah:

#### a. Induksi remanen

Induksi remanen adalah induksi magnetik yang tertinggal dalam sirkuit magnetik (besi lunak) setelah ditiadakan/dihilangkan pengaruh bidang magnetiknya. Ketika arus dialirkan pada sebuah kumparan yang melilit besi lunak makan terjadi orientasi partikel-partikel yang ada dalam besi. Orientasi ini mengubah/mengarahkan pada kutub utara dan selatan. Untuk satuan unitnya dalam SI adalah Tesla (T) atau Wb/m<sup>2</sup>, sedangkan dalam satuan *British* adalah Gauss (G).

### b. Koefisien Temperatur

Koefisien temperatur menjelaskan tentang perubahan sifat magnetik yang berhubungan dengan perubahan suhu. Semakin tinggi koefisien temperatur suatu material magnet, semakin sensitif pula magnet tersbeut terhadap temperatur. Begitu pun sebaliknya semakin rendah koefisien temperatur suatu magnet, semakin tidak sensitif magnet tersebut terhadap temperatur.

### c. Permeabilitas magnet

Permeabilitas adalah parameter bahan yang menentukan besarnya fluks magnetik. Untuk menghitung nilai permeabilitas magnet pada suatu bahan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{2.1}$$

Dimana

 $\mu$ : permeabilitas magnet (Wb/Am)

B: rapat fluks magnetik (Tesla)

H: kuat medan magnet (A/m)

Rasio perbandingan antara rapat fluks magnetik dengan kuat medan magnet disebut permeabilitas, nilai rasio perbandingan rapat fluks magnetik dengan kuat medan magnet yang tinggi di kurva histerisis menunjukkan bahwa magnetisasi mudah terjadi karena diperlukan medan magnet vang kecil untuk menghasilkan rapat fluks yang tinggi (induksi), dan sebaliknya jika rasio perandingan rapat fluks magnetik dengan kuat medan magnet rendah pada kurva histerisis maka magnetisasi sulit untuk dilakukan. Sedangkan untuk mencari nilai permeabilitas relatif dari bahan magnetik dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \tag{2.2}$$

Dimana:

 $\mu_r$ : permeabilitas *vacuum* (Wb/Am)  $\mu_0$ : permeabilitas relatif (Wb/Am)

#### d. Medan Koersivitas (H<sub>c</sub>)

Medan koersivitas atau gaya koersivitas adalah medan gaya yang diperlukan untuk menghilangkan induksi remanen setelah melalui proses induksi elekromagnetik. Magnet dapat dibagi menjadi dua bagian berdasarkan koersivitasnya yaitu *soft-magnetic*  dan *hard-magnetic*. Untuk bahan yang memiliki koersivitas yang besar (Hc>1 kA/m) disebut *hard-magnetic*, sedangkan bahan yang memiliki koersivitas kecil (Hc<1 kA/m) disebut *soft-magnetic*.

#### e. Histerisis Magnet

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 (*Coersive Force*). Sifat *retentivity, magnetisme Residual* dan *coersive force* dijelaskan pada kurva histerisis yang ditunjukkan pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Kurva Histerisis (Taufik, 2012)

Bahan feromagnetik memiliki *retentivity* tinggi (*hard magnetic material*) sangat baik untuk memproduksi magnet permanen. Sedangkan bahan non feromagnetik yang memiliki *retentivity* rendah (*soft magnetic material*) ideal untuk digunakan dalam elektromagnet, solenoida atau relay.

Perkembangan bahan magnet dari tahun ke tahun, dan peningkatannya berupa produksi energi maksimum (BHmax) ditunjukkna pada gambar 2.3



Gambar 2. 3 Perkembangan material berdasarkan produksi energi maksimum yang dihasikan

Beberapa bahan utama magnet permanen yang paling banyak dikembangkan dan digunakan adalah ferrite, neodymium, alnico cobalt, dan samarium cobalt. Perbandingan masing-masing bahan magnet ditunjukkan pada tabel 2.1.

	Material			
Properties	AINICo	Hard Ferrites	SmCo	NdFeB
Remanence				
$B_r(T)$	0,5-1,35	0,15-0,4	0,9-1,1	1,0-1,4
Intrinsic				
<i>Coercivity</i> <sub>j</sub> H <sub>c</sub> (kA/m)	40-150	150-350	700-2400	900-3200
Curie temperature (°C)	700-850	450	500-850	310
Temperature coefficient of B <sub>r</sub> (%/°C)	-0,010,02	-0,02	-0,04	-0,1
Temperature coefficient of <sub>j</sub> H <sub>c</sub> (%/°C)	-0,020,04	0,3-0,5	-0,20,3	-0,40,8
Energy product BHmax (MGOe)	3,9-5.3	3,4	20-28	33-45

Tabel 2. 1 Karakteristik material magnet permanen (Ruoho, 2007)

Berdasarkan nilai dari karakteristik masing-masing bahan, maka dapat dilakukan perbandingan dan disimpulkan beberapa keuntungan dan kerugian dari bahan pembuat magnet tersebut, yang ditunjukkan pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Keuntungan dan kerugian material (Ruoho.S, 2007)

Material	Keterangan
AINICo	+ koefisien temperatur yang rendah
	- Koesifitas intrinsik sangat rendah
	- Non-linear behaviour

	+ harga material murah
Hard ferrites	+ resisitivitas listrik yang tinggi
	+ linear
	- <i>Remanence</i> yang cukup
	rendah
	+ sifat magnetik yang tinggi
SmCo	+ linear
	- harga mahal
	+ sifat magnetik yang paling
	tinggi
NdFeB	+ linear
	+ Produksi energi paling tinggi
	- koefisien temperatur yang
	tinggi
	- rentan terhadap korosi

(Shewane.P et al, 2014) pada jurnalnya menyatakan bahwa properti magnet permanen yanga utama yang penting untuk dibandingkan adalah: remanance (Br) yaitu ukuran kekuatan dari medan magnet; coercivity (Hc), yaitu ketahanan suatu material terhadap demagnetisasi; energy product (BHmax) yaitu kepadatan energi (*the density of magnetic energy*). Dari tabel 2.1 dan tabel 2.2 dapat diambil kesimpulan bahwa magnet NdFeB memiliki *remanence* paling tinggi, dibandingkan bahan lain, begitu juga dengan *coercivity* dan *energy product*, namun memiliki *Curie temperature* yang paling rendah. Sehingga NdFeB hingga saat ini adalah magnet permanen yang paling baik.

### 2.1.2 Magnet Neodymium (NdFeB)

Magnet *Neodymium Iron Boron* merupakan magnet dengan kekuatan yang tinggi, dan mulai dikomersilkan sejak 1984. NdFeB adalah material magnetik jenis *rare earth* (tanah jarang).



Gambar 2. 4 Magnet neodymium (Shewane.P, 2014)

Karakteristik magnet yang dimiliki NdFeB lebih baik bila dibandingkan dengan magnet permanen lainnya, seperti *ferit*, *Slnico*, dan *Samarium Cobalt*. Karena memiliki karakteristik yang tinggi, maka dalam aplikasinya magnet NdFeB memiliki dimensi dan volume yang kecil. Magnet NdFeB memiliki beberapa sifat fisik yang dapat dilihat pada tabel 2.3 di bawah ini:

Property	Units	Values
Vickers Hardness	Hv	≥ 550
Density	g/cm <sup>3</sup>	≥ 7.4
<i>Curie Temperature</i> $T_c$	°C	310-380
<i>Curie Temperature</i> $T_f$	°F	591-716
Specific Resistance	μΩ.cm	150
Bending Strength	Mpa	250
Compressive Strength	Мра	1000-1100
Young's Modulus	Kg/mm <sup>2</sup>	$1.7 \text{x} 10^4$

Tabel 2. 3 Sifat fisik magnet NdFeB (Idayanti. N, 2006)

## 2.2 Roda Gigi

Roda gigi adalah mekanisme transmisi yang digunakan untuk suatu pemindahan gerak (terutama putaran), daya atau tenaga, dapat juga merubah gerak lurus menjadi gerak putar atau sebaliknya. Sistem transmisi roda gigi terdiri dari roda penggerak dan yang digerakan. Roda gigi memiliki beberapa kelebihan jika dibandingkan dengan alat transmisi lainnya, yaitu:

- Konstruksi lebih sederhana
- Kemampuan menerima beban lebih tinggi
- Sistem transmisi lebih ringkas, putaran lebih tinggi dan daya lebih besar
- Efisiensi pemindahan gayanya tinggi karena faktor terjadinya slip lebih kecil

Roda gigi memiliki bermacam-macam jenis dan bentuk yang secara ringkas dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Jenis-jenis roda gigi

#### 2.2.1 Worm Gear

*Worm gear* atau juga disebut roda gigi cacing adalah jenis roda gigi yang dapat meneruskan daya dan putaran pada poros yang bersilang tegak dana pentransmisisan putaran selalu berupa reduksi kecepatan. Pasangan roda gigi cacing ini terdiri dari *worm*  (batang cacing) yang selalu sebagai penggerak dan *worm wheel* (roda cacing), dapat dilihat pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 worm gear

Dalam Dalam pasangan roda gigi cacing, pergerakan hanya mungkin dilakukan oleh batang cacing saja. Pasangan roda gigi cacing yang melakukan penguncian diri disebut *self locking*, yang merupakan sebuah keuntungan dari penggunaan pasangan roda gigi ini. Misalnya ketika diinginkan untuk mengatur posisi suatu mekanisme dengan memutar poros cacing dan kemudian memiliki mekanisme menahan posisi tersebut. Pada umunya roda gigi ini bersilang tegak lurus sumbu 90°. Gambar 2.7 menunjukan gerakan pasangan roda cacing dengan poros cacing dengan arah gerakan seuai dengan ulir kanan.



Gambar 2. 7 Gerakan pasangan worm gear (Jelaska.D, 2012)

Ketika *worm* berotasi melalui *worm gear*, garis kontak berputar atau bergerak dari ujung satu ke ujung lain *worm gear*. Setiap saat, mungkin ada dua atau tiga gigi yang bersentuhan dan memancarkan tenaga seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Garis kontak pada worm dan worm gear set

Beberapa bagian utama dari dimensi *worm gear* dapat dilihat pada gambar 2.9



Jarak titik bertemu antar *worm* dan *worm gear* bergerak secara aksial dalam satu putaran disebut *lead*, *L* 

$$L = l_{pitch} N_w = \frac{\pi d_m N_w}{L_G} , \quad \tan \lambda = \frac{L}{\pi d}$$
 (2.3)

Dimana,

L	= lead (mm)
l <sub>pitch</sub>	= worm axial pitch (mm)
N <sub>w</sub>	= number of teeth on worm
$d_m$	= pitch diameter of the worm gear (mm)
N <sub>G</sub>	= number of teeth on the worm gear
λ	= lead angle(°)
d	= pitch diameter of the worm (mm)

Pada saat ulir cacing meneruskan putaran, akan menerima beberapa gaya. Gaya-gaya pada batang cacing dan roda cacing antara lain:

- Gaya aksial; gaya yang bekerja sejajar dengan poros roda gigi cacing.
- Gaya radial; gaya yang tegak lurus garis singgung, gaya ini menuju titik pusat roda gigi.
- Gaya tangensial; gaya yang sejajar dengan garis singgung, perputaran gaya tangensial tergantung pada alur gigi cacing tersebut, apakah ulir tersebut berbentuk ulir kanan atau ulir kiri.

Gaya yang diberikan pada *worm* oleh *worm gear* diilustrasikan pada Gambar 2.10, dimana, gesekan diabaikan. Resultan gaya memiliki 3 komponen, yaitu

$$\begin{split} W_x &= W \cos \phi_n \sin \lambda \\ W_y &= W \sin \phi_n \\ W_z &= W \cos \phi_n \cos \lambda \end{split}$$
 (2.4)

Dimana,

 $W_x$  = gaya arah tangensial pada *worm* (N)  $W_y$  = gaya arah radial pada *worm* (N)  $W_z$  = gaya arah aksial pada *worm* (N)



Gambar 2. 10 Gaya-gaya yang diberikan pada *worm* oleh *worm* gear

Karena gaya pada *worm* dan *worm gear* adalah sama dan berlawanan, gaya tangensial, radial, dan aksial adalah

$$W_{w_t} = -W_{Ga} = W_x$$
  

$$W_{w_r} = -W_{Gr} = W_y$$
  

$$W_{w_a} = -W_{Gt} = W_z$$
  
(2.5)

Dimana,

 $W_{w_t}$  = gaya arah tangensial worm (N)  $W_{w_r}$  = gaya arah radial worm (N)  $W_{w_a}$  = gaya arah aksial worm (N)  $W_{Gt}$  = gaya arah tangensial gear (N)  $W_{Gr}$  = gaya arah radial worm (N)  $W_{w_a}$  = gaya arah aksial gear (N)

Yang paling utama dari sistem *worm gear* adalah kapasitasnya untuk menerima daya input, daya output, dan torsi yang diizinkan pada kecepatan tertentu untuk poros input dan poros output. Nilai dari daya input adalah penjumlahan daya

output dan kehilangan daya dalam sistem roda gigi tersebut, seperti ditunjukkan pada persamaan dibawah ini.

$$P_{input} = P_{output} + P_{loss} \tag{2.6}$$

Daya output dijabarkan seperti persamaan,

$$P_{output} = \frac{nW_{tg}d_g}{1.91 \times 10^7 m_G} \tag{2.7}$$

Dimana.

Ν	= kecepatan putar <i>worm</i> (rpm)
$W_{tg}$	= gaya arah tangesial pada worm gear (N)
Poutput	= daya output (kW)
$m_G$	= rasio <i>gear</i>
$d_g$	= diameter rata-rata gear (mm)

Daya yang hilang (power lost) selama proses ditunjukkan dalam persamaan,

$$P_{loss} = \frac{V_t W_f}{1000} \tag{2.8}$$

Dimana,

$$\begin{array}{ll} P_{loss} & = loss \ power \ (kW) \\ V_t & = sliding \ velocity \ pada \ diameter \ rata-rata \ worm \\ & (m/s) \\ W_f & = friction \ force \ (N) \end{array}$$

Persamaan untuk menghitung Torsi pada poros worm gear (Tgear) adalah,

$$T_{gear} = \frac{P_{input} \times 60}{2\pi n_2} \tag{2.9}$$

Dimana,

 $T_{gear}$  = torsi pada worm gear (Nm)  $n_2$  = putaran output d = putaran output dari *worm gear* (rpm)

Sedangkan untuk torsi pada poros worm, ditunjukkan pada persamaan berikut,
$$T_{worm} = \frac{T_{gear}}{V_t \eta} \tag{2.10}$$

Dimana,

 $T_{worm}$  = torsi pada worm (Nm)  $\eta$  = efisiensi gear

Hubungan antara torsi dan gaya-gaya yang bekerja pada *worm* dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut,

$$W_{wt} = \frac{2 T_{worm}}{d}$$

$$W_{wa} = \frac{2 T_{gear}}{d_m}$$

$$W_{wr} = W_{wa} \times \tan \phi_n$$
(2.11)

#### 2.2.2 Magnetic Gear

Magnet, dimanfaatkan dalam peralatan transmisi, pertama kali dikemukakan oleh Amstrong C pada 1901 dengan membuat desain sebuah spur *gear* elektromagnetik. Sistem tersebut terdiri dari 2 *gear*, satu adalah roda gigi dengan gigi elektromagnet dan roda gigi satunya adalah potongan *steel*. Elektromagnet pada roda gigi utama dapat dinyalakan atau dipadamkan sesuai dengan posisi terhadap roda gigi kedua. Ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2. 11 Magnetik gear pertama

Terdapat beberapa pengujian dan eksperimen terkait dengan elektromagnet *gear* setelahnya. Hingga kemudian H.T. Faus mendesain roda gigi jenis spur pada 1941. Prinsip kerjanya sama dengan yang dilakukan oleh Amstrong, namun yang membedakan adalah mengganti gigi-gigi dengan magnet permanen. Seluruh bagian kutub utara magnet disusun menghadap keluar sehingga torsi dapat dipindahkan antar poros oleh tolakan kutub-kutub magnet. Ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 2.12.



Gambar 2. 12 Magnetik permanen gear jenis spur

Pengembangan *magnetic gear* terus dilakukan setelahnya, diantaranya adalah Pada tahun 1970 Rand membuat sebuah rancangan magnet permanen gimana kedua kutub menghadap secara radial ke arah luar. Kemudian Laing pada 1973 mematenkan rancangan peralatan *magnetic gear* yang digunakan pada pompa sentrifugal. Pada 2007 Chau mengeluarkan jurnal tentang permanent *gear* yang digunakan pada motor DC brushless yang diintegrasikan pada *magnetic gear* koaksial. 2 tahun kemudian Jian et al menggunakan konfigurasi yang sama seperti Chau dan mengaplikasikannya pada turbin angin.

T.lali *et al.* (2014) melakukan *review* terhadap perkembangan teknologi magnetik *gear* secara keseluruhan. Dalam *review*nya, Lali menyebutkan bahwa magnetik *gear* dapat dirancang sesuai dengan topologi yang tersedia dari bentuk mekaniknya, yang ditunjukkan pada gambar 2.13.



Gambar 2. 13 Topologi magnetik *gear* berdasarkan mekanikal *gear* 

Dalam satu dekade terakhir, magnetik *gear* mulai dikembangkan setelah adanya material magnet permanen yang memiliki energi produk yang tinggi dan dengan topologi baru yang mungkin bisa bersaing dengan *gear* mekanik dalam hal *torsi density*. Beberapa topologi magnetik *gear* yang signifikan adalah cpncentric, harmonic, dan planetary yang ditunjukkan pada gambar 2.14.



*Gambar 2. 14 Concentric, harmonic dan planetary magnetik gear.* 

Prinsip operasi dasar dari magnetik *gear* konsentris adalah bahwa kutub-kutub feromagnetik yang ditempatkan antara rotor magnet permanen dalam dan luar memodulasi medan magnet sedemikian rupa sehingga setiap rotor berhadapan dengan harmonik ruang kerja yang sesuai dengan jumlah kutubnya sendiri. Pengoperasian gigi harmonik magnetik bergantung pada mekanisme untuk menghasilkan variasi waktu, variasi sinusoidal dari celah udara antara rotor magnet permanen berkecepatan rendah fleksibel dan stator magnet permanen kaku. Keuntungan nyata yang terkait dengan magnetik *gear* harmonik adalah rasio roda gigi tinggi, kepadatan torsi tinggi dan transmisi torsi halus. Sementara itu, magnetik *gear* planetary memiliki kemampuan tiga mode transmisi, rasio roda gigi tinggi, dan kepadatan torsi tinggi. Namun, Namun, mekanisnya konfigurasi juga sangat rumit.

Kemajuan dalam teknologi gigi magnetik mengarah pada pengembangan jenis baru mesin listrik yaitu *magnetically geared machines*. Mesin-mesin ini memiliki magnet *gear* yang terintegrasi dengan mesin permanen magnet dalam volume yang sama. Dengan Dengan cara ini, kerapatan torsi sistem meningkat melampaui apa yang dapat dicapai dengan konfigurasi bertingkat. Beberapa topologi dari *magnetically geared machines* dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2. 15 Topologi dari beberapa magnetically geared machines, a) coupled/decoupled inner-stator geared machines, b) Outer-stator configuration, c) wound modulator configuration

Mesin dengan topologi inner-stator memiliki empat komponen konsentris, tiga celah udara, dan dua rotor berputar pada kecepatan sudut yang berbeda. Salah satu kelemahan dari topologi ini adalah tingkat kerumitan mekanis yang tinggi. Topologi outer-stator telah mengurangi kerumitan mekanis dibandingkan dengan topologi inner-stator karena magnet luar melekat langsung ke permukaan bagian dalam stator. Dengan cara ini, jumlah celah udara dikurangi menjadi dua.

Salah satu keunggulan roda gigi magnetik dibandingkan mekanik adalah roda gigi magnetik memanfaatkan medan magnet antar kutub di masing-masing magnetnya sehingga roda gigi dapat melakukan transmisi tanpa melakukan sentuhan antar giginya (*non contact*), seperti pada gambar 2.16 dibawah.



Gambar 2. 16 a) roda gigi magnetik; b) roda gigi mekanik

Dari cara kerjanya yang tidak bersentuhan, roda gigi magnetik memiliki keunggulan lain seperti tidak memerlukan lubrikasi, tidak menimbulkan noise. Kelebihan roda gigi magnetik dibandingkan roda gigi mekanik secara lebih rinci dapat ditulisakan sebagai berikut,

- 1. Tidak ada kontak antar gigi sehingga tidak menimbulkan keausan akibat gesekan, juga tidak membutuhkan pelumasan.
- 2. Karena cara kerjanya yang *non-contact*, perawatan menjadi lebih terminimalisir karena kerusakan akibat gesekan tidak terjadi.
- 3. Ketika terjadi slip pada roda gigi tidak akan merusak sistem.

Namun demikian, roda gigi magnetik juga memiliki kelemahan, yaitu torsi yang dihasilkan lebih rendah jika

dibandingkan dengan torsi roda gigi mekanik untuk volume gear yang sama.

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

Rasio gear Rg tergantung dari jumlah magnet  $N_{pole1}$  pada roda penggerak dan  $N_{pole2}$  pada roda yang digerakkan. Hubungan ini dapat ditunjukkan sebagai persamaan dibawah. Sebagian besar sistem roda gigi memiliki rasio gear yang lebih besar dari satu, yang sesuai dengan revolusi tinggi pada poros *input* dan revolusi rendah pada poros *output*. Persamaan hubungan yang berlaku untuk roda gigi mekanis juga jika jumlah kutub magnet diganti dari jumlah gigi pada masing-masing roda gigi.

$$R_g = \frac{N_{pole\,2}}{N_{pole\,1}} \tag{2.12}$$

Dimana:

R<sub>g</sub> : Rasio roda gigi

 $N_{pole1}$  : Jumlah magnet pada roda penggerak

 $N_{pole2}$  : Jumlah magnet pada roda yang digerakkan

*Torsi density* adalah kriteria kinerja yang digunakan dalam mesin listrik, di mana torsi per unit volume rotor atau torsi per total satuan volume. Kriteria kinerja seperti ini juga bisa diaplikasikan pada *magnetic gear*. *Gear* dengan magnet permanen memiliki volume rotor dalam jumlah tertentu, dan volume rotor terhadap torsi maksimum yang ditransfer didefinisikan sebagai *active torsy density*. ((Joergensen & Thorlief, 2010)

$$\rho_A = \frac{T_{max}}{V_A} \tag{2.13}$$

Dimana,

$$\begin{array}{ll} \rho_{A} & : Active \ torque \ density \ (Nm/m3) \\ T_{max} & : Torsi \ maksimal \ yang \ ditransmisikan \ (Nm) \\ V_{A} & : Volume \ gear \ (m3) \end{array}$$

Hal ini dapat digunakan untuk membandingkan *torsi density* untuk roda gigi magnetik dengan roda gigi mekanis. Torsi density total ditunjukkan pada:

$$\rho_R = \frac{T_{max}}{V_T} \tag{2.14}$$

Dimana,

 $\begin{array}{ll} \rho_R & : Total \ torque \ density \ (Nm/m^3) \\ T_{max} & : Torsi \ maksimal \ yang \ ditransmisikan \ (Nm) \\ V_T & : Volume \ total \ (m3) \end{array}$ 

Roda gigi mekanik memiliki faktor kepadatan torsi yang ditunjukkan ada persamaan di bawah, yang dihitung dari torsi nominal  $T_{Nom}$ . Volume  $V_T$  yang digunakan dalam persamaan ini adalah total volume roda luar.

$$\rho_T = \frac{T_{Nom}}{V_T} \tag{2.15}$$

Dimana:

$ ho_T$	: Total torque density (Nm/m <sup>3</sup> )
T <sub>Nom</sub>	: Rate nominal torque (Nm)
V <sub>T</sub>	: Volume total (m3)

Efisiensi roda gigi didefinisikan sebagai hubungan antara daya pada poros output dibagi dengan daya pada poros input.

$$\eta = \frac{P_{Out}}{P_{in}} \tag{2.16}$$

Dimana:

η	: efisiensi roda gigi
P <sub>Out</sub>	: Input torque (Nm)
P <sub>in</sub>	: output torque (Nm)

# 2.2.3 Dasar Perhitungan Magnetic Gear

#### 2.2.3.1 Perhitungan 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.

$$T = \int_{v} r \times (J_m(r, Q) \times B_{ext}) r dr d\phi dz + \int_{S} r \times (j_m B_{ext}) da$$
(2.17)

dimana

T: torsi (Nm)

r : vektor pada sumbu-r

- $J_m$  : volume current density (A/m<sup>2</sup>)
- j<sub>m</sub> : *surface current density* (A/m)
- B<sub>ext</sub> : *external flux density field* (Wb)



Gambar 2. 17 Ilustrasi Perhitungan Torsi

Karena  $J_m = \nabla \times M = 0$ , maka integral volume yang pertama menjadi nol dan yang tersisa hanya integral permukaan. Semua *current density* pada permukaan harus dilalui oleh B<sub>ext</sub> dari *source magnet* untuk menciptakan torsi pada *drive magnet*. Perkalian *cross* tersebut dapat diilustrasikan dengan sketsa isometrik pada gambar 2.16.

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, dengan persamaan torsinya sebagai berikut.

$$T_{r}(\phi) = \frac{2m_{s}\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right)L(R_{2}-R_{1})}{N_{r}}\sum_{p=0}^{N_{pole}}\sum_{q=0}^{N_{p}}(-1)^{p}S_{r}(q)r(q)$$
$$\times \left[\cos\left(\phi_{edge}(\phi,p)B_{x}^{ext}(r(q),\phi_{edge}(\phi,p))\right)\right.$$
$$\left.+\sin\left(\phi_{edge}(Q,p)B_{x}^{ext}\left(r(q),\phi_{edge}(\phi,p)\right)\right)\right]$$

(2.18)

Dimana

$T_r(\emptyset)$	: torsi radial (Nm)
Ms	: magnetisasi source magnet (A/m)
Np	: jumlah magnet pada source magnet gear
N <sub>pole</sub>	: jumlah magnet pada drive magnet gear
L	: panjang/tinggi magnet (m)
<b>R</b> <sub>1</sub>	: radius dalam <i>drive</i> magnet (m)
$R_2$	radius luar drive magnet (m)
Р	: jumlah kutub magnet
q	:parameter dari intgrasi
$S_r(q)$	: parameter dari integrasi
$(\emptyset_{edge})$	: sudut tertentu dari drive magnet (rad)
Ø	: sudut putar drive magnet (rad)
$B_x^{ext}$	: x-direction external flux density field (Wb)
$B_{y}^{ext}$	: y- direction external flux density field (Wb)

Sedangkan untuk integrasi permukaan tangensial dilakukan pada dua permukaan radial. Untuk mendapatkan hasilnya digunakan metode integrasi Simpson, dengan persamaan torsi tangensialnya sebagai berikut.

$$T_{t1}(\emptyset) = -\frac{M_{sLR_{1}^{2}}\left(\frac{2\pi}{N_{pole}}\right)}{N_{t}} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_{t}} (-1)^{p} S_{t}(q) \sin(\theta(q) \left[ \cos\left(\theta(q) + p\frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset\right) B_{x}^{ext} \left(R_{1}, \theta(q) + p\frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset\right) + \sin\left(\emptyset(q) + p\frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset\right) B_{y}^{ext} \left(R_{1}, \theta(q) + p\frac{2\pi}{N_{pole}} + \emptyset\right) \right]$$
(2.19)

 $T_{t2}(\emptyset) =$ 

$$T_{t2}(\emptyset) = -\frac{M_{s}LR_{2}^{2}\left(\frac{2\pi}{N_{pole}}\right)}{N_{t}}\sum_{p=0}^{N_{pole}-1}\sum_{q=0}^{N_{t}}(-1)^{p}S_{t}(q)\sin(\theta(q)\left[\cos\left(\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\phi\right)B_{x}^{ext}\left(R_{2},\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\phi\right)+\sin\left(\phi(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\phi\right)B_{y}^{ext}\left(R_{2},\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\phi\right)\right]$$
(2.20)

Dimana

$T_t(\emptyset)$	: torsi tangensial (Nm)
Ms	: magnetisasi source magnet (A/m)
N <sub>t</sub>	: parameter integrasi torsi
N <sub>pole</sub>	: jumlah magnet pada drive magnet gear
Ĺ	: panjang/tinggi magnet (m)
$R_1$	: radius dalam <i>drive magnet</i> (m)
$R_2$	radius luar <i>drive magnet</i> (m)
Р	: jumlah kutub magnet
q	: parameter dari integrasi
$\tilde{S}_t(q)$	: parameter dari integrasi
Θ	: sudut tertentu dari drive magnet (rad)
Ø	: sudut putar drive magnet (rad)
$B_{r}^{ext}$	: x-direction external flux density field (Wb)
$B_{v}^{\hat{e}xt}$	: y- direction external flux density field (Wb)
_,	

Persamaan total torsi didapatkan dari penjumlahan integral permukaan, dengan persamaan sebagai berikut:

$$T(\phi) = T_r(\phi) + T_{t1}(Q) + T_{t2}(Q)$$
(2.21)

#### Dimana

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

#### 2.2.3.2 Perhitungan Drive Magnet Surface Current Density

Kesetimbangan *surface cuurent density* adalah distribusi *current density* yang memberikan medan magnet yang sama seperti magnet permanen. Persamaan *current density* untuk permukaan luar dan dalam adalah seperti dibawah ini.  $i_m(n \ r \ \Phi \ \theta) =$ 

$$\begin{cases} r = R_2 \\ M_s \sin(\theta) \hat{z} \begin{cases} \Phi_1(p) \le \theta \le (p) \\ \Phi - \frac{\pi}{N_{pole}} (1 + 2p) \le \theta \le \Phi + \frac{\pi}{N_{pole}} (1 + 2p) \\ -M_s \cos(\theta) \hat{z} \begin{cases} r = R_1 \\ \Phi_1(p) \le \theta \le (p) \\ \Phi - \frac{\pi}{N_{pole}} (1 + 2p) \le \theta \le \Phi + \frac{\pi}{N_{pole}} (1 + 2p) \end{cases}$$

Dimana

İm	: <i>surface current density</i> (A/m <sup>2</sup> )
Ms	: magnetisasi source magnet (A/m)
θ	: sudut tertentu dari drive magnet (rad)
ź	: vektor ke arah z
θ 2	: sudut tertentu dari <i>drive magnet</i> (R/III) : vektor ke arah z

#### 2.2.3.3 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.

$$B_x^{ext}(r,\Phi) = B_{r'}^{ext}\left(r'(r,\Phi),\Phi'(r,\Phi)cos(\Phi'(r,\Phi))\right) - B_{\Phi'}^{ext}\left(r'(r,\Phi),\Phi'(r,\Phi)sin(\Phi'^{(r,\Phi)})\right)$$
(2.23)

$$B_{y}^{ext}(r,\Phi) = B_{r'}^{ext}\left(r'(r,\Phi),\Phi'(r,\Phi)cos(\Phi'(r,\Phi))\right) - B_{\Phi'}^{ext}\left(r'(r,\Phi),\Phi'(r,\Phi)sin(\Phi'(r,\Phi))\right)$$
(2.24)

Dimana

$B_x^{ext}$	: x-direction external flux density field (Wb)
Dext	dimentions antennal floor demaits field (1471)

- By : y-direction external flux density field (Wb)
- $B_{r'}^{ext}$  : radial external flux density field (Wb)
- $B_{\Phi_{\prime}}^{ext}$  : tangensial external flux density field (Wb)
- r' : transmormasi radius ke koordinat drive magnet
- Φ :transformasi tangensial ke koordinat *drive* magnet

#### 2.2.3.4 Perhitungan Magnetisasi Paralel

Magnetisasi paralel terdapat pada arah radial dan tangensial. berikut adalah persamaan untuk mendapatkan magnetisasi paralel:

$$M_s(r,\phi) = M_r \cdot \hat{r} + M_\phi \cdot \hat{\varphi}$$
(2.25)

Dimana

 $M_r$  : magnetisasi arah radial (A/m)  $M_r$  : magnetisasi arah tangansial (A/m)

 $M_{\emptyset}$  : magnetisasi arah tangensial (A/m)

#### 2.3 Finite Element Method (FEM)

*Finite element method* (FEM) atau juga biasa disebut *finite element analysis* (FEA), adalah prosedur numeris yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah-masalah dalam bidang rekayasa *(engineering)*, seperti analisis tegangan, elektromagnetis, dan aliran fluida.

Lebih sederhana, metode *finite element* ini adalah menyelesaikan suatu masalah dengan cara membagi objek analisis menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian analisis ini kemudian dianalisis dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan

daerah. Bagian-bagian ini disebut dengan elemen yang tiap elemen satu dengan lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Proses pembagian benda tersebut menjadi beberapa bagian disebut dengan *meshing*. Pembagian tiap elemen dapat dilakukan dalam beberapa bentuk seperti terdapat pada gambar 2.18 a) *triangle* dan gambar 2.18 b) *quadrangle*, unutk analisis 2D. kemudian bentuk pada gambar 2.18 c) *tetrahedron* dan gambar 2.18 d) *hexahedra* untuk analisis 3D.



Gambar 2. 18 Jenis-jenis meshing pada finite element

Pengaplikasian *finite element method* pada magnet, dengan mempertimbangkan fungsi energi yang terkait dengan bidang tiga dimensi secara acak.

$$\mathfrak{I} = \int_{D} \left\{ \left( \int_{0}^{\vec{E}} \vec{D} d \vec{E} - \int_{0}^{\vec{B}} \vec{H} d \vec{B} \right) + \left( \vec{J} \vec{A} - \rho_{v} V \right) \right\} d\mathcal{D} \quad (2.26)$$

Dimana,

$\vec{D}, \vec{B}, \vec{B}$	$\vec{E}$ , $\vec{H}$ = vector associated with electric and magnetic
	fields
À	= magnetic vector potential
V	= scalar electric potential
Ĵ	= density vector of conduction electric current

Potensial elektromagnetik  $\vec{A}$  dan V menentukan vektor  $\vec{E}$  dan  $\vec{B}$  pada medan elektromagnetik:

Dan

 $\vec{E} = -grad V$  $\vec{R} = rot \vec{A}$ 

Energi fungsional yang terkait dengan medan magnet stasioner yang dihasilkan oleh arus langsung dan untuk magnet permanen dinyatakan sebagai,

$$\Im(\vec{A}) = \int_{D} \left\{ \left( \int_{0}^{\vec{B}} \vec{H} d \vec{B} \right) - \vec{J} \vec{A} \right\} d\mathcal{D}$$
(2.27)

Masalah 2D dalam koordinat Cartesian (x, y, z) disebut paralelplane. Kepadatan arus  $\vec{J}$  berorientasi pada sumbu Oz dan *magnetic vector potential* memiliki struktur  $\vec{A} = A\vec{k}$  dan orientasinya juga pada sumbu Oz. Induksi magnetik ditulis sebagai:

$$\vec{B} = rot \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & A(x, y) \end{vmatrix}$$
$$= \vec{i} \frac{\partial A}{\partial y} - \vec{j} \frac{\partial A}{\partial x} = \vec{k} \times (-gradA)$$
(2.28)

\_

*Magnetic vector potential*  $\vec{A}$  diperoleh dengan meminimalkan fungsi:

$$\delta \Im(\vec{A}) = 0 \tag{2.29}$$

Energi magnetik terletak di medan magnet *dengan volume density*  $w_m$ :

$$w_m = \frac{\vec{H}\vec{B}}{2} = \frac{\vec{B}^2}{2\mu}$$
(2.30)

*Magnetik field density* direduksi menjadi persamaan skalar berikut:

$$w_m = \frac{1}{2\mu} - J.A = \frac{1}{2\mu} \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right] - J.A$$
(2.31)

Pada kondisi parallel-plane field, boundary condision berupa:

$$A(x, y) = f(P) \tag{2.32}$$

A(x, y) adalah fungsi yang belum diketahui nilainya. Komputasi energi magnetik pada *surface* dalam fungsi l disederhanakan menjadi fungsi:

$$\frac{\partial l}{\partial A_i} = \int\limits_{s} \left\{ \frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial A}{\partial x} \frac{\partial}{\partial A} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial A}{\partial y} \frac{\partial}{\partial A} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right] - J \frac{\partial A}{\partial i} \right\} dx dy$$
  
= 0 (2.33)

Maka, sistem persamaan tersebut dituliskan menjadi,

$$f_k = \sum_{z=1}^{q(i)} \frac{\partial l}{\partial A_i} = 0 \tag{2.34}$$

 $A_i$  adalah *magnetic* vector potential dari node I dan elemen z. Medium homogen juga dipertimbangkan, sehingga permitivitasmagnetik  $\mu$  adalah konstan pada masing masing *finite element*, menjadi independen dari koordinat x dan y. dan dengan D adalah komputasi determinan, maka matriks dapat dituliskan:

$$\frac{\partial le}{\partial A_i} = \frac{D}{2\mu} (b1bi + c1ci \ b2bi + c2ci \ b3bi + c3ci) \begin{pmatrix} A1\\A2\\A3 \end{pmatrix} - J\frac{D}{6} = 0$$
(2.35)

Persamaan tersebut adalah jumlah kontribusi sekain "ne" finite element.

$$\sum_{e=1}^{ne} \frac{\partial l}{\partial A_i} = 0 \tag{2.36}$$

Dimana "ne" adalah jumlah total finite elements.

$$\{F\} = [K], \{A\} - [P] + [Q]$$
(2.37)

 $\{F\}$  adalah gaya yang bekerja pada nodal,  $\{A\}$  adalah vektor dengan komponen matriks yang berupa nilai nodal. [K] sendiri adalah matrik kekakuan. Istilah [P] digunakan untuk masalah jenis elemen "source" dimana *current density*  $\vec{j}$  adalah *non-null*, dan [Q] digunakan untuk elemen yang ada di salah satu ukuran *non-homogeneus Neumann boundary*.

#### 2.4 Studi Literatur

Terdapat beberapa penelitian yang dijadikan sebagai referensi dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Yang pertama

adalah mengenai konsep dan bentuk dari roda gigi cacing magnetik itu sendiri, dimana **Baermann** pada tahun 1972 membuat konsep desain roda giginya yang berbentuk seperti *Archimedean screw* dengan gigi heliks. Bentuknya dan posisinya hampir sama dengan roda gigi cacing mekanik, terdiri dari roda cacing (*worm wheel*) dan *worm*. Namun gigi-gigi pada roda terbuat dari magnet yang terbuat dari material anisotropik permanent magnet. Bentuk desain ditunjukkan pada gambar 2.19 di bawah.



Gambar 2. 19 Roda gigi cacing magnetik (Baermann, 1974)

Pada saat magnet pada roda gigi berinteraksi, maka akan terjadi medan magnet antar kutub. Pada tiap gigi terdapat sepasang magnet yang saling berhadapan menempel, seperti pada gambar 2.19. konfigurasi ini akan memaksa roda gigi untuk memposisikan gigi pada celah udara yang sama antar kutub gigi kutub magnet. Konfigurasi jenis ini memiliki resiko terjadi kontak ketika diberi beban tinggi.

Kemudian **Shinki Kikuchi** dan **Katsuo Tsurumoto** pada tahun 1993 membuat sebuah desain baru roda gigi cacing magnetik, seperti pada gambar 2.20.



Gambar 2. 20 Desain roda gigi cacing magnetik dengan geometri (Kikuchi.S, 1993)

Struktur dan konsep desain pada penelitian tersebut adalah:

- 1. Rasio gear 1:33
- 2. *Meshing* didasarkan pada kontak internal untuk memperbesar meshing dan mereduksi ukuran *gear*
- 3. Kondisi operasi adalah putaran terus-menerus.

Roda gigi ini didesain dengan data dimensi sebagai berikut:

1. Worm:

	Number of teeth	= 2
	Number pitch	= 10.472
	Max. diameter of pitch circle	= 145 mm
	Max. diameter of yoke	= 140 mm
2.	Worm wheel:	
	Number of teeth	= 66
	Diameter of pitch circle $= 219,78$	
	Max. diameter of yoke	= 364 mm
	Diameter of wheel surface	= 150 mm

Desain ini kemudian dicoba untuk dimanufaktur, mild steel digunakan sebagai bahan pembuat yoke *worm wheel* dan *worm*. Magnetiknya terbuat dari bahan permanen magnet SmCo<sub>5</sub> dan ukuran spesimennya adalah 8x5x2 mm dan surface *flux*  *density* B adalah 1800 Gauss. Percobaan kemudian dilakukan dengan mengukur torsi menggunakan torsimeter. Torsi maksimum yang dihasilkan adalah 11.5 Nm.

Pada penelitian yang dilakukan **Jianna Huang** dkk pada tahun 2012 yang berjudul *The Torque Analysis and Simulation on Electromagnetic Gears*, salah satu yang dianalisis adalah efek dari perubahan *air-gap* terhadap torsi yang dihasilkan. Jenis *gear* yang dianalisis adalah spur *gear*, dengan variasi *air-gap* 1 mm, 2 mm, dan 3 mm. Penelitian ini menggunakan *Ansys* sebagai *software* analisis simulasinya. Dan hasilnya ditunjukkan dalam bentuk grafik pada gambar 2.21.

Seperti yang terlihat pada gambar 2.21 dimana *trendline* garis menurun, kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa torsi yang dihasilkan berbanding terbalik dengan jarak *air-gap*. Semakin besar *air-gap* maka torsi akan menurun. Begitu juga sebaliknya, semakin kecil *air-gap* pada *gear* menghasilkan torsi yang semakin besar.



Gambar 2. 21 Grafik perbandingan *air-gap* terhadap torsi yang dihasilkan pada *spur gear* 

Tugas akhir ini mengacu pada beberapa penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya. Penelitian ini menggunakan prinsip *internal worm gear magnetic* yang dilakukan oleh **Shinki Kikuchi** dan **Katsuo Tsurumoto** dan memvariasikan radius *worm*. Kemudian karena fenomena *air-gap* pada penelitian sebelumnya dimulai pada 0,5 mm hingga 3 mm telah menunjukkan hasil berupa hubungan berbanding terbalik, namun perlu dilakukan analisis kembali pada selisih jarak *ai -gap* yang lebih kecil yaitu 0.25 mm. Maka pada Tugas Akhir ini ditentukan bahwa variasi yang akan dilakukan adalah jarak *air-gap* 0,75 mm, 1 mm, dan 1,25 mm dan dan *envelope worm* dengan ukuran R=170 mm, R=180 mm, dan R=190 mm.

## BAB III METODOLOGI

Pada bab ini akan dibahas metode penelitian yang digunakan. Metode penelitian yang digunakan adalah *finite element* dengan menggunakan *software Ansys* Maxwell untuk menganalisis torsi pada *magnetic worm gear* dengan variasi jarak *air-gap* dan radius *envelope* pada *worm*.

Metode pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur

Studi literatur dilakukan untuk mempelajari literatur yang berhubungan dengan penelitian seputar magnetik *gear* dengan cara mencari pustaka dari buku, jurnal, karya ilmiah, makalah, dan penelitian-penelitian terkait yang pernah dilakukan sebelumnya

2. Desain

Pembuatan awal desain *gear* dilakukan dengan mengunakan *software Solidwork*.

3. Analisis

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana torsi yang terjadi pada *magnetic worm gear* dengan memvariasikan jarak *air gap* dan radius *envelope* pada *worm*.

4. Penyusunan Laporan

Laporan ini tersusun atas pendahuluan, dasar teori, dan metodologi penelitian

### **3.1 Flowchart Penelitian**

Proses dan tahapan penelitian tugas akhir ini meliputi beberapa proses yang ditunjukkan berupa diagram alir pada gambar 3.1





Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

#### 3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat 3 variabel, yaitu variabel kontrol, variabel moderator dan variabel respon.

#### 3.2.1 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang dibuat konstan sehinggga pengaruh variabel moderator tidak dipengaruhi oleh faktor luar. Dalam penelitian ini variabel kontrolnya adalah volume magnetik *gear*, rasio *jumlah poles*, dan kecepatan putar *drive*.

- 1. Jenis *gear* yang dibuat adalah *worm gear*, yang terdiri dari *worm* dan *worm wheel*.
- 2. Jumlah *poles* pada *worm* adalah tetap yaitu 2
- 3. Rasio *poles* antara *worm* dengan *worm wheel* adalah 1:60
- 4. Kecepatan sudut yang diinput pada *software ansys* sebagai sumber yang digunakan dalam simulasi ini adalah sebesar 360 rpm

# 3.2.2 Variabel Moderator

Variabel moderator adalah variabel yang diukur, dimanipulasi, atau dipilih untuk menentukan apakah variabel tersebut mengubah hasil. Dalam penelitian ini variabel moderatornya adalah dan *air-gap* dan radius *envelope* pada *worm*.

- 1. *Air-gap* adalah jarak antar *gear* magnetik, yang divariasikan sebesar 0,75 mm, 1 mm, dan 1,25 mm.
- 2. Variasi ukuran radius pada *worm* yaitu 170 mm, 180 mm, dan 190 mm.

# 3.2.3 Variabel Respon

Variabel respon adalah variabel *output* yang dipengaruhi oleh pengubahan variabel moderator. Dalam penelitian ini variabel responnya adalah:

- 1. Torsi magnetik gear (Nm)
- 2. Kerapatan medan magnet (B)
- 3. Kuat medan magnet (H)

# 3.3 Peralatan Penelitian

# 3.3.1 Perangkat Keras

Dalam pengerjaan penelitian ini diperlukan set komputer PC yang digunakan sebagai perangkat pendukung untuk melakukan simulasi dan analisis. Komputer PC yang digunakan harus memiliki spesifikasi minimal agar perangkat lunak dapat digunakan didalamnya, yaitu:

1. Processor minimal intel core 3 dengan Radeon HD Graphics

- 2. Ram minimal 4 GB
- 3. System type 32-bit atau 64-bit Operation System

## 3.3.2 Perangkat Lunak

Ada beberapa perangkat lunak utama yang digunakan dalam melakukan simulasi ini, diantaranya adalah *Solidwork* dan *Ansys Maxwell:* 

1. Solidwork

*Software* ini digunakan sebagai perangkat lunak pendukung untuk melakukan desain awal *gear* magnetik yang kemudian akan di *import* ke *Ansys*.

2. Ansys Maxwell

*Software* ini mampu melakukan analisis 3D *finite element* digunakan sebagai perangkat lunak untuk melakukan proses simulasi yang di dalamnya terdapat beberapa proses hingga menghasilkan data dan hasil simulasi.

### 3.4 Langkah Penelitian

Langkah langkah dalam penelitian ini dibagi ke dalam beberapa bagian yaitu studi literatur, pemodelan, *pre-processing*, *processing*, dan *post-processing*. Masing-masing akan dijelaskan sebagai berikut:

### 3.4.1 Studi Literatur

Studi literatur adalah mencari dan mempelajari studi-studi yang pernah dilakukan sebelumnya yang berkaitan dengan judul penelitian ini. Studi literatur dilakukan dengan untuk mempelajari tentang karakteristik dan sifat magnet terutama magnet permanen, mengetahui perkembangan teknologi magnetik *gear*, mempelajari tentang hubungan properti dan dimensi magnetik *gear* terhadap torsi yang dihasilkan. Studi literatur juga diperlukan dalam mempelajari tentang perangkat lunak *Ansys* dan cara melakukan analisis menggunakan *Ansys*.

## 3.4.2 Pemodelan Magnetic Gear

Dalam tahap persiapan, langkah pertama adalah membuat desain awal berupa *magnetic worm gear* terdiri dari *worm* dan *worm wheel* 3D. Proses ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Solidwork*. Diameter *gear* merupakan variabel kontrol sehingga nilainya tetap dalam tiap proses.

1. Desain Worm

*Worm* sebagai *source gear* didesain dengan 1 *pole* yang tidak terputus dan memiliki *envelope* yang akan divariasikan.

Keterangan	Besaran
radius envelope worm	Divariasikan
Radius yoke	10 mm
Jumlah pole	1 poles
Material	NdFeB

Tabel 3. 1 Besaran properti worm



Gambar 3. 2 Desain worm 2D dan 3D

2. Desain Worm Wheel

*Worm wheel* sebagai *driven gear* didesain dengan 60 *poles* dan didesain memiliki radius permukaan.

Keterangan	Besaran
Diameter permukaan dalam	120 mm
Diameter yoke	270 mm
Jumlah pole drive	60 poles
Material	NdFeB

Tabel 3. 2 Besaran properti worm wheel



Gambar 3. 3 Desain 3D worm wheel

# 3.4.3 Pre-processing

Setelah dilakukan pemodelan pada 3D pada SolidWork, dalam *pre-processing*, tentukan variabel kontrol dan variabel moderator sebagai yang divariasikan untuk di*input* ke dalam *software ansys. Gear* didesain dengan variasi dari *envelope* dan jarak *air-gap* dapat dilihat pada tabel 3.2 berikut.

Keterangan	Air-gap
Analisis 1	0.75 mm
Analisis 2	1 mm
Analisis 3	1.25 mm

Tabel 3. 3 variasi air-gap pada gear pada tiap percobaan

Keterangan	Radius worm
Analisis 1	170 mm
Analisis 2	180 mm
Analisis 3	190 mm

Tabel 3. 4 Variasi radius worm pada tiap percobaan

Setelah desain 3D pada *Solidwork* selesai, selanjutnya desain tersebut diimport ke perangkat lunak *Ansys* untuk prosesproses berikutnya, yaitu

## 3. Insert Maxwell 3D Design

Setelah membuka perangkat lunak *Ansys*, petama yang harus dilakukan adalah melakukan setting up Maxwell Project, langkahnya adalah dengan cara pilih '*Project*' pada *toolbar* atas, kemudian pilih '*Insert Maxwell 3D Design* 

# 4. Import modeler

Setelah membuat project Maxwell 3D, selanjutnya adalah meng-*import* desain yang telah dibuat di *Solidwork*. Langkahnya adalah dengan memilih modeler kemudian pilih import. Pilih file yang akan di*import* ke dalam *project Maxwell 3D*.

### 5. Assembly

Tiap komponen akan di-*assembly* dan diatur titik koordinatnya. Tampilan *magnetic worm gear* setelah di-*assembly* ditunjukan pada gambar 3.4.



Gambar 3. 4 Assembly 3D magnetic worm gear

6. Assign material and mesh operation

Tentukan bahan yang digunakan pada masing-masing magnet dengan cara pilih magnet yang akan diproses, kemudian buka modeler dan pilih 'assign material'. Pada penelitian ini magnet yang digunakan adalah NdFeB. Pada tahap ini juga dilakukan proses penentuan arah kutub pada masing magnet. Pengaturan dapat dilakukan setelah dipilih 'clone material'.

Name	Туре	Value	Units
Relative Permeability	Simple	1.0997785406	
Bulk Conductivity	Simple	625000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
<ul> <li>Magnitude</li> </ul>	Vector Mag	-890000	A_per_mete
- R Component	Unit Vector	1	
<ul> <li>Phi Component</li> </ul>	Unit Vector	0	
<ul> <li>Z Component</li> </ul>	Unit Vector	0.36397	
Core Loss Model		None	w/m^3
Mass Density	Simple	7400	kg/m^3
Composition		Solid	

Gambar 3. 5 Penentuan material dan penyusunan kutub magnet

### 7. 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 3.7.



Gambar 3. 6 Gambar 3.6 Pembuatan region pada worm

#### 8. Assign boundaries and excitations

Tahap selanjutnya adalah dengan membuat ruang udara yang yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. Setelah itu dilakukan pengaturan *Eddy current boundaries*. Karena magnet dianggap tidak mengalami *eddy effect* maka pada pengaturannya diset menjadi *default*.

9. Set up mesh and Iterate

Pengaturan *mesh* merupakan langkah untuk mendapatkan proses iterasi yang mencapai kondisi konvergen, yaitu kondisi dimana *error* masih dalam batas yang diizinkan. Kondisi tersebut dapat dianalisis dengan terlebih dahulu menentukan *error tolerance* dan mengatur metode *adaptive process*.

Pada *adaptive time* atur masing-masing *stop time* dan *initial time* yang telah ditentukan. Setelah pengaturan selesai, kemudian dilakukan langkah *iterate* yaitu perhitungan untuk mengetahui apakah kondisi kovergen tercapai.

Kondisi konvergen tercapai jika hasil dari adaptive process lebih kecil daripada *error tolerance*. Jika nilainya masih lebih besar daripada *error tolerance*, maka lakukan perbaikan pada tahap *assign material* and *mesh operation*.

## 3.4.4 Processing

Tahap processing adalah tahap dimana dilakukan beberapa pengaturan yang berkaitan dengan meshing, langkahlangkahnya antara lain:

### 1. Assign Mesh Operation

Pada tahap pre-processing sebelumnya, akan didapatkan panjang mesh dengan kondisi yang masuk kriteria konvergen. Atur mesh pada msaing-masing magnet sesuai dengan hasil yang didapat.

#### 2. Setting motion

Tentukan yang mana yang akan menjadi *drive gear*, kemudian lakukan pengaturan *motion* dengan putaran 600 rpm.

	Motion Setup	×
	Type Data Mechanical	
Version of the second sec	Consider Mechanical Transient Angular Velocity: 360 rpm 💌	
	ОК	Cancel

Gambar 3. 7 Pengaturan motion pada magnetic worm gear

3. Assign Parameter

Tentukan parameter yang ingin ditampilkan oleh Ansys, dapat berupa torsi, kerapatan medan magnet ataupun kuat medan magnet.

4. Validation Check

Validation check adalah langkah pengecekan ulang pada setiap proses yang telah dilakukan untuk memastikan tidak ada kesalahan ataupun langkah yang belum dikerjakan.

5. Analyze Process

Jika pada validation check menunjukkan bahawa proses dan parameter telah lengkap dan benar, selanjutnya dilakukan proses simulasi dan analisis.

## 3.4.5 Post-Processing

*Post-processing* adalah proses pengambilan data dan hasil simulasi. Data yang akan didapatkan adalah data kuantitatif torsi magnetik *gear* pada *worm*, kerapatan medan magnet, dan kuat medan magnet. *Pos- processing* dilakukan sesuai dengan varisi yang telah ditentukan sebelumnya.setiap variasi *air-gap* dilakukan di setiap kondisi variasi radius *envelope*.

		T <i>max</i> (Nm)			
Desain	Dimensi	Air gap	Air gap 1	Air gap	
		0,75 mm	mm	1,25 mm	
Env 1	170 mm				
Env 2	180 mm				
Env 3	190 mm				

Tabel 3. 5 Lembar Data penelitian

## 3.5 Metode Analisis dan Pembahasan

Metode analisis data adalah suatu metode yang digunakan untuk mengolah hasil penelitian dan kemudian menarik kesimpulan dari data yang ada. 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*. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode kuantitatif dengan teknik analisis korelasi dan komparasi.

Analisis korelasi adalah analisis yang berusaha untuk mencari hubungan antara dua buah variabel atau lebih. Dalam penelitian ini yang akan dikorelasikan adalah hubungan antara jumlah *pole*, dan *air-gap* pada magnetik *gear* dengan torsi yang dihasilkan,

Analisis komparasi adalah teknik analisis yang bertujuan utuk membandingkan antara dua buah kondisi. Dalam penelitian kondisi yang dikomparasi adalah perbandingan volume dan dimensi antara mekanikal *gear* dengan magnetik *gear* dengan torsi yang sama.

## 3.6 Diagram Alir Proses Simulasi

Proses perancangan menggunakan software SolidWork dan simulasi menggunakan Ansys Maxwell ditunjukkan dalam diagram alir pada gambar 3.3 di bawah ini.





Gambar 3. 8 Diagram alir proses simulasi

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

## 4.1 Data Hasil Simulasi

Simulasi dan penelitian dilakukan dengan menggunakan *software Ansys Maxwell Electromagnetic* dengan desain berupa *worm* sebagai *drive gear* dan *worm wheel* sebagai *driven gear*. Desain dibuat dengan menggunakan prinsip "kontak internal" yang sebelumnya pernah dilakukan penelitian oleh Kikuchi pada tahun 1993. Pada *worm wheel* terdapat 33 pasang kutub. Variasi yang dilakukan adalah *air gap* yaitu 0.75 mm, 1 mm, dan 1.25 mm, dan juga radius profil *envelope* yaitu 170 mm, 180 mm, dan 190 mm. Secara lebih jelas, desain dapat dilihat pada gambar 4.1 di bawah.



Gambar 4. 1 Desain geometri magnetic worm gear

Dalam penelitian dan simulasi yang dilakukan, akan didapatkan data berupa grafik torsi terhadap waktu. Data awal yang di-*input*-kan ke dalam simulasi adalah berupa kecepatan 600 rpm dan *time step* setiap 0.04 s. Contoh grafik yang dihasilkan dari simulasi ditampilkan dalam gambar 4.2 berikut.



Gambar 4. 2 Grafik torsi terhadap waktu hasil simulasi

Grafik 4.2 menampilkan torsi per satuan waktu selama 1 detik. Grafik menunjukkan pengulangan bentuk yang cenderung sama. Grafik menunjukkan garis pada masing masing komponen, yaitu High Speed (HS) menunjukkan torsi pada *worm* dan *Low Speed* (LS) merupakan torsi pada *worm wheel*.

Dalam proses simulasi ini ada dua hasil utama yang akan diperlihatkan, yaitu torsi maksimum dan *flux density*. Untuk distribusi *flux density* itu sendiri dapat dilihat secara visual yang didefinisikan berupa warna pada tiap komponen *gear*, seperti terlihat pada gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4. 3 Distribusi flux density pada magnetic worm gear

Gambar 4.3 adalah distribusi *flux density* atau kerapatan flux medan magnet (B). Bagian yang berwarna (biru) merupakan daerah yang memiliki kerapatan flux tertinggi pada *gear* magnet, sedangkan untuk daerah yang tidak berwarna (putih) adalah bagian *gear* yang memiliki kerapatan massa kecil atau bahkan
tidak ada. *Range* nilai kerapatan fluxnnya diperjelas dengan tabel warna B.

Hasil dari simulasi ini adalah berupa torsi, dan medan magnet. Untuk torsi maksimum yang dihasilkan dari setiap variasi *air gap* dan *envelope*. Data tersebut kemudian dituliskan pada tabel 4.1.

		Jumlah	T <i>max</i> (Nm)		
Desain	Dimensi	pole	Air gap	Air gap	Air gap
		(pasang)	0,75 mm	1 mm	1,25 mm
Env 1	170 mm	30	7,25	7,19	5,2
Env 2	180 mm	30	9	7,35	6,1
Env 3	190 mm	30	9,3	7,5	7,13

Tabel 4. 1 Data torsi maksimum hasil simulasi

### 4.2 Analisis Pengaruh Variasi Air gap terhadap Torsi

Data hasil simulasi yang ada pada tabel 4.1 akan dibahas dan ditampilkan dalam bentuk grafik untuk setiap variasi *envelope*. Grafik berupa perbandingan torsi maksimal pada setiap *air gap*. Grafik pada gambar 4.4 adalah hasil pengujian dari *envelope* radius 170 mm.



Gambar 4. 4 Grafik torsi terhadap *air-gap* pada *envelope* R170 mm

Gambar 4.4 adalah grafik hubungan antara torsi maksimum yang diperoleh pada masing-masing *air gap*. Grafik menunjukkan *trendine* torsi maksimum yang cenderung menurun pada saat jarak *air gap* diperbesar. Pada *air gap* 0.75 mm torsi maksimum yang dihasilkan adalah 7.25 Nm, yang kemudian menurun pada *air gap* 1 mm menghasilkan torsi maksimum 7.19 Nm. kemudian pada *air gap* 1.25 mm, torsi maksimum yang dihasilkan adalah 5.2 Nm.



Gambar 4. 5 Grafik torsi terhadap *air-gap* pada *envelope* R180 mm

Gambar 4.5 menunjukkan grafik hubungan antara torsi maksimum yang diperoleh pada masing-masing *air-gap* pada desain *worm* dengan *envelope* radius 180 mm. Grafik menunjukkan *trendine* torsi maksimum cenderung menurun pada saat jarak *air gap* diperbesar. Pada *air gap* 0.75 mm torsi maksimum yang dihasilkan adalah 9 Nm yang merupakan nilai tertinggi, yang kemudian turun pada *air-gap* 1 mm menghasilkan torsi maksimum 7.35 Nm. Kemudian menurun lagi pada *air gap* 1.25 mm dimana torsi maksimum yang dihasilkan adalah 6.1 Nm.



Gambar 4. 6 Grafik torsi terhadap *air-gap* pada *envelope* R190 mm

Gambar 4.6 menunjukkan grafik hubungan antara torsi maksimum yang diperoleh pada masing-masing *air-gap* pada desain *worm* dengan *envelope* radius 180 mm. Grafik menunjukkan *trendine* torsi maksimum cenderung menurun pada saat jarak *air gap* diperbesar. Pada *air gap* 0.75 mm torsi maksimum yang dihasilkan adalah 9.3 Nm dan merupakan yang terbesar, yang kemudian menurun pada *air gap* 1 mm menghasilkan 7.5 Nm. Kemudian menurun lagi pada *air gap* 1.25 mm dimana torsi maksimum yang dihasilkan adalah 7.13 Nm.

Dari ketiga grafik di atas, terdapat suatu *trendline* dimana penurunan nilai torsi terjadi ketika jarak *air gap* diperbesar 0. 25 kali mulai dari jarak 0.75 hingga 0.25. kecenderungan tersebut terjadi pada ketiga variasi radius *envelope*, baik 170 mm, 180 mm, maupun 190 mm. maka dapat disimpulkan bahwa semakin besar jarak *air gap* antar magnet akan menyebabkan torsi yang dihasilkan semakin kecil.

Berdasarkan persamaan torsi permukaan radial,

$$T_{r}(\emptyset) = \frac{2M_{s}cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right)L(R_{2}-R_{1})}{Nr}\sum_{P=0}^{N_{pole}^{-1}}\sum_{q=0}^{Ns}(-1)^{p}Sr(q)r(q) \times \left[cos\left(\emptyset_{edge}(\emptyset,p)B_{x}^{ext}\left(r(q),\emptyset_{edge}(Q,p)\right)\right)\right]$$

Dapat dilihat hubungan antara magnetisasi (Ms) berbanding lurus dengan torsi yang dihasilkan, semakin besar magnetisasinya maka akan semakin besar juga torsi yang dihasilkan, begitu juga sebaliknya. Nilai magnetisasi dipengaruhi oleh nilai *flux density* remanensi, dimana besar nilai remanensi tergantung dari jarak *air gap* nya. Semakin jauh jarak *air gap*, maka nilai fluks remanensi akan semakin kecil. Sehingga fenomena yang terjadi pada hasil simulasi telah sesuai dengan teori yang ada.

Pengaruh *air gap* terhadap torsi maksimum juga dapat dilihat pada distribusi *flux density* yang ditunjukkan pada gambar 4.7 di bawah ini.





Gambar 4.7 Perubahan distribusi *flux density* dengan variasi *air gap* a) 0,75 mm b) 1 mm, dan c) 1,25 mm

Data berupa distribusi *flux density* pada gambar 4.7 diambil dari desain *worm gear* dengan *envelope* 190 mm. Pada gambar tersebut terlihat distribusi *flux density* pada *air gap* 0,75 hampir memenuhi seluruh bagian *worm wheel*, kemudian penyebarannya mulai menurun pada saat *air gap* dinaikkan menjadi 1 mm. begitu juga pada saat *air gap* dinaikkan lagi menjadi 1,25 mm menghasilkan distribusi *flux density* yang tidak merata, hanya terlihat di bagian-bagian tertentu, kebanyakan terdapat pada bagian sisi-sisi magnet yang menempel satu sama lain. Dari fenomena tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan *air gap* menyebabkan penurunan distribusi *flux density*, yang mana juga akan mempengaruhi torsi yang dihasilkan.

Untuk memperjelas fenomena tersebut maka dilakukan juga pengujian dua dimensi pada kondisi *air gap* 0,75 mm dan 1 mm pada. Pengujian ini menggunakan *software* FEMM 4.2, dan didapatkan hasil seperti gambar 4.8 di bawah ini.



Gambar 4. 8 Distribusi *flux density* 2 dimensi pada kondisi *air gap* a) 0,75 mm, dan b) 1 mm

Pada gambar 4.8 menunjukkan adanya perbedaan atau perubahan warna pada bagian tengah *worm* dari kondisi a) dimana *air gap* berjarak 0,75 mm menjadi 1 mm. Perubahan warna tersebut mengindikasikan adanya perbedaan distribusi *flux density*. Hal tersebut diperkuat dengan nilai *flux density* remanensi pada masing-masing kondisi dimana pada *air gap* 0,75 mm nilai *flux density* sebesar 0,220322 Tesla dan pada *air gap* 1 mm nilai *flux density* sebesar 0,217876 Tesla. Hal tersebut sesuai dengan teori bahwa pada magnetisasi, jarak antar magnet mempengaruhi nilai *flux density*. Semakin besar jarak *air gap* maka akan menyebabkan semakin kecil nilai *flux density*, dan menyebabkan nilai torsi mengecil juga.

Setelah diketahui melalui gambar 4.7 dan 48 beserta penjelasannya bahwa *flux density* mempengaruhi besar torsi maksimum, kemudian dilakukan pengamatan pada *flux density* dari *worm gear* tersebut. Pengujian dilakukan pada sistem *worm gear magnetic* dengan *air gap* 0,75 dan radius *envelope worm* 190 mm. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui perbandingan antara *flux density* di tiap koordinat, yaitu Bx, By, dan Bz. Hasil dari pengujian ditunjukkan pada gambar 4.9.





Gambar 4. 9 a) Grafik *flux density* pada arah x, y, dan z b) flux density resultan

Gambar 4.9 adalah *grafik flux density* dimana grafik a) menunjukkan *flux density* pada x, y, dan z, sedangkan b merupakan total atau resultan dari *ketiga flux density* tersebut. Grafik a) menunjukkan bahwa nilai tertinggi dari grafik terdapat pada garis Bz. Maka pada kondisi desain dari *worm envelope* 190 mm, Bz memberikan pengaruh paling besar terhadap nilai torsi maksimum dibandingkan *flux density* By dan Bx. Hal tersebut terjadi karena interaksi magnet atau magnetisasi paling besar terjadi pada arah z, karena gaya magnet (F) yang terjadi antara *worm wheel* dan *worm* adalah pada arah z.

#### 4.3 Analisis Pengaruh Radius Envelope terhadap Torsi

Gambar 4.10 menunjukkan hubungan antara torsi maksimum terhadap variasi *envelope*. Masing-masing grafik menunjukkan *trendline* yang menurun pada kenaikan *air gap*. Pada *air gap* 0.75 mm, torsi tertinggi dihasilkan *worm envelope* R 190 dengan nilai 9.3 Nm kemudian *worm envelope* R 180 menghasilkan Torsi maksimum sebesar 9 Nm dan kemudian pada *envelope* R170 mengasilkan torsi maksimum 7.25 Nm. Pada *air gap* 1 mm , *worm gear envelope* 190 menghasilkan Torsi

maksimum 7.5 Nm kemudian *worm envelope* R 180 menghasilkan torsi maksimum 7.35 Nm, dan *worm envelope* R 190 menghasilkan rotsi maksimum 7.19. Pada titik ini nilai torsi maksimum disetiap variasi *envelope* cenderung dekat namun tetap menunjukkan adanya penurunan. Pada *air gap* 1.25 mm, *worm* dengan *envelope* R 190 menghasilkan Torsi maksimum 7.13 Nm, kemudian berturut-turut pada *envelope* R180 mm dan R 170 mm menghasikan torsi maksimum sebesar 6.1 Nm dan 5.2 Nm.



Gambar 4. 10 Grafik perbandingan Tmax terhadap envelope

Pada setiap jarak *air gap*, kenaikan besar radius *envelope* menghasilkan penurunan torsi maksimum. Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa radius *envelope* pada *worm gear* berbanding terbalik dengan torsinya. Semakin besar radius maka semakin kecil torsi yang dihasilkan. Dari fenomena tersebut dapat disimpulkan bahwa *envelope* yang semakin besar menghasilkan torsi yang lebih besar, begitu juga sebaliknya.

Berdasarkan persamaan torsi permukaan radial, untuk magnetic worm gear,

$$T_{r}(\emptyset) = \frac{2 \int_{0}^{L_{env}} (M_{s}) dx \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right) L_{env}(R_{2} - R_{1})}{Nr} \sum_{P=0}^{N_{pole}^{-1}} \sum_{q=0}^{Ns} (-1)^{p} Sr(q) r(q) \times \left[ \cos\left(\emptyset_{edge}(\emptyset, p) B_{z}^{ext}\left(r(q), \emptyset_{edge}(Q, p)\right)\right) + \left[ \sin\left(\emptyset_{edge}(\emptyset, p) B_{x}^{ext}\left(r(q), \emptyset_{edge}(Q, p)\right)\right) \right] \right]$$

Dimana, Ms itu sendiri adalah magnetisasi yang terjadi, yang dapat diuraikan seperti berikut,

$$M_{s} = \frac{\overline{B_{r}}}{\mu_{0}\pi} \frac{2N_{p}}{1 - (\frac{1}{2}iN_{p})^{2}} \left[ sin\left(\frac{\pi}{N_{p}}\right) cos\left(\frac{\pi}{2}i\right) - \frac{1}{2}iN_{p}cos\left(\frac{\pi}{N_{p}}\right) sin\left(\frac{\pi}{2}i\right) \right]$$

Pada persamaan magnetisasi terdapat remanence rata-rata  $(\overline{B_r})$  yang merupakan ukuran kekuatan rata-rata medan magnet yang terjadi. Remanence rata-rata tersebut terjadi di sepanjang area antara worm dan worm wheel pada arah sumbu z, yaitu pada sepanjang Lenv. Lenv adalah persamaan garis yang menyatakan ukuran envelope pada worm. Adanya envelope menyebabkan perbedaan jarak air gap di setiap titik sepanjang L, sehingga remanence dinyatakan menggunakan rata-rata. Persamaan menunjukkan bahwa magnetisasi (Ms) berbanding lurus dengan remanence rata-rata yang terjadi. Dapat dilihat hubungan antara magnetisasi (Ms) berbanding lurus dengan torsi yang dihasilkan, semakin besar magnetisasinya maka akan semakin besar juga torsi yang dihasilkan, begitu juga sebaliknya. Semakin besar radius envelope pada worm akan menyebabkan semakin banyak sisi worm yang mengalami interaksi terhadap bagian worm wheel. Semakin besar daerah kontaknya maka akan menyebabkan magnetisasi menjadi semakin besar, sehingga menghasilkan torsi yang lebih besar.

-

Untuk memperjelas, dilakukan pengamatan 2 dimensi dengan bentuk yang menyerupai kondisi pada *worm gear*. Simulasi dilakukan menggunakan FEMM dan dibandingkan antara *worm envelope* 170 mm dan 180 mm. simulasi dilakukan pada kondisi *air gap* 1 mm. hasil dari simulasi 2dimensi FEMM ditunjukkan pada gambar 4.11 a) dan 4.11 b).



Gambar 4. 11 distribusi *flux density* pada kondisi 2 dimensi *envelope* a). 190 mm dan b) 170 mm

Pada gambar 4.11 dapat dilihat bahwa distribusi *flux density* terbesar terjadi pada daerah dimana *worm* dan *worm wheel* berada pada posisi yang paling dekat (*air gap* 1 mm). warna yang kemerahan menunjukkan adanya *flux density* yang besar, kemudian pada daerah yang mengalami gradasi warna menjadi kekuningan dan hijau adalah daerah dengan *flux density* yang bernilai lebih kecil. Pada gambar 4.11 a) yaitu *worm envelope* 190 mm terlihat bahwa daerah distribusi *flux density* lebih banyak dan bernilai lebih tinggi dibandingkan dengan *worm envelope* 170 mm. Hal ini menguatkan perolehan hasil awal yang disimulasikan menggunakan *Ansys Maxwell* 3 dimensi. Maka dapat disimpulkan bahwa fenomena dimana radius *envelope* pada *worm* berbanding lurus dengan torsi yang dihasilkan telah sesuai dengan teori yang ada.



a)



b)



Gambar 4. 12 Perubahan distribusi *flux density* dengan variasi radius *envelope* a) 170 mm b) 180 mm, dan c) 190 mm

Gambar 4.12 menunjukkan distribusi flux density pada masing-masing variasi envelope. Perbandingan ketiga distribusi ini diambil pada kondisi air gap yang sama yaitu 0,75 mm. Gambar tersebut menunjukkan adanya perbedaan distribusi flux density pada masing-masing envelope. Gambar a) envelope 170 mm mengalami distribusi terbesar hanya pada sebagian kecil area wheel. Pada gambar b) terjadi peningkatan area persebaran flux density dibandingkan dengan kondisi envelope 170 mm. Pada gambar c) merupakan envelope 190 mm terlihat terjadi distribusi flux density hampir disemua bagian wheel. Sehingga dapat dikatakan bahwa profil dari worm gear mempengaruhi distribusi flux density-nya. Distribusi pada envelope 190 merupakan yang paling luas dan merata distribusinya, hal tersebut telah sesuai dengan teori dari persamaan di atas, bahwa semakin luas daerah interaksi antara worm dan wheel menyebabkan peningkatan magnetisasi mengakibatkan peningkatan nilai dan torsi. Perubahan warna menunjukkan perbedaan nilai flux density (B) di setiap area pada masing-masing variasi gear.

Kemudian dilakukan juga pengujian untuk mendapatkan perbandingan kondisi *flux density* di setiap arah koordinat, yaitu Bx, By, dan Bz. Hasil pengujian ditunjukkan pada gambar 4.13.



Gambar 4. 13 a) Grafik *Flux density* pada arah x, y, dan z b) *flux density* resultan

Gambar 4.13 a) merupakan grafik perbandingan dari *flux density* pada arah x, y dan z dan b) merupakan resultan dari nilai ketiga flux density tersebut. Grafik tersebut diambil dari data pada desain *worm gear* dengan radius *envelope worm* 180 mm dan *air gap* 0,75 mm. Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai tertinggi dari grafik terdapat pada garis Bz. *Flux density* Bz memberikan pengaruh paling besar terhadap nilai torsi maksimum dibandingkan *flux density* By dan Bx. Hal tersebut terjadi karena interaksi magnet atau magnetisasi paling besar terjadi pada arah z, karena gaya magnet (F) yang terjadi antara *worm wheel* dan *worm* adalah pada arah z.

## 4.4 Perbandingan antara Magnetic Worm Gear dengan Mechanical Worm Gear

Setelah didapatkan hasil berupa torsi maksimum dari beberapa variasi, dilakukan perbandingan antara *gear* mekanik dan *gear* magnetik berdasarkan volume *gear* yang sama. Pembanding dari mechanical *worm gear* diambil dari katalog dengan kondisi geometri mendekati geometri *magnetic worm gear*. Mekanik *gear* memiliki bahan dari FC 200 (*gray iron*). Perbandingan tersebut ditampilkan dalam bentuk tabel 4.13 dibawah ini.



Gambar 4. 14 a) *mechanical worm gear*, dan b) *magnetic worm gear* 

raber 4. 2 rerbandingan geur mekanik dan geur magnetik					
Gear	Magnetik	Mekanik	Satuan		
Material	NdFeB	FC 200			
Yield strength	-	206	MPa		
Torsi max	9,31	194	Nm		
Volume	0,00676	0,00663	$m^3$		
Rasio	1:60	1:60			
Torsi density	1,377	29,26	KNm/m <sup>3</sup>		
modul	-	6			

Tabel 4. 2 Perbandingan gear mekanik dan gear magnetik

Gambar 4.14 adalah perbandingan bentuk antara magnetic gear yang dibuat seperti desain mechanical gear dengan prinsip berputar kemudian sama, dimana worm kerja vang mentransimisikan dan mengubah arah gerak putaran. Dari proses simulasi dan pengujian, didapatkan bahwa torsi terbesar magnetic gear adalah 9,31 Nm pada desain radius envelope worm 190 mm pada jarak air gap mm 0,75. Maka dilakukan perbandingan dengan mechanic gear pada kondisi volume yang sama. Mechanical gear yang digunakan adalah yang berbahan FC 200 atau gray iron. Pada putaran dan volume yang sama, mechanic gear memiliki torsi maksimum 194 Nm. Maka perbandingan torsi density antara mechanical gear dengan magnetic gear adalah 1:29,26. Dari hasil tersebut diketahui bahwa torsi magnetic gear masih cukup jauh dibandingkan worm gear dengan kondisi seperti di atas (tabel 4.2), yang artinya adalah bahwa magnetic gear ini belum bisa menggantikan worm gear FC 200 dengan modul 6 tersebut.

Untuk mencari spesifikasi yang sama seperti *magnetic worm gear* yang telah di simulasikan, ada beberapa faktor yang dapat dipertimbangkan untuk diubah seperti material dan modul pada *mechanical gear*. Ada beberapa kondisi mechaniacl gear yang telah dipertimbangkan dan memungkinkan untuk dibandingkan dan digantikan dengan *magnetic worm gear* yaitu MC901 Ny dengan modul 0,1, worm material *Acetal* dengan modul 0,2, *High Impact Polystyrene* dengan modul 0,6. Sehingga dapat disimpulkan bahwa desain dari *magnetic worm gear* yang telah disimulasikan dan diuji dapat menggantikan beberapa mechanical worm gear dengan kondisi tertentu seperti yang telah disebutkan sebelumnya.

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan pengujian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

- 1. Dari data dan penelitian yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa jarak *air gap* berbanding terbalik dengan torsi maksimum yang dihasilkan. Pengujian dilakukan pada kondisi variasi *air gap* 1,25 mm, 1 mm, dan 0,75 mm. Kenaikan masing-masing torsi secara berurutan mulai dari air gap terbesar menuju ke terkecil adalah sebagai berikut, pada *envelope* 170 mm kenaikan 38 % dan 0,83%. Pada envelope 180 mm kenaikan terjadi sebesar 20,49% dan 22,44%. Pada envelope 190 mm kenaikan torsi sebesar 5,1% dan 24%.
- 2. Setelah dilakukan pengujian dengan memvariasikan radius envelope pada worm yaitu R 170 mm, R 180 mm, dan R 190 mm, didapatkan bahwa radius worm berbanding lurus dengan torsi maksimum vang dihasilkan. Hal tersebut dikarenakan radius vang semakin menyebabkan sisi besar worm yang berinteraksi dengan worm wheel akan semakin luas, dan hal tersebut menyebabkan magnetisasi semakin besar sehingga menghasilkan torsi maksimum yang lebih besar. Berikut persentase kenaikan torsi berurutan mulai dari envelope terkecil hingga envelope terbesar yaitu, pada air gap 1,25 mm kenaikan sebesar 17,3% dan 16,8%. Pada air gap 1 mm kenaikan terjadi sebesar 2,22% dan 0,20%. Pada air gap 0,75 mm kenaikan terjadi sebesar 24,13 % dan 3,33%.
- Dari data dan hasil yang diperoleh, nilai torsi terbesar dari *magnetic worm gear* yang telah didesain adalah 9,3 Nm. Kondisi tersebut diperoleh menggunakan worm dengan radius *envelope* 190 mm pada jarak air gap 0,75

mm, dengan torsi density 1,377 KNm/m<sup>3</sup>. Hasil tersebut dibandingkan dengan *mechanical worm gear* pada kondisi *volume* dan kecepatan yang sama. Didapatkan bahwa *magnetic gear* dapat menggantikan beberapa spesifikasi *mechanical gear*, diantaranya *worm gear* dengan material MC901 Ny dengan modul 0,1, *worm* material *Acetal* dengan modul 0,2, *High Impact Polystyrene* dengan modul 0,6.

## 5.2 Saran

Berdasarkan simulasi dan pengujian yang telah dilakukan, ada beberapa saran yang penulis anjurkan, yaitu:

- 1. Perlu dilakukannya simulasi dengan *software* lain untuk validasi dan perbaikan kekurangan dari *Ansys Maxwell* seperti waktu untuk melakukan simulasi yang cukup lama.
- 2. Perlu dilakukan pengujian dengan variasi desain lain, baik *worm* ataupun *worm wheel* untuk menemukan torsi maksimum yang lebih tinggi.
- 3. Dalam simulasi, disarankan menggunakan *time step* yang lebih kecil untuk menghasilkan grafik torsi dengan pola yang lebih baik.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

Baermann, M. 1972. *Magnetic Worm Drive*. *3*,814,962 US Patent, 11 22.

- Budynas dan Nisbett.2006.Shifley's Mechanical Engineering Design, Eighth Edition.United States:McGraw
- Idayanti,N dan Dedi.Karakterisasi Komposisi Kimia Magnet NdFeB dengan Energi Disfersive Soectroscopy (EDS).2006.Jurnal Elektronika No 2 Vol 6.ISSN1411-8259
- Joergensen dan Thorlief, F. 2010. Design and construction o permanent magnetic gears. Denmark:Aalborg Universitet
- Khurmi, R.S dan Gupta, J.K. 2015. A Textbook of Machine Design (S.I.Units).India:Eurasia Publishing House

Kikuchi, S dan Tsurumoto, K. Design and Charateristics of a New Magnetic Worm Gear Using Permanent Magnet. Issue: 6, 1993, Magnetics, IEEE Transactions on, Vol. 29, pp. 2923-2925.

Kjeldsteen, P. 2016. Reluctant gear: Sintex

Kuczmann, M. 2009. Potential Formulations in *Magnetics* Applying The Finite Element Method. Hungary:Szechenyi Istvan University

Manaf, A. 2000. Magnet Permanen Berbasis Nd-Fe-B. ISSN 1411-7630

Mousavi, S.2015. Design of Type High Efficiency Magnetic Gear.Turkey:Instanbul Technical University

Ruoho, S. 2007. Demagnetisation of Permanent Magnets in Electrical Machines.

- Shewane, P dkk.2014.An Overview of Neodymium Magnets over Normal Maganets for the Generation of Energy. Issue:12, IJRITCC, Vol.2.ISSN2321-8169
- Taufik, dkk. 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.
- Wu, Y.-C., and Wang, C.-W. 2015. Transmitted Torque Analysis of *Magnetic gear* Mechanism with Rectanguler Magnets. *Applied Mathematics & Information sciences*

### LAMPIRAN

## Gambar A1. Spesifikasi mechanical worm gear



## Gambar A1. Spesifikasi mechanical worm gear (lanjutan)



0.17~0.37

6.36

KCG4-60L1

#### Bronze Worm Wheels & Gray Iron Worm Wheels

17 52 (12) (218)

151 348 288 233 194

# **BIODATA PENULIS**



Christian Robby Silalahi dilahirkan di Medan, 03 Juli 1994 merupakan anak pertama dari tiga bersaudara yang terlahir dari orangtua bernama Robert Silalahi dan Ibu Yuli Harefa. Riwayat pendidikan penulis diawali di TK pertiwi Sidikalang selama dua tahun, kemudian SD Methodist 6 Medan selama tiga tahun mulai dari tahun 2000-2003, kemudian pindah ke SD ST. Yosef Sidikalang selama tiga tahun yaitu

tahuh 2003-2006. Selanjutnya penulis menempuh sekolah menegah petama di SMP Negeri 1 Sidikalang selama tiga tahun mulai tahun 2006-2009, dan kemudian SMA Negeri 1 Sidikalang pada tahun 2009-2012. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan jenjang D-3 selama tiga tahun jurusan Teknik Mesin di Politeknik Negeri Bandung (POLBAN) pada tahun 2012-2015. Kemudian melanjutkan pendidikan jenjang S-1 jurusan Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Selama di pendidikan lanjutan, penulis pernah mengikuti beberapa organisasi dan pelatihan. Pada perkuliahan jenjang D-3 penulis pernah menjabat sebagai sekretaris umum di UKM Persekutuan Mahasiswa Kristen Bandung POLBAN. Penulis juga terdaftar sebagai anggota UKM otomotif POLBAN, anggota Himpunan Mahasiswa Mesin POLBAN bidang riset dan teknologi. Di perkuliahan jenjang S-1 ITS, penulis pernah mengikuti pelatihan Kursus Dasar-Dasar Otomotif (KDDO) 2017.

Penulis mempunyai prinsip bahwa segala sesuatu adalah tentang belajar, pastikan untuk terus bergerak maju, sekecil apapun langkahmu. Dan keberhasilan adalah berkat dari Tuhan ketika kita berdoa dan mengerjakan dengan sungguh-sungguh. Apabila ada kritik dan saran mengenai tugas akhir ini atau yang lainnya, dapat menghubungi penulis lewat email c.tian\_silalahi@yahoo.co.id