



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

ANALISA STUDI OPTIMASI JARI-JARI *MAGNETIC SPUR GEAR RADIAL* DENGAN RASIO PUTAR 1:2

AKHMAD GAFAR
0211114000071

Dosen Pembimbing
Dr. Agus Sigit Pramono, DEA

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



TUGAS AKHIR – TM141585

**ANALISA STUDI OPTIMASI JARI-JARI *MAGNETIC*
SPUR GEAR RADIAL DENGAN RASIO PUTAR 1:2**

Akhmad Gafar

NRP. 02111140000071

Pembimbing:

Dr.Ir. Agus Sigit Pramono , DEA

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA 2018

**ANALISA STUDI OPTIMASI JARI-JARI *MAGNETIC*
SPUR GEAR RADIAL DENGAN RASIO PUTAR 1:2**

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 :

AKHMAD GAFAR
NRP. 2111140000071

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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

SURABAYA

JULI, 2018

ANALISA STUDI OPTIMASI JARI-JARI *MAGNETIC SPUR GEAR RADIAL* DENGAN RASIO PUTAR 1:2

Nama Mahasiswa : Akhmad Gafar
NRP : 02111140000071
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono , DEA

ABSTRAK

Magnetic gear yang dikembangkan pada saat ini banyak menggunakan bahan *Neodymium*, karena *neodymium* dapat menghasilkan kekuatan magnet yang tinggi. Biaya pembuatan *Magnetic gear* berbahan *neodymium* jauh lebih mahal jika dibandingkan dengan biaya pembuatan gear biasa karena bahan baku *neodymium* jauh lebih mahal. Dalam proses pembuatan *magnetic gear* harus optimal supaya menekan biaya pembuatan, maka dari itu peneliti bermaksud untuk mengoptimasi jari-jari *magnetic spur gear radial* supaya menghasilkan *torque density* yang optimal.

Berdasarkan permasalahan tersebut, diperlukan sebuah solusi untuk metode penelitian berupa optimisasi menggunakan MATLAB. Langkah pertama yaitu studi literatur tentang pengembangan dan penelitian mengenai *magnetic spur gear* yang sudah ada beserta optimasi *torque density*. Langkah berikutnya menentukan konfigurasi dan spesifikasi awal dari system *magnetic spur gear* yang dirancang. Langkah selanjutnya menentukan konstrain jari-jari yang dioptimasi, menetapkan lebar magnet dan luas konstrain. Setelah konstrain ditentukan, dilakukan optimasi jari-jari rancangan melalui *software* MATLAB. Hasil jari-jari yang didapat, lalu diverifikasi menggunakan Excel untuk memperkuat hasil optimasi. Tahap terakhir yaitu mensimulasikan jari-jari hasil

optimasi dengan FEMM untuk mengetahui *flux* yang terjadi dan hasil simulasi FEMM dianalisa.

Dari hasil optimasi pada variasi pole 4:8 didapatkan *torque density* optimal sebesar 1,650 kN/m², pada variasi pole 6:12 didapatkan *torque density* optimal sebesar 1,354 kN/m², dan pada variasi pole 8:16 didapatkan *torque density* optimal sebesar 1,22 kN/m². Jumlah pole mempengaruhi besar *torque density* yang dihasilkan, semakin sedikit jumlah pole magnet maka semakin besar *torque density magnetic spur gear*. Hasil dari penelitian didapatkan bahwa hasil *torque density* yang optimal terdapat pada variasi 4:8.

Kata kunci : *Magnetic gear*, FEMM, optimasi.

ANALISA STUDI OPTIMASI JARI-JARI MAGNETIC SPUR GEAR RADIAL DENGAN RASIO PUTAR 1:2

Nama Mahasiswa : Akhmad Gafar
NRP : 02111140000071
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono , DEA

ABSTRAK

Magnetic gear developed at this time many use Neodymium material, because neodymium can produce high magnetic strength. The cost of making neodymium magnetic gear is much more expensive when compared to the cost of making ordinary gear because neodymium raw material is much more expensive. In the process of making magnetic gear must be optimal in order to reduce the cost of manufacture, therefore the researcher intends to optimize radius magnetic spur gear radial to produce optimal torque density.

Based on these problems, we need a solution for research method in the form of optimization using MATLAB. The first step is a study of literature on the development and research of existing magnetic spur gear along with torque density optimization. The next step determines the initial configuration and specification of the designed magnetic spur gear system. The next step determines the optimized radius constraint, determining the magnetic width and the area of the constraint. After the constraint is determined, optimization of the design radius is done through MATLAB software. The results of the radius obtained, then verified using Excel to strengthen the optimization results. The final step is to simulate the optimized radius with FEMM to find out the flux and FEMM simulation results are analyzed.

From the optimum result of the 4: 8 pole variation, the optimum torque density is 1, 650 kN/m². In the 6:12 pole variation the optimum torque density is 1, 354 kN/m², and at 8:16 pole variation, the optimum torque density is 1, 22 kN/m². The number of poles affects the amount of torque density produced, the less the number of magnet poles the greater the torque density magnetic spur gear. The result of this research shows that optimal torque density result is 4: 8 variation.

keywords : Magnetic gear, FEMM, optimization.

KATA PENGANTAR



Puji syukur dihaturkan kehadiran Allah SWT, hanya karena tuntunan-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan Pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksanakan dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Orangtua penulis, Ibu **Rahmatia** dan Bapak **Akhmadi** yang senantiasa mendoakan, membimbing dan memberikan semua hal terbaik untuk penulis.
2. Seluruh keluarga penulis yang selalu memberikan dukungan, doa, motivasi dan nasihat kepada penulis.
3. **Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA** selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan dan arahan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. **Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E, Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD, dan Ir. Julendra B. Ariatedja, MT** selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik kepada penulis dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.
5. Tim seperjuangan Tugas Akhir, **Akbar Robbi Cahyana** dan **M.Fajar Putra Utomo**, terima kasih atas dukungan dan kerjasama yang diberikan selama ini.
6. Teman-teman yang senantiasa menghibur serta memberikan berbagai kenangan bagi penulis.
7. **Semua teman-teman angkatan 2011 (M54)** yang selalu membantu dan memberikan semangat kepada penulis. Terima kasih atas segala kritik dan saran serta motivasi yang telah kalian berikan.

8. **Teman-teman di lab MBP, Otomasi Industri, Desain Otomotif dan Simanu** yang telah menemani mengerjakan tugas akhir dalam 1 semester terakhir.
9. **Segenap Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Mesin FTI ITS**, Terima kasih atas ilmu yang disampaikan, semoga bermanfaat kedepannya bagi diri penulis dan bagi bangsa dan negara.
10. Serta semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Dengan segala keterbatasan kemampuan dan pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tugas Akhir ini jauh dari sempurna. Semoga hasil penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juli 2018

Penulis

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pengaturan tipe Magnetic Shutter Gear	6
Gambar 2.2 Pengaturan Magnet yang cocok untuk Turbin Angin.....	7
Gambar 2.3 Surface Mounted Magnetic Gear	8
Gambar 2.4 Hasil Messing Magnetic Gear.....	9
Gambar 2.5 Distribusi Magnetic field dan garis flux	9
Gambar 2.6 Besar Torsi masing – masing jenis magnet.....	10
Gambar 2.7 Jenis – jenis Gear Konvensional	11
Gambar 2.8 Gaya – gaya Magnet	13
Gambar 2.9 <i>Hysteresis Loop</i>	14
Gambar 2.10 Kurva Demagnetisasi	16
Gambar 2.11 Perbedaan Magnetic dan Mekanikal spur Gear	17
Gambar 2.12 Magnetic Gear dan diagram Torsi	18
Gambar 2.13 a.) Radial Magnetic Spur Gear b.) Axial Magnetic Spur Gear.....	19
Gambar 2.14 a.) Model Overlapping Magnetic Gear b.) Model Offset Magnetic Gear	20
Gambar 2.15 Ilustrasi Perhitungan Torsi	21
Gambar 2.16 a.) Desain hasil semi optimasi b.) Desain hasil pendekatan dengan computer	24
Gambar 2.17 Contoh Meshing Magnetic Spur Gear	24
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian tugas akhir	29
Gambar 4.1 Hasil simulasi Flux density FEMM variasi 4 : 8....	39
Gambar 4.2 Hasil simulasi Flux density FEMM variasi 6 : 12..	40

Gambar 4.3 Hasil simulasi Flux density FEMM variasi 8 : 16..41

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Material Magnet Permanen.....	15
Tabel 2.2 Temperatur Curie Magnet Permanen.....	15
Tabel 4.1 Tabel Parameter.....	33
Tabel 4.2 Hasil running MATLAB menggunakan fmincon()	38

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK.....	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Masalah	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Gear (Roda Gigi)	11
2.3 Magnet.....	12
2.3.1 Sifat-sifat Magnet	13
2.3.2 Demagnetisasi	15
2.4 Magnetic Gear	17
2.5 Dasar Perhitungan Magnetic Gear.....	20
2.5.1 Persamaan Torsi	20
2.6 Optimasi Magnetic Spur Gear	23
BAB III METODE PENELITIAN	27
3.1 Metodologi Penelitian	27
3.2 Flowchart Tugas Akhir.....	28

3.3	Prosedur Analisa.....	30
3.4	Persamaan Matematis.....	30
3.5	Parameter yang Digunakan	33
BAB IV	ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	35
4.1	Hasil Simulasi MATLAB	35
4.2	Hasil Simulasi FEMM.....	39
4.3	Perbandingan Simulasi MATLAB dan FEMM.....	43
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	45
5.1	Kesimpulan.....	45
5.2	Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA		xi

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan perkembangan zaman, kebutuhan manusia akan kemajuan teknologi semakin meningkat, terutama dalam bidang industri maupun otomotif yang mayoritas menggunakan mesin. Kemampuan kerja mesin sangat dipengaruhi oleh komponen yang menyusun mesin tersebut, salah satunya transmisi daya misalnya roda gigi yang menjadi komponen utama transmisi daya. Roda gigi yang digunakan tidak lepas dari yang namanya gesekan karena kontak kedua roda gigi tersebut, hal ini menurunkan efisiensi dari kinerja mesin. Oleh karena itu, *magnetic gear* sudah mulai banyak dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi dari kinerja mesin karena tidak ada kontak antara kedua roda gigi tersebut.

Magnetic gear yang dikembangkan pada saat ini banyak menggunakan bahan *Neodymium*, karena *neodymium* dapat menghasilkan kekuatan magnet yang tinggi. Biaya pembuatan *Magnetic gear* berbahan *neodymium* jauh lebih mahal jika dibandingkan dengan biaya pembuatan gear biasa karena bahan baku *neodymium* jauh lebih mahal. Dalam proses pembuatan *magnetic gear* harus optimal supaya menekan biaya pembuatan, maka dari itu peneliti bermaksud untuk mengoptimasi *magnetic spur gear radial* supaya menghasilkan *torque density* yang optimal. Salah satu penelitian yang pernah dilakukan, yaitu oleh Frank Torleif Jorgensen dengan rasio 1:4 dan variasi jumlah pole untuk mendapatkan *torque density* optimal.

Tabel penelitian Frank Torleif Jorgensen

Source poles	Drive poles	Turn angle	Radius constrain	Opt. Torque density
N_p	N_{pole}	ϕ	R_{1s}	ρ_A
[-]	[-]	[Deg]	[m]	[kNm/m ³]
12	48	3.75	$16 \cdot 10^{-3}$	23.0944
10	40	4.5	$16 \cdot 10^{-3}$	25.5878
8	32	5.625	$16 \cdot 10^{-3}$	28.3967
6	24	7.5	$16 \cdot 10^{-3}$	31.3594
4	16	11.25	$16 \cdot 10^{-3}$	34.6383

Dari tabel diatas menunjukkan, bahwa seiring dengan penurunan jumlah pole dengan jari-jari yang tetap, maka *torque density* optimal semakin besar.

Penelitian tersebut hanya berupa variasi pole dengan jari-jari yang tetap, padahal jari-jari juga sangat berpengaruh terhadap *torque density*. Maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut yaitu berupa optimasi jari-jari dari *magnetic spur gear radial* supaya menghasilkan *torque density* yang lebih optimal. Dalam tugas akhir ini dilakukan penelitian “Analisis Studi optimasi jari-jari *magnetic spur gear* dengan rasio putar 1:2”.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mencari *torque density* maksimal *magnetic spur gear* dengan variasi pole 4:8, 6:12, dan 8:16.
2. Bagaimana mengoptimalisasi jari-jari *magnetic spur gear* menggunakan matlab dengan metode *lagrange multiplier*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan Penulisan Tugas Akhir ini Adalah:

1. mencari *torque density* maksimal *magnetic spur gear* dengan variasi pole 4:8, variasi pole 6:12, dan variasi pole 8:16.
2. mengoptimalkan jari-jari *magnetic spur gear* menggunakan matlab dengan metode *lagrange multiplier*.

1.4 Batasan Masalah

Analisa pada tugas akhir ini menggunakan 2 buah roda gigi magnet permanen yang disusun seperti spur gear biasa, dimana terdapat pinion dan driven gear. Adapun batasan-batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Kekuatan magnet setiap buah dianggap sama.
2. Profil *magnetic spur gear* jenis radial.
3. Profil dianggap melingkar sempurna melingkari roda gigi.
4. Jenis magnet yang digunakan adalah *Neodymium* 38AH.
5. rasio putar *magnetic spur gear* 1:2
6. lebar magnet 2 cm.
7. luas konstrain 300 cm².
8. Volume bahan magnet 600 cm³.

1.5 Manfaat Penelitian

Pada tugas akhir ini memiliki beberapa manfaat, yaitu:

1. Mengetahui cara mengoptimasi *torque density* dari *magnetic spur gear*, terutama sebagai pengganti transmisi daya.
2. Sebagai penyempurnaan penelitian sebelumnya.
3. Sebagai acuan dalam penelitian selanjutnya.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

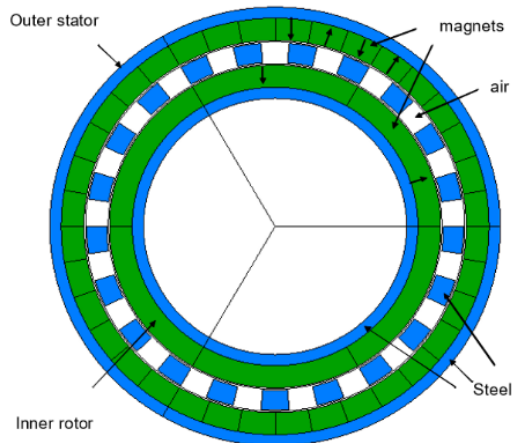
TINJAUAN PUSTAKA

Di bidang desain mesin listrik, meningkatkan torsi dan efisiensi adalah salah satu tujuan penting. Ketika mesin gagal memenuhi persyaratan torsi density atau tidak mampu menyesuaikan torsi beban, roda gigi biasanya baru digunakan. Gear banyak digunakan di industri, karena dapat mengubah kecepatan dan torsi sesuai dengan persyaratan aplikasi. Namun, roda gigi mekanis memiliki beberapa kerugian seperti kebisingan, biaya perawatan yang tinggi, pemeliharaan yang sering dibutuhkan dan juga keandalan yang rendah. Akibatnya, Magnetic Gears (MG) telah diusulkan sebagai sarana untuk meningkatkan torsi density dalam sistem elektromekanik, sambil menghindari masalah yang terkait dengan roda gigi mekanis tradisional. Gigi magnet memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan roda gigi mekanis. Dalam tugas akhir ini, gigi magnet yang baru dikonfigurasi akan diusulkan yang memiliki kemampuan torsi yang lebih tinggi dan efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan gigi magnet lainnya. Pada bab pertama, pengenalan singkat diberikan dan sejarah gigi magnet akan dijelaskan, serta tujuan menggunakan gigi magnet akan dibahas. Kemudian latar belakang pengetahuan tentang roda gigi yang dapat membantu kita untuk memiliki pemahaman yang lebih baik tentang prinsip-prinsip gigi magnet akan disajikan. Pada bab kedua, perhitungan matematis dan formulasi pembangkitan fluks di gigi magnet akan dijelaskan.

2.1 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian yang dilakukan oleh Kent Davy dkk, digunakannya magnetic shutter gear sebagai bahan uji coba. Davy

menggunakan perbandingan jumlah magnet stator dan rotor sebesar 9 : 1 yang dipisahkan oleh potongan baja yang dapat dilihat pada gambar 2.1.

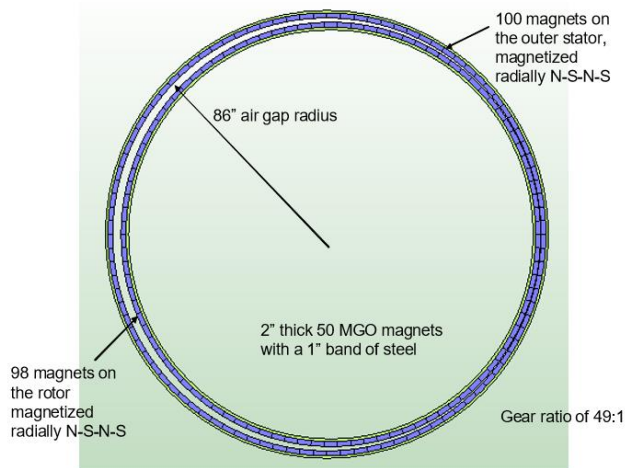


Gambar 2.1 Pengaturan tipe Magnetic Shutter Gear

Sedikit rotasi stator luar ($1/9$ dari sudut yang dilipat oleh potongan baja pusat) menyebabkan medan terlihat oleh rotor untuk menggeser satu rentang potongan baja ke arah yang berlawanan. Rotor berputar pada kecepatan putar stator sembilan kali agar tetap sinkron. Untuk mendapatkan rasio gigi yang tinggi dengan shutter gear, sejumlah besi belakang yang cukup besar diperlukan untuk membawa semua fluks rotor melalui rentang azimuth yang besar. Shutter gear membutuhkan gigi berlapis untuk menahan kerugian. Ketebalan gigi baja stasioner harus dipilih dengan cermat untuk menyeimbangkan kopling torsi dengan isolasi kutub interstisial.

Pada akhirnya Davy memilih jumlah magnet stator sebanyak 100 dan jumlah magnet untuk rotor sebanyak 98. Beliau menambah jumlah magnet bertujuan untuk memperbaiki maksimum torsi yang dihasilkan serta agar

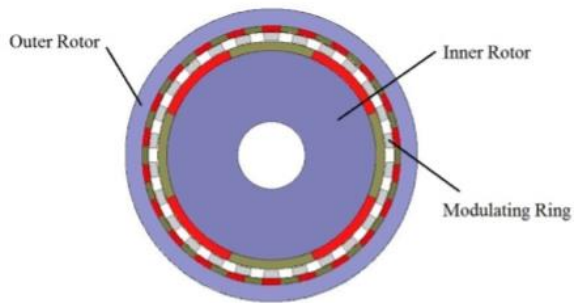
kompatibel dengan generator untuk turbin angin besar. . Ini akan menghasilkan perubahan kecepatan 49: 1. Generator konvensional dapat dihubungkan ke poros berkecepatan tinggi yang berukuran 1/4 seukuran generator penggerak langsung. Torsi yang bisa dicapai dengan gigi panjang 1 m ini adalah 6.2 MN-m! Desain yang tepat untuk 54 ft-lbs / lb dengan rasio gigi 49: 1 (Gambar 2.2).



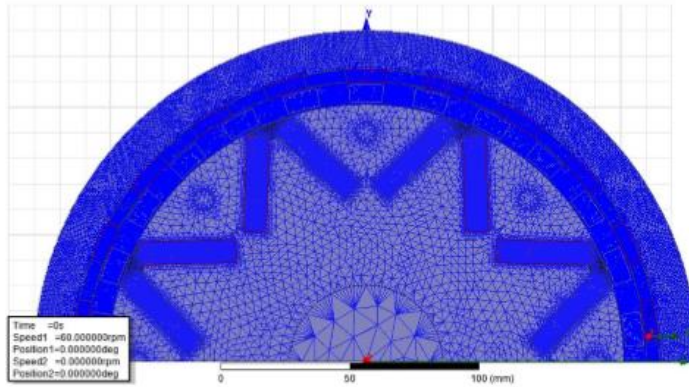
Gambar 2.2 Pengaturan Magnet yang cocok untuk Turbin Angin

Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk melengkapi penelitian yang pernah dilakukan. Ditinjau dari segi mekanisme untuk lebih mengetahui bagaimana persamaan matematis diperoleh. Pada penelitian kali ini juga dilakukan dengan dua pendekatan yakni teoritis dan simulasi model 3D. Dari dua pendekatan itu pada akhirnya akan dilakukan perbandingan hasil berupa grafik torsi yang nantinya akan dievaluasi hal-hal yang mempengaruhi hasil tersebut.

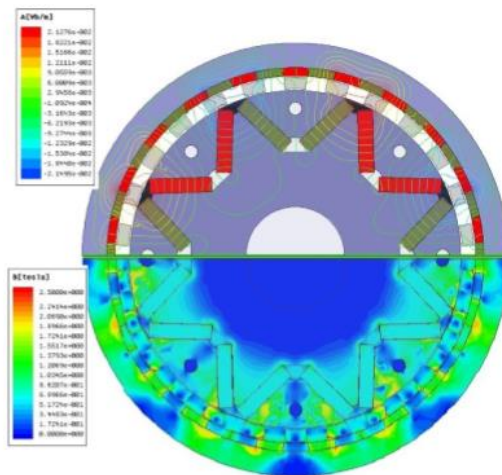
Sandra Mausavi, beliau telah melakukan percobaan Magnetic Gear dengan menggunakan 3 jenis magnet yaitu Neodymium, SmCo dan AlNiCo. Beliau menerapkan Magnetic Gear pada sebuah Generator (Gambar 2.). Dimana kapasitansi dan induktansi masing-masing merupakan kontribusi rotor dengan kecepatan tinggi dan rendah. Meskipun rotor berkecepatan tinggi dan rendah berputar pada kecepatan yang berbeda, kecepatan rotasi dari rotor berkecepatan tinggi masih digunakan untuk menghitung voltase kecepatan, karena modulator fluks memodulasi komponen fluks dari rotor berkecepatan rendah pada kecepatan yang sama dengan komponen fluks rotor berkecepatan tinggi.



Gambar 2.3 Surface Mounted Magnetic Gear



Gambar 2.4 Hasil Messing Magnetic Gear



Gambar 2.5 Distribusi Magnetic field dan garis flux

Sebagai kesimpulan, pada Gambar 2.6 perbandingan roda gigi magnetik dengan berbagai jenis magnet

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

Gambar 2.6 Besar Torsi masing – masing jenis magnet

Dari penelitian kedua penelitian yang dilakukan oleh Kent Davy dan Sandra Mausavi hanya menambah jumlah magnet saja untuk menaikkan harga *torque density* tanpa harus melakukan sebuah percobaan lebih lanjut. Padahal *torque density* tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah magnet saja, tetapi jari-jari penggerak dan driven juga sangat mempengaruhi *torque density*. Maka dari itu, penelitian yang dilakukan oleh penulis adalah menyempurnakan penelitian terdahulu yaitu dengan mengoptimalkan *torque density* melalui merubah jari-jari dengan metode Lagrange Multiplier.

Tabel penelitian Frank Torleif Jorgensen

Source poles	Drive poles	Turn angle	Radius constrain	Opt. Torque density
N_p	N_{pole}	φ	R_{1s}	ρ_A
[-]	[-]	[Deg]	[m]	[kNm/m ³]
12	48	3.75	$16 \cdot 10^{-3}$	23.0944
10	40	4.5	$16 \cdot 10^{-3}$	25.5878
8	32	5.625	$16 \cdot 10^{-3}$	28.3967
6	24	7.5	$16 \cdot 10^{-3}$	31.3594
4	16	11.25	$16 \cdot 10^{-3}$	34.6383

Dari penelitian magnetic spur gear yang dilakukan Frank Torleif Jorgensen dengan rasio 1:4 memvariasikan jumlah pole menunjukkan bahwa semakin sedikit jumlah pole yang digunakan maka *torque density* akan semakin besar.

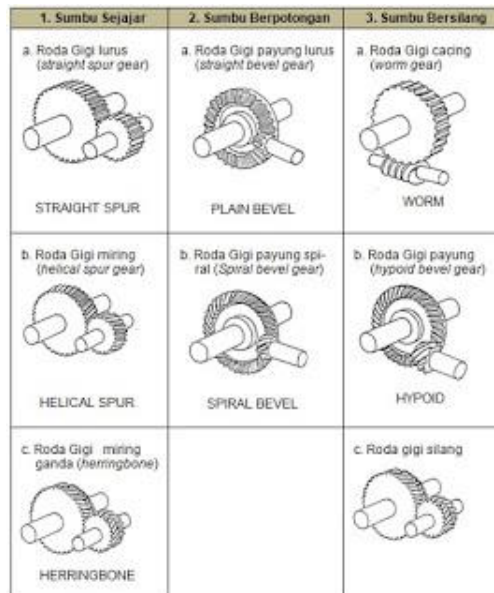
2.2 Gear (Roda Gigi)

Roda gigi adalah salah satu jenis elemen transmisi yang penting untuk suatu pemindahan gerak (terutama putaran). Daya atau tenaga pada suatu sistem transmisi antara penggerak dengan yang digerakan. Suatu konstruksi hubungan roda gigi digunakan pula untuk sistem pengatur pada pemindah putaran, atau untuk merubah

Gerak lurus menjadi gerak putar atau sebaliknya.

2.2.1 Prinsip Roda Gigi

Konstruksi roda gigi mempunyai prinsip kerja berdasarkan pasangan gerak. Bentuk gigi dibuat untuk menghilangkan keadaan slip, putar dan daya dapat berlangsung dengan baik.



Gambar 2.7 Jenis – jenis Gear Konvensional

Selain itu dapat dicapai kecepatan keliling- (V_c) yang sama pada lingkaran singgung sepasang roda gigi. Lingkaran singgung ini disebut lingkaran pitch atau lingkaran tusuk yang merupakan lingkaran khayal pada pasangan roda gigi, tapi berperan penting dalam perencanaan konstruksi roda gigi. Pada sepasang roda gigi maka perlu diperhatikan, bahwa jarak lengkung antara dua gigi yang berdekatan (disebut "pitch") pada kedua roda gigi harus sama, sehingga kaitan antara gigi dapat berlangsung dengan baik. Bentuk lengkung pada suatu profil gigi, tidak dapat dibuat semauanya, melainkan mengikuti kurva-kurva tertentu yang dapat menjamin terjadinya kontak gigi dengan baik.

2.3 Magnet

Pada Tugas akhir ini Magnet yang digunakan adalah magnet Neodymium. Untuk menjelaskan tentang magnet, Weber telah mengemukakan teorinya yang disebut dengan hipotesis Weber yang isinya sebagai berikut :

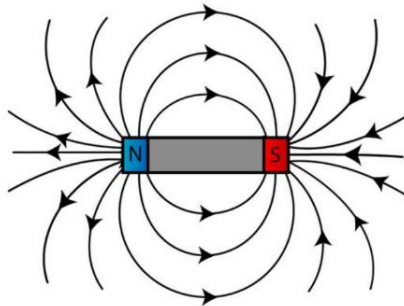
- Bahan magnetik terdiri atas atom-atom magnetik yang disebut magnet elementer. Setiap magnet memiliki kutub utara dan kutub selatan. Ketika magnet dipotong, maka potongan-potongan tersebut akan menjadi magnet baru yang juga mempunyai kutub utara dan kutub selatan. Jika pemotongan terus dilakukan hingga sekecil-kecilnya, maka akan terbentuk atom magnet. Atom magnet tersebut pun akan memiliki kutub utara dan kutub selatan.
- Pada bahan yang belum menjadi magnet, maka magnet elementernya belum tersusun dengan teratur. Sehingga kutub utara sebuah magnet elementer terhubung dengan kutub selatan pada magnet elementer yang lain. Dengan demikian, magnet-magnet elementer pada bahan tersebut terangkai seperti lingkaran.
- Pada bahan yang sudah menjadi magnet, magnet elementer sudah tersusun dalam barisan yang teratur dengan pola

lurus. Kutub utara bertemu dengan kutub selatan dengan berurutan.

- Magnet elementer besi mudah diarahkan sehingga besi lebih mudah dijadikan magnet. Akan tetapi sifat kemagnetan besi mudah hilang. Sedangkan magnet elementer baja sangat sukar diarahkan, akan tetapi ketika sudah bisa diarahkan, sifat kemagnetannya akan bertahan lama.

2.3.1 Sifat-Sifat Magnet :

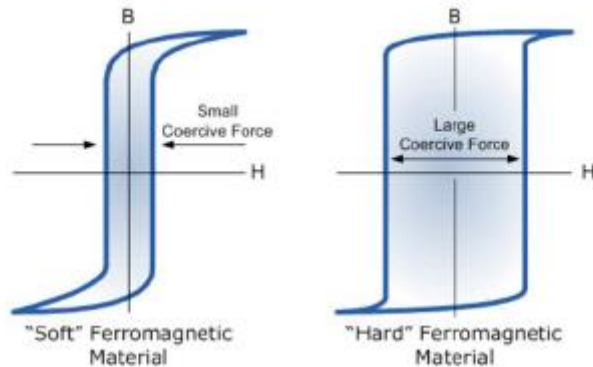
- Memiliki dua kutub, yaitu kutub utara dan kutub selatan. Kutub utara adalah kutub magnet yang selalu mengarah ke kutub utara bumi. Kutub selatan adalah kutub magnet yang mengarah ke selatan bumi.
- Kutub yang sama akan tolak-menolak. Kutub yang tidak sama akan tarik-menarik (Gambar 2.3).



Gambar 2.8 Gaya – gaya Magnet

Untuk menghasilkan medan magnet yang kuat dengan ukuran yang kecil, maka material yang tepat untuk magnet permanen adalah material ferromagnetik. Material ferromagnetik

tersedia dengan berbagai karakteristik. Pada umumnya, material ferromagnetik dibagi menjadi dua kategori utama berdasarkan karakteristik histerisisnya yaitu, *soft magnetic materials* dan *hard magnetic materials*. Perbedaan antara keduanya ada di nilai *coercitivity*, hal ini dapat dijelaskan oleh gambar 2.8.



Gambar 2.9 *Hysteresis Loop*

Dari gambar 2.8, *hard magnetic materials* memiliki nilai *coercivity* yang lebih besar. Disebut *hard magnetic material* karena sifat kemagnetannya susah untuk dibuat maupun dihilangkan. Terdapat dua kelompok *hard magnetic materials* yaitu, magnet konvensional dan *rare earth*. Magnet konvensional seperti Alnico dan Ferrite memiliki produk energi maksimum sebesar 2-80 kJ/m³. Sedangkan produk energi untuk magnet *rare earth* lebih besar dari 80 kJ/m³. Alasan utama keunggulan *rare earth* adalah nilai *magnetocrystalline anisotropy* yang tinggi seperti NdFeB dan SmCo.

Tabel 2.1 Karakteristik Material Magnet Permanen

No.	Magnet Permanen	<i>Remanence</i> (T)	<i>Coercivity</i> (kA/m)	<i>Maximum Energy Product</i> (kJ/m ³)
1	Ferrite	0,23-0,39	150-250	8-28
2	Alnico	0,7-1,2	40-120	20-71
3	NdFeB	1,1-1,4	800-1100	235-430
4	SmCo	0,85-1,1	630-800	140-250

2.3.2 Demagnetisasi

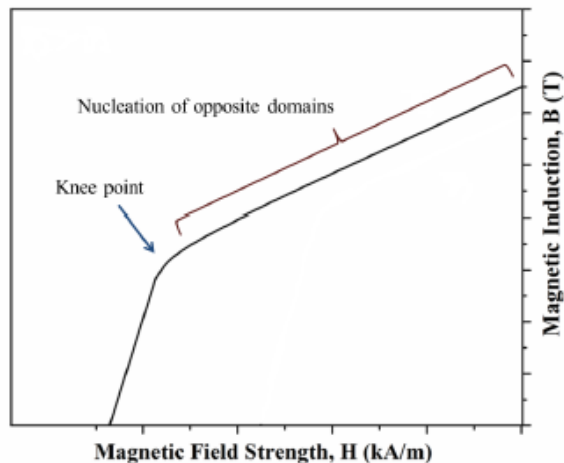
Demagnetisasi adalah fenomena dimana sebuah magnet kehilangan sifat kemagnetannya. Terdapat beberapa hal yang dapat menyebabkan demagnetisasi, yaitu temperatur pengoperasian dan elektromagnet secara AC. Temperatur memiliki efek yang signifikan terhadap sifat kemagnetan. Hal ini disebabkan karena meningkatnya temperatur mengakibatkan bergetarnya atom-atom sehingga *magnetic moment* memiliki orientasi yang acak. Magnetisasi sebuah material maksimal berada pada suhu -273°C (0 K) karena pergerakan atom menjadi minimal. Bagaimanapun, magnetisasi akan menurun seiring dengan pertambahan temperatur. Pada suatu temperatur, nilai magnetisasi akan menjadi nol. Temperatur ini disebut temperatur Curie. Ketika material ferromagnetik dipanaskan lebih dari temperature Curie, material akan berubah sifat menjadi paramagnetik. Besar temperatur Curie tiap material berbeda seperti yang tertera di tabel 2.2.

Tabel 2.2 Temperatur Curie Magnet Permanen

No.	Material	Temperatur Curie (°C)
1	Alnico	850
2	SmCo	720
3	NdFeB	310

4	Ferrite	450
---	---------	-----

Sebuah magnet permanen utamanya beroperasi pada kuadran kedua dari *hysteresis loop*. Data dalam kuadran ini biasa disebut kurva demagnetisasi yang dapat menjelaskan sifat magnet dalam medan demagnetisasi yang berbeda. Fenomena ini cukup rumit tapi proses yang paling utama adalah terbentuknya domain yang terbalik. Kurva demagnetisasi terdiri dari dua garis yang mendekati linear yang terpisahkan oleh daerah dengan lekukan kecil yang disebut dengan *knee point* seperti pada gambar 2.10.

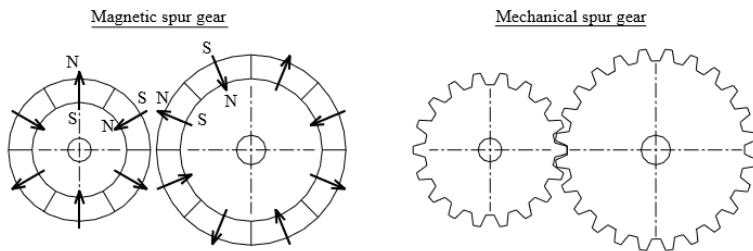


Gambar 2.10 Kurva Demagnetisasi

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

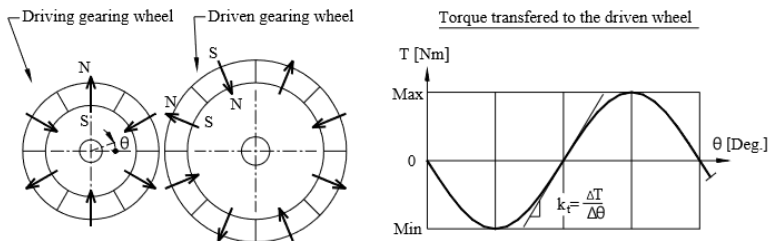
2.4 Magnetic Gear

Gear dapat didefinisikan sebagai mekanisme yang mentransfer torsi dari satu poros ke poros lain dengan menggunakan magnet atau gigi mekanis. Beberapa roda gigi mekanik sangat mirip dengan roda gigi magnetik misalnya gigi spur magnetik. Kesamaan kedua jenis roda gigi ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 2.11 Perbedaan Magnetic dan Mekanikal spur Gear

Gear mekanik tradisional menggunakan gigi baja untuk mentransfer torsi. Gear wheel teeth memiliki kontak fisik satu sama lain. Perlengkapan magnet tidak memiliki keausan, karena tidak ada kontak langsung. Magnet permanen pada roda gigi mendorong torsi antara kedua roda. Karena gigi magnetik tidak memiliki kontak langsung, akan ada efek pegas torsi fiktif antara roda gigi. Efek pegas torsi dapat dijelaskan dengan menggunakan satu roda tetap dan roda lainnya diputar dengan sudut kecil. Lalu akan ada interaksi torsi tertentu antara roda gigi tergantung sudut perpindahan roda kedua. Fenomena ini diilustrasikan pada Gambar 1.2 dimana gigi magnetik yang terdiri dari roda gigi penggerak dan roda gigi penggerak yang diperlihatkan. Fenomena pegas torsi mirip dengan efek karakteristik torsi sudut yang diketahui pada mesin yang sinkron.

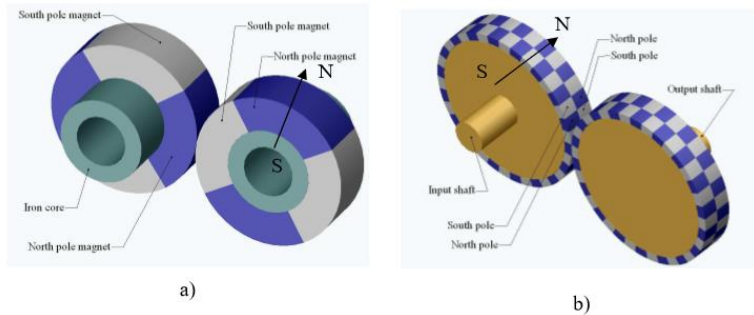


Gambar 2.12 Magnetic Gear dan diagram Torsi

Sebuah gigi magnetik akan memiliki torsi dimana gigi akan mencapai torsi maksimal. Jika torsi yang diterapkan meningkat lebih jauh dari titik ini, akan ada masalah karena roda gigi akan tergelincir. Efek slip tidak dapat diizinkan untuk sebagian besar aplikasi yang dikenal yang digunakan untuk tujuan pengerjaan. Oleh karena itu, gigi magnetik harus beroperasi agak di bawah batasan torsi maksimal. Keterbatasan torsi bisa menjadi keuntungan dalam aplikasi seperti itu dimana sistem penggeraknya terlindungi oleh keterbatasan torsi. Torsi pegas untuk gigi magnetik tidak akan konstan terhadap hal tersebut karena laju perubahan torsi dibagi dengan perubahan sudut. Gigi mekanis akan sering mengalami reaksi balik daripada konstanta pegas.

Ada banyak roda gigi magnetik yang dapat dikategorikan ke dalam kategori roda gigi magnetik dengan jarak magnet dekat. Jenis gigi ini biasanya memiliki interaksi magnetik di antara magnet pada dua atau lebih sumbu. Teknologi ini yaitu dengan dua roda gigi magnetik yang dilapisi magnet di permukaan. Magnet ini berinteraksi satu sama lain dan mereka menciptakan gaya penggerak pada roda penggerak magnet. Salah satu contohnya adalah roda gigi magnetis radial yang sangat sederhana, terdokumentasi dalam beberapa buku tentang pengembangan sebuah persamaan untuk torsi dua roda gigi radial magnetised Gambar 1.11 a). Torsi dari persamaan dibandingkan dengan model FEM, yang didasarkan pada asumsi yang sama seperti pada

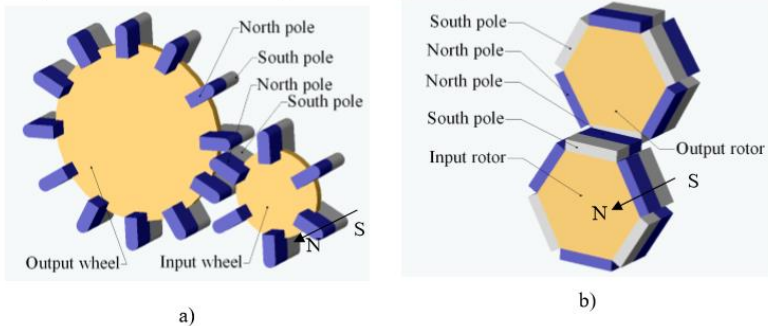
persamaan torsi. Persamaan torsi dan model analisis FEM menunjukkan hasil yang sangat bagus.



Gambar 2.13 a.) Radial Magnetic Spur Gear b.) Axial Magnetic Spur Gear

Optimalisasi dilakukan dengan menggunakan program perangkat lunak FEM. Dalam makalah ini tidak ada hasil eksperimen yang memverifikasi simulasi FEM, namun pada penelitian sebelumnya ada satu percobaan eksperimental dimana hasil simulasi FEM diverifikasi. Makalah ini menunjukkan ada kesepakatan yang baik dengan torsi yang dihitung FEM dan hasil eksperimennya. Dan juga menggambarkan jenis peralatan magnetik dengan magnet jarak dekat, di mana jarak antara roda magnetik versus torsi output dianalisis dengan uji eksperimental. Ekspresi analitik torsi output adalah salah satu hasil dan ungkapan ini dibandingkan dengan nilai torsi yang diukur sebagai fungsi jarak antara roda gigi magnetik. Konfigurasi ini berbeda, karena setiap gigi pada roda gigi magnetik memiliki kutub utara dan selatan dengan magnetisasi aksial, yang terlihat pada Gambar 1.11 b). Dengan prinsip ini fluks magnetik tidak akan mengikuti arah, yang berada pada poros yang sama seperti yang sebelumnya dibahas pada motor spiral magnetik, namun sebaliknya akan terjadi fluks magnetik ke arah sumbu yang sama dengan sumbu roda gigi.

Teknologi ini dapat meningkatkan fluks magnetik dan dengan ini meningkatkan torsi maksimum untuk peralatan magnetik.



Gambar 2.14 a.) Model Overlapping Magnetic Gear b.) Model Offset Magnetic Gear

2.5 Dasar Perhitungan Magnetic Gear

2.5.1 Persamaan Torsi

Menurut prinsip transformasi energi magnetik menjadi energi mekanik, persamaan berikut Persamaan torsi terdiri atas dua integral dimana V dan S secara berurutan adalah volume dan permukaan magnet.

$$T = \int_V \mathbf{r} \times (\mathbf{J}_m(r, \phi) \times \mathbf{B}_{ext}) r dr d\phi dz + \int_S \mathbf{r} \times (\mathbf{j}_m \times \mathbf{B}_{ext}) da \quad (2.7)$$

dimana

T : torsi (Nm)

$\mathbf{r}$: vector pada sumbu- r

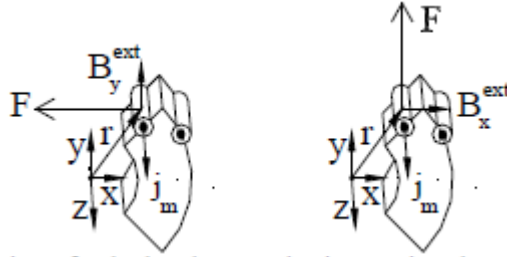
$\mathbf{J}_m$: volume current density (A/m²)

$\mathbf{j}_m$: surface current density (A/m)

$\mathbf{B}_{ext}$: external flux density field (Wb)

Karena $\mathbf{J}_m = \nabla \times \mathbf{M} = 0$, maka integral volume yang pertama menjadi nol dan yang tersisa hanya hasil integral permukaan.

Semua *current density* pada permukaan harus dilalui oleh B_{ext} dari *source magnet* untuk menciptakan torsi pada *drive magnet*. Perkalian *cross* tersebut dapat diilustrasikan dengan sketsa isometrik pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Ilustrasi Perhitungan Torsi

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

$$\begin{aligned}
 &T_r(\phi) \\
 &= \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right) L(R_2 - R_1)}{N_r} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) r(q) \\
 &\times \left[\cos\left(\phi_{edge}(\phi, p) B_x^{ext}(r(q), \phi_{edge}(\phi, p))\right) \right. \\
 &\left. + \sin\left(\phi_{edge}(\phi, p) B_x^{ext}(r(q), \phi_{edge}(\phi, p))\right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

dimana

- $T_r(\phi)$: torsi radial (Nm)
- M_s : magnetisasi *source magnet* (A/m)
- N_p : jumlah magnet pada *source magnet gear*
- N_{pole} : jumlah magnet pada *drive magnet gear*
- L : panjang/tinggi magnet (m)
- R_1 : radius dalam *drive magnet* (m)

- R_2 : radius luar *drive magnet* (m)
 p : jumlah kutub magnet
 q : parameter dari integrasi
 $S_r(q)$: parameter dari integrasi
 ϕ_{edge} : sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)
 ϕ : 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. Berikut adalah persamaan torsi tangensial.

$$\begin{aligned}
 &T_{t1}(\phi) \\
 &= - \frac{M_S L R_1^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}} \right)^{N_{pole}-1}}{N_t} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[\cos\left(\theta(q) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) B_x^{ext} \left(R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) \right. \\
 &\quad \left. + \sin\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) B_y^{ext} \left(R_1, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) \right] \\
 &(2.9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &T_{t2}(\phi) \\
 &= \frac{M_S L R_2^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}} \right)^{N_{pole}-1}}{N_t} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[\cos\left(\theta(q) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) B_x^{ext} \left(R_2, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) \right. \\
 &\quad \left. + \sin\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) B_y^{ext} \left(R_2, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) \right] \\
 &(2.10)
 \end{aligned}$$

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

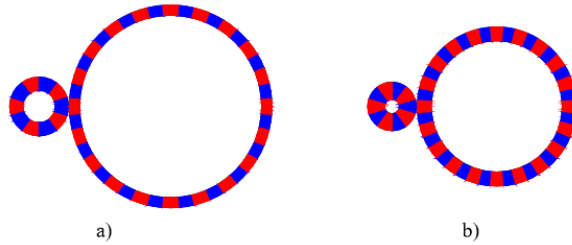
Persamaan total torsi dari *drive magnet* didapatkan dari penjumlahan dari integral permukaan. Berikut adalah persamaannya.

$$T(\emptyset) = T_r(\emptyset) + T_{t1}(\emptyset) + T_{t2}(\emptyset) \quad (2.11)$$

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

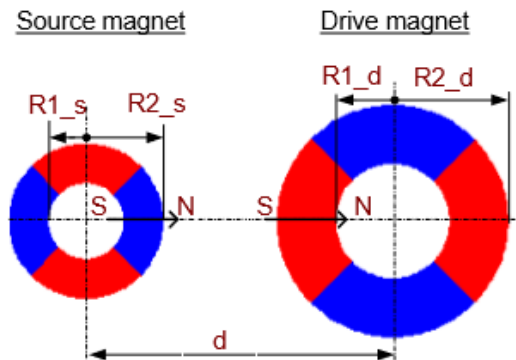
2.6 Optimasi Magnetic Spur Gear

Optimalisasi semi awalnya dioptimalkan dengan algoritma magnetisasi radial. Hasil dari optimasi ini akan menghasilkan yang sedikit lebih tinggi. Dimensi untuk kedua jenis ditunjukkan pada Gambar 2.9 dengan dua ilustrasi untuk memvisualisasikan perubahan ukuran menggunakan pendekatan semi optimasi a) dan pendekatan terkomputerisasi b).



Gambar 2.16 a.) Desain hasil semi optimasi b.) Desain hasil pendekatan dengan computer

Pada semi optimasi, cara melakukannya adalah dengan trial dan error. Sedangkan yang satunya melalui pendekatan computer. Dengan ketentuan sebagai berikut :



Gambar 2.17 Contoh Meshing Magnetic Spur Gear

Metode Lagrange Multipliers digunakan untuk mencari solusi untuk masalah optimasi yang dibatasi pada satu atau lebih kesamaan.

Pada umumnya kondisi bisa di tulis dalam bentuk formula sebagai berikut :

Fungsi $f(x)$

Subjek pada $h(x) = 0, V_i = 1, 2, \dots, m$

$g(x) \leq 0, V_i = 1, 2, \dots, n$

Solusinya adalah mencari nilai minimum dari $f(x)$ dari persamaan $h(x) = 0$ dan ketidaksamaan pada $g(x) \leq 0$. Kondisi ketidaksetaraan ditambahkan ke metode Lagrange Multipliers kesetaraan.

Dalam penelitian ini, penulis akan menggunakan MATLAB sebagai tool untuk proses optimasi supaya ringkas dan lebih cepat serta akurat hasilnya. Sehingga penyelesaian Metode Lagrange Multiplier yang lebih tepatnya menggunakan tool `fmincon()` atau menu optimization tool pada MATLAB.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

METODE PENELITIAN

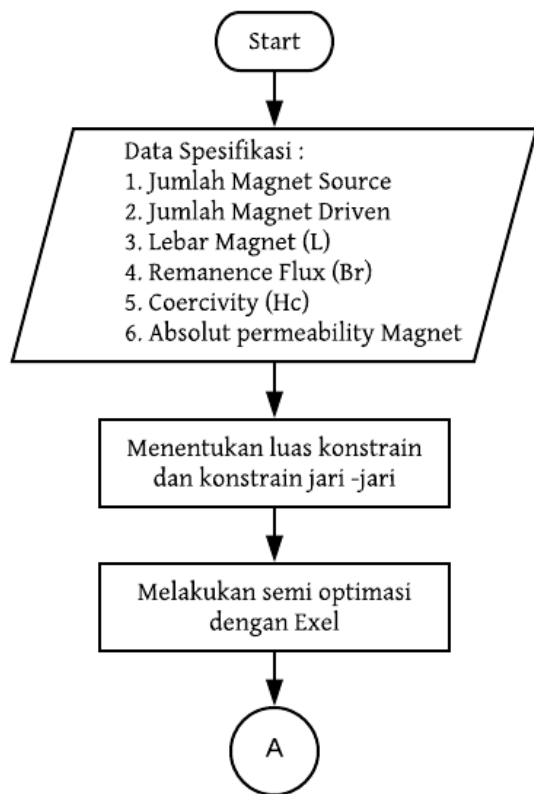
3.1 Metode Penelitian

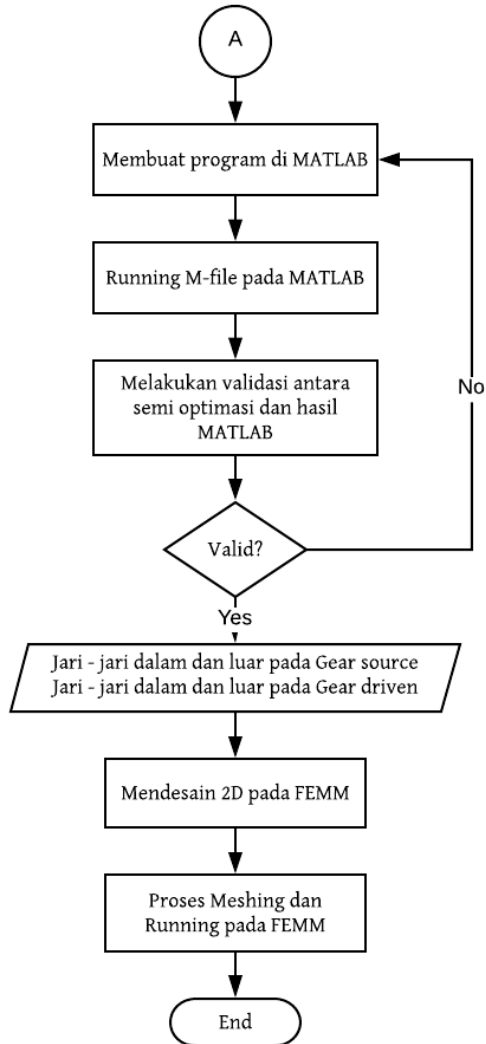
Pada penelitian kali ini, prosedur penelitian dilakukan dengan beberapa tahapan yang akan dilakukan sebagai berikut:

- Tahap pertama adalah studi literatur tentang pengembangan dan penelitian mengenai *Magnetic Spur Gear* yang sudah ada beserta optimasi *torque density*.
- Tahap kedua adalah menentukan konfigurasi dan spesifikasi awal dari system *Magnetic Spur Gear* yang akan dirancang.
- Tahap ketiga adalah menentukan konstrain jari-jari yang dioptimasi.
- Tahap keempat menetapkan lebar magnet yaitu 2cm, dan luas konstrain 300cm².
- Tahap kelima adalah mengoptimasi jari-jari rancangan sesuai konstrain melalui *software* MATLAB.
- Tahap keenam adalah melakukan perhitungan analisa dengan Excel untuk penguat hasil pada *software* MATLAB.
- Tahap ketujuh adalah melakukan simulasi menggunakan *software* FEMM dengan jari-jari hasil optimasi dari *software* MATLAB untuk mengetahui *flux* yang terjadi, dan dilakukan 3 variasi *air gap* untuk melihat perbedaan *torque density*.
- Tahap kedelapan adalah menganalisa hasil simulasi *software* FEMM.

3.2 Flowchart Tugas Akhir

Flowchart tugas akhir adalah sebagai berikut :





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian tugas akhir

3.3 Prosedur Analisa

Proses yang akan dilakukan untuk merancang sistem *Magnetic Spur Gear* adalah sebagai berikut:

1. Langkah awal yang perlu dilakukan dalam perancangan dan analisa sistem *Magnetic Spur Gear* ini adalah menentukan data dimensi jari-jari dan faktor penunjang yang sesuai konstrain.
2. Melakukan analisa optimalisasi dimensi yang menghasilkan torsi density maksimal dengan *software MATLAB*.
3. Menggambar 2D bagian-bagian sistem *Magnetic Spur Gear* di *software FEMM*.
4. Selanjutnya gambar 2D bagian-bagian sistem *Magnetic Spur Gear* dimasukkan *properties material*.
5. Melakukan simulasi gambar 2D di FEMM, tapi sebelumnya dilakukan proses meshing terlebih dahulu.
6. Melakukan simulasi permodelan dengan variasi jumlah magnet.
7. Setelah itu mengulang langkah 1 hingga 5.
8. Hasil dari tiap variasi akan dibandingkan berdasarkan torsi density yang dihasilkan.

3.4 Persamaan Matematis

Metode *Lagrange Multipliers* digunakan untuk mencari solusi untuk masalah optimasi yang dibatasi pada satu atau lebih kesamaan.

Pada umumnya kondisi bisa di tulis dalam bentuk formula sebagai berikut :

Fungsi $f(x)$

Subjek pada $h(x) = 0, V_i = 1, 2, \dots, m$

$$g(x) \leq 0, \quad V_i = 1, 2, \dots, n$$

sesuai dengan persamaan fungsi diatas, maka persamaan pada penelitian ini menjadi:

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$f(R_{1s}, R_{2s}, R_{1d}, R_{2d}) = \frac{-T_{stall}(R_{1s}, R_{2s}, R_{1d}, R_{2d})}{L\pi(R_{2s}^2 + R_{2d}^2)}$$

$$h_j(x) = (x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$h_1(R_{2s}, R_{1s}, R_{2d}, R_{1d}) = 300 - \pi(R_{2s}^2 - R_{1s}^2 + R_{2d}^2 - R_{1d}^2) = 0$$

Pemberian syarat seperti berikut :

$$g_i(R) = g_i(R_{1s}, R_{2s}, R_{1d}, R_{2d}) \leq 0$$

$$g_1(R_{2s}, R_{1s}) = R_{1s} - R_{2s} + 30 \cdot 10^{-3} \leq 0 \text{ (tebal minimal magnet source 3 cm)}$$

$$g_2(R_{2d}, R_{1d}) = R_{1d} - R_{2d} + 30 \cdot 10^{-3} \leq 0 \text{ (tebal minimal magnet driven 3 cm)}$$

$$g_3(R_{1d}, R_{2s}) = R_{1d} - R_{2s} \leq 0 \text{ (dimana } R_{2s} \leq R_{1d})$$

$$g_4(R_{1s}) = 20 \cdot 10^{-3} - R_{1s} \leq 0 \text{ (minimal poros adalah 2 cm)}$$

Jadi, untuk perhitungan terakhir dari torsi dikonvert kedalam *torque density* yaitu

$$T_{dens} = \frac{T_{stall}}{V_A} = \frac{T_{stall}}{L\pi(R_{2s}^2 + R_{2d}^2)}$$

Sedangkan T_{stall} didapat dari :

$$T_{stall} = T_r(\emptyset) + T_{t1}(\emptyset) + T_{t2}(\emptyset)$$

dengan

$$\begin{aligned} & T_r(\emptyset) \\ &= \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right) L(R_{2d} - R_{1d})}{N_r} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) r(q) \\ & \times \left[\cos\left(\phi_{edge}(\emptyset, p) B_x^{ext}\left(r(q), \phi_{edge}(\emptyset, p)\right)\right) \right. \\ & \left. + \sin\left(\phi_{edge}(\emptyset, p) B_x^{ext}\left(r(q), \phi_{edge}(\emptyset, p)\right)\right) \right] \\ & T_{t1}(\emptyset) \\ &= -\frac{M_s L R_{1d}^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}}\right)}{N_t} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[\cos\left(\theta(q) \right. \right. \\ & \left. \left. + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_x^{ext}\left(R_{1d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) \right. \\ & \left. + \sin\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_y^{ext}\left(R_{1d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) \right] \\ & T_{t2}(\emptyset) \\ &= \frac{M_s L R_{2d}^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}}\right)}{N_t} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \left[\cos\left(\theta(q) \right. \right. \\ & \left. \left. + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_x^{ext}\left(R_{2d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) \right. \\ & \left. + \sin\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_y^{ext}\left(R_{2d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) \right] \end{aligned}$$

Setelah menggunakan metode *fmincon()* pada *software matlab*, dilakukan simulasi pada FEMM untuk melihat *torque density* maksimal yang terjadi pada jari-jari hasil optimasi MATLAB.

3.5 Parameter yang digunakan

Pada simulasi tugas akhir ini terdapat beberapa parameter kendaraan yang digunakan untuk simulasi. Parameter-parameter ini adalah data yang akan digunakan pada *software matlab*. Data yang didapatkan adalah data dari *software FEMM* sekaligus beberapa literature lain. Dalam Parameter kendaraan yang telah di desain dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 3.1 Tabel Parameter

symbol	Optimisation constans		
g	<i>Air gap</i>	1.10^{-3}	m
L	Lebar magnet	2.10^{-2}	m
Br	<i>Remanence flux</i>	1.220	T
Hc = Ms	<i>Coercivity</i>	968289	A/m
Nr = Nt	<i>Torque integration parameter</i>	4	
μ_0	<i>Permability for air regions</i>	$4.\pi.10^{-7}$	Tm/A
$\mu = \frac{Br}{Hc}$	<i>Absolut permability magnet</i>	$13,2. 10^{-7}$	Tm/A

μ_r $= \mu/\mu_0$	<i>Relative permability magnet</i>	1.05	
N_p	Jumlah pole source	4	
N_{pole}	Jumlah pole driven	8	
ϕ	Sudut maksimum torsi	4.25	degree

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada tugas akhir kali ini akan dilakukan optimasi jari-jari *magnetic spur gear radial* dengan MATLAB dan simulasi FEMM. Hasil dari optimasi berupa *torque density* terbesar yg dihasilkan oleh *magnetic spur gear radial* dengan volume bahan baku tertentu, dan dilakukan analisa grafik dari 3 variasi jumlah pole dengan rasio yang sama yaitu 1:2.

4.1 Hasil Simulasi MATLAB

Ada 3 bagian terpenting dalam pemrograman MATLAB untuk tugas akhir ini, yaitu :

Program untuk mendeklarasikan konstrain yang sudah dibuat, kemudian program untuk perumusan torsi density dan penyelesaian lagrange multiplier dengan menggunakan *fmincon()*.

4.1.1 Program Konstrain

```
function [c,ceq] = nlcon(x)
    c = [2-x(1);x(1)-x(2)+3;x(2)-x(3);x(3)-x(4)+3];
    ceq = 300 - 3.14*(x(2)^2 - x(1)^2 + x(4)^2 - x(3)^2);
end
```

Program diatas untuk mendeklarasikan konstrain jari-jari dan luas konstrain sesuai batas yang telah dibuat diawal.

4.1.2 Program perumusan *torque density*

```
function [Tdens] = torsi(x)
% Torsi Radial
```

Ms = 9682.89;

Nr = 4;

Npole = 8;

L = 2;

psy = 4.5*3.14/180;

Bxext = 1;

Byext = Bxext;

Sr0 = 1/3 * (x(3) + 0*(x(3)-
x(4))/Nr)*(sin(psy+3.14/Npole)*Bxext+cos(psy+3.14/Npole)*By
ext);

Sr1 = 4/3 * (x(3) + 1*(x(3)-
x(4))/Nr)*(sin(psy+3.14/Npole)*Bxext+cos(psy+3.14/Npole)*By
ext);

Sr2 = 2/3 * (x(3) + 2*(x(3)-
x(4))/Nr)*(sin(psy+3.14/Npole)*Bxext+cos(psy+3.14/Npole)*By
ext);

Sr3 = 4/3 * (x(3) + 3*(x(3)-
x(4))/Nr)*(sin(psy+3.14/Npole)*Bxext+cos(psy+3.14/Npole)*By
ext);

Sr4 = 1/3 * (x(3) + 4*(x(3)-
x(4))/Nr)*(sin(psy+3.14/Npole)*Bxext+cos(psy+3.14/Npole)*By
ext);

J = (Sr0+Sr1+Sr2+Sr3+Sr4);

Tradial = (2*Ms*cos(3.14/Npole)*(x(4)-x(3))*L/Nr)*J;

% Torsi Tangensial Dalam

St0 = 1/3 * sin(-3.14/Npole + 0*2*3.14/(Nr*Npole))*(cos(-
3.14/Npole + 0*2*3.14/(Nr*Npole)+psy)+sin(-3.14/Npole +
0*2*3.14/(Nr*Npole)+psy));

St1 = 4/3 * sin(-3.14/Npole + 1*2*3.14/(Nr*Npole))*(cos(-
3.14/Npole + 1*2*3.14/(Nr*Npole)+psy)+sin(-3.14/Npole +
1*2*3.14/(Nr*Npole)+psy));

```

St2 = 2/3 * sin(-3.14/Npole + 2*2*3.14/(Nr*Npole))*(cos(-
3.14/Npole + 2*2*3.14/(Nr*Npole)+psy)+sin(-3.14/Npole +
2*2*3.14/(Nr*Npole)+psy));
St3 = 4/3 * sin(-3.14/Npole + 3*2*3.14/(Nr*Npole))*(cos(-
3.14/Npole + 3*2*3.14/(Nr*Npole)+psy)+sin(-3.14/Npole +
3*2*3.14/(Nr*Npole)+psy));
St4 = 1/3 * sin(-3.14/Npole + 4*2*3.14/(Nr*Npole))*(cos(-
3.14/Npole + 4*2*3.14/(Nr*Npole)+psy)+sin(-3.14/Npole +
4*2*3.14/(Nr*Npole)+psy));
K = St0 + St1 + St2 + St3 + St4;

```

```

Ttang1 = Ms*L*x(3)^2*(2*3.14/Npole)*K;

```

% Torsi Tangensial Luar

```

Ttang2 = Ms*L*x(4)^2*(2*3.14/Npole)*K;

```

% Torsi Stall

```

Ttotal = Tradial + Ttang1 + Ttang2;

```

%Torsi Density

```

Tdens = -Ttotal/(L*3.14*(x(2)^2+x(4)^2));
end

```

Program ini untuk mendeklarasikan rumus torsi density yang nantinya akan dibandingkan hasilnya dari tiap-tiap variasi. Kemudian dicari dimensi yang mana yang menghasilkan torsi density maksimal.

4.1.3 Program menggunakan *fmincon()*

```

objective = @torsi;

```

```

x0 = [2,5,5,8];
disp(['Initial Objective : ',num2str(objective(x0))])
A = [];
b = [];
Aeq = [];
beq = [];
lb = 2.0*ones(4);
ub = 14.0*ones(4);
nonlincon = @nlcon;

x = fmincon(objective,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlincon);
disp(x)
disp(['Final Objective : ',num2str(objective(x))])

```

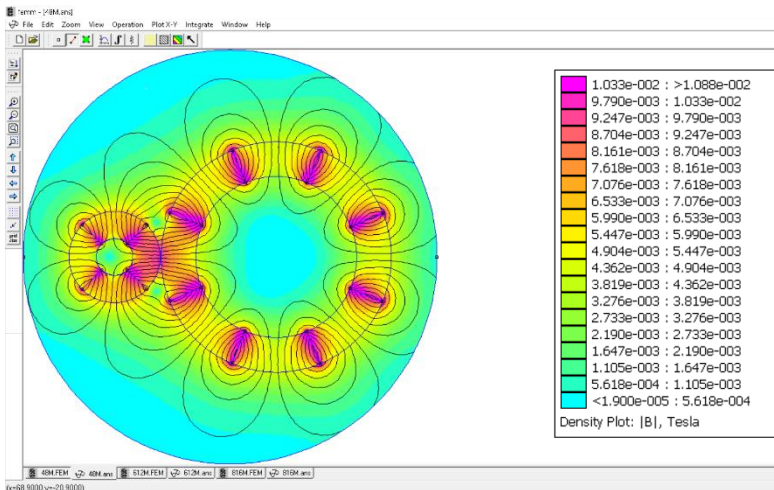
Program ini digunakan untuk proses perhitungan menggunakan *fmincon()* penyelesaian metode *Lagrange Multiplier*. Hasil yang didapat dari proses *running*, adalah

Tabel 4.1 Hasil running MATLAB menggunakan *fmincon()*

Jari - jari	Variasi pole 4 : 8	Variasi pole 6 : 12	Variasi pole 8 : 16
R_{1s} (cm)	2	2	2
R_{2s} (cm)	5	5	5
R_{1d} (cm)	9.2191	8.62222	8.4337
R_{2d} (cm)	12.63	12.2018	12.0693
<i>Torque Density</i> (kN/m ²)	1.650	1.354	1.22

4.2 Hasil Simulasi FEMM

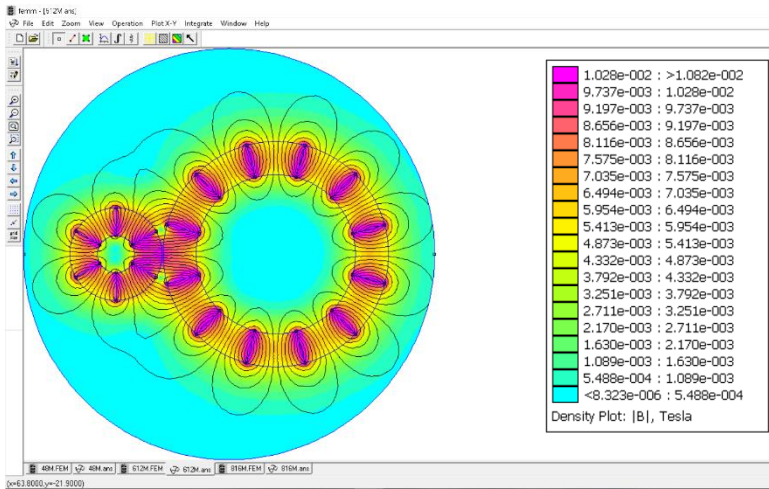
Dalam simulasi di software FEMM ini dilakukan setelah didapatkan nilai dari jari-jari hasil running pada software MATLAB. Dibawah ini adalah hasil dari FEMM dengan perbandingan jumlah pole 4 : 8



Gambar 4.1 Hasil simulasi Flux density FEMM variasi 4 : 8 *air gap* 1mm

Pada gambar 4.1 terlihat bahwa adanya flux hasil gaya tarik ataupun gaya tolak yang dihasilkan oleh magnet dari *source* dan magnet pada *driven*. Terlihat bahwa besar *flux density* terbesar pada simulasi FEMM berkisar antara 1,033e-002 T, dan *flux density* terkecil sebesar 5,618e-004 T. Lalu terlihat bahwa *flux* terbanyak terpadat antara *source* dan *driven* terjadi sepanjang koordinat $y = 16$ cm sampai $y = -16$ cm, jadi gaya tarik menarik antara kedua gear jika ditarik garis lurus ditengahnya terjadi sepanjang 32 cm, *torque density* yang dihasilkan sebesar 1,053 kN/m².

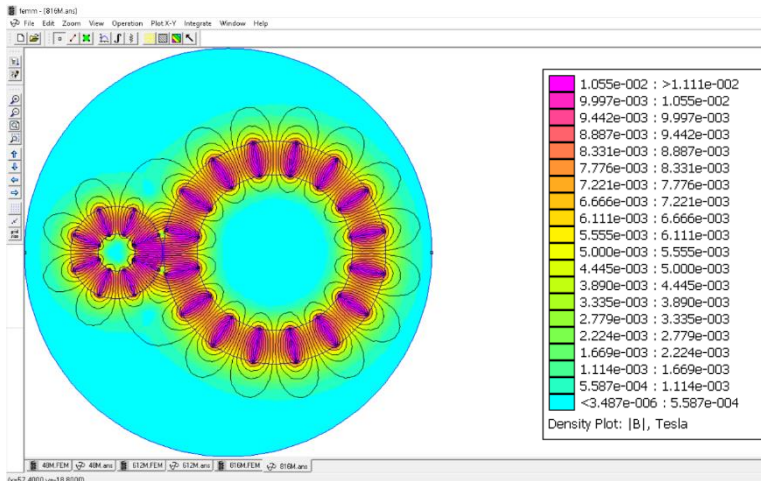
Kemudian variasi jumlah magnet 6 : 12 dengan jari-jari hasil optimasi, ditunjukkan FEMM seperti berikut :



Gambar 4.2 Hasil simulasi Flux density FEMM variasi 6 : 12 *air gap* 1mm

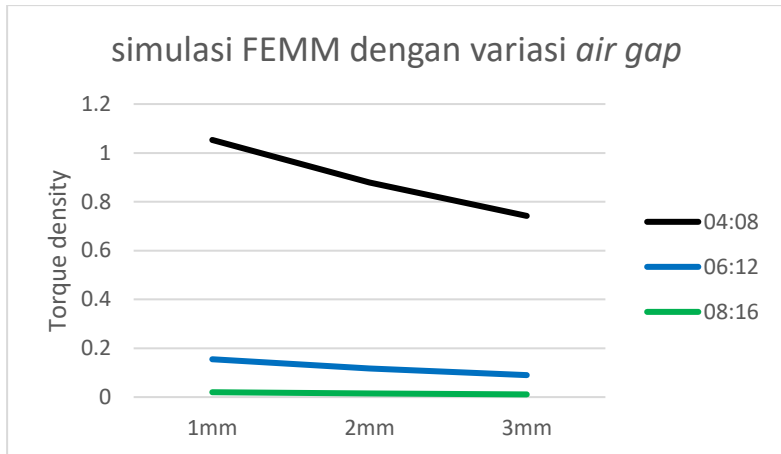
Pada gambar 4.2 terlihat bahwa adanya flux hasil gaya tarik ataupun gaya tolak yang dihasilkan oleh magnet dari source dan magnet pada driven. Terlihat bahwa besar *flux density* terbesar pada simulasi FEMM berkisar antara 1,028e-002 T, dan *flux density* terkecil sebesar 5,844e-004 T. Lalu terlihat bahwa *flux* terbanyak terpadat antara *source* dan *driven* terjadi sepanjang koordinat $y = 8,3$ cm sampai $y = -8,3$ cm, jadi gaya tarik menarik antara kedua gear jika ditarik garis lurus ditengahnya terjadi sepanjang 16,6 cm, *torque density* yang dihasilkan sebesar 0,161612 kN/m².

Kemudian variasi jumlah magnet 8 : 16 dengan jari-jari hasil optimasi, ditunjukkan FEMM seperti berikut :



Gambar 4.3 Hasil simulasi Flux density FEMM variasi 8 : 16 *air gap* 1mm

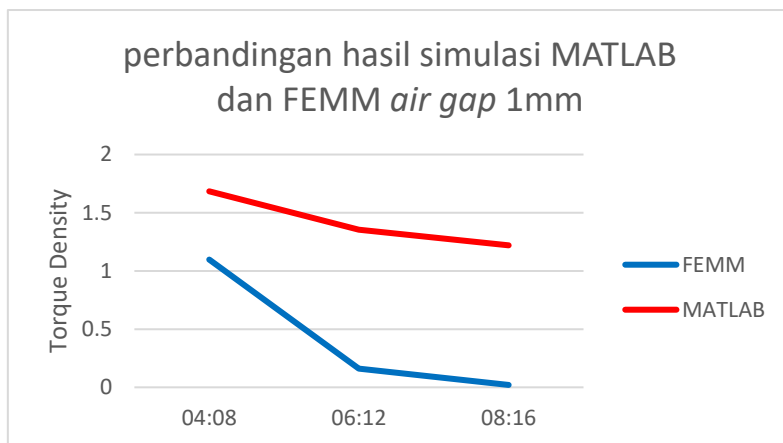
Pada gambar 4.3 terlihat bahwa adanya flux hasil gaya tarik ataupun gaya tolak yang dihasilkan oleh magnet dari source dan magnet pada driven. Terlihat bahwa besar *flux density* terbesar pada simulasi FEMM berkisar antara 1,055e-002 T, dan *flux density* terkecil sebesar 5,587e-004 T. Lalu terlihat bahwa *flux* terbanyak terpadat antara *source* dan *driven* terjadi sepanjang koordinat $y = 6,2$ cm sampai $y = -6,2$ cm, jadi gaya tarik menarik antara kedua gear jika ditarik garis lurus ditengahnya terjadi sepanjang 12,4 cm, *torque density* yang dihasilkan sebesar 0,020446 kN/m².



Grafik 4.4 perbandingan *torque density* FEMM dengan variasi *air gap*

Pada grafik 4.4 terlihat bahwa pada simulasi FEMM dengan pole 4:8 nilai *torque density* terbesar didapat sebesar 1,053 kN/m² pada variasi *air gap* 1 mm. sedangkan pada pole 6:12 nilai *torque density* terbesar didapat sebesar 0,161612 kN/m² pada variasi *air gap* 1 mm. sedangkan pada pole 8:16 nilai *torque density* terbesar didapat sebesar 0,020446 kN/m² pada variasi *air gap* 1 mm. Trendline grafik *torque density* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya *air gap*, hal ini disebabkan karena penurunan gaya tarik-menarik dari kedua *magnetic spur gear radial* seiring dengan bertambahnya *air gap* sehingga *torque density* mengalami penurunan.

4.3 Perbandingan Simulasi MATLAB dan FEMM



Grafik 4.5 perbandingan *torque density* hasil perhitungan MATLAB vs FEMM *air gap* 1mm

Pada grafik 4.5 terlihat bahwa semakin bertambahnya jumlah pole pada magnet, maka besar *torque density* semakin kecil, trendline grafik FEMM maupun MATLAB mengalami penurunan seiring dengan pertambahan jumlah pole. Besar *torque density* hasil perhitungan matlab pada variasi 4:8 sebesar 1,650 kN/m², sedangkan untuk besar *torque density* hasil simulasi femm pada variasi 4:8 sebesar 1,097458 kN/m², besar *torque density* hasil perhitungan matlab pada variasi 6:12 sebesar 1,354 kN/m², sedangkan untuk besar *torque density* hasil simulasi femm pada variasi 6:12 sebesar 0,161612 kN/m², besar *torque density* hasil perhitungan matlab pada variasi 8:16 sebesar 1,22 kN/m², sedangkan untuk besar *torque density* hasil simulasi femm pada variasi 8:16 sebesar 0,020446 kN/m².

Perbedaan hasil simulasi MATLAB dan FEMM disebabkan karena pada perhitungan optimasi pada MATLAB

tanpa memperhitungkan *air gap* yang ada, sedangkan pada simulasi FEMM *air gap* berpengaruh terhadap *torque density*, sehingga terjadi perbedaan besar hasil dari kedua simulasi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Pada tugas akhir ini, kesimpulan dari analisa optimasi *Magnetic Spur Gear* adalah:

1. Optimasi *torque density magnetic spur gear* dengan MATLAB untuk variasi 4:8 didapat kan nilai sebesar $1,650 \text{ kN/m}^2$, lalu pada variasi 6:12 sebesar $1,354 \text{ kN/m}^2$, dan pada variasi 8:16 sebesar $1,22 \text{ kN/m}^2$.
2. *Torque density* dari simulasi FEMM pada variasi 4:8 didapat sebesar $1,053 \text{ kN/m}^2$, lalu pada variasi 6:12 sebesar $0,161612 \text{ kN/m}^2$, dan pada variasi 8:16 sebesar $0,020446 \text{ kN/m}^2$.
3. Hasil jari-jari optimal pada variasi 4:8 didapat R_{1s} 2 cm, R_{2s} 5 cm, R_{1d} 9,2191 cm dan R_{2d} 12,63 cm, pada variasi 6:12 didapat R_{1s} 2 cm, R_{2s} 5 cm, R_{1d} 8,62222 cm dan R_{2d} 12,2018 cm, pada variasi 8:16 didapat R_{1s} 2 cm, R_{2s} 5 cm, R_{1d} 8,4337 cm dan R_{2d} 12,0693 cm.
4. Hasil optimal *torque density magnetic spur gear* didapat sebesar $1,650 \text{ kN/m}^2$ pada variasi pole 4:8.
5. Semakin besar jumlah pole pada rasio putar 1:2 didapat bahwa semakin banyak jumlah pole, maka R_{1d} semakin menurun, dan R_{2d} semakin menurun juga, sementara R_{1s} dan R_{2s} tidak mengalami perubahan.
6. Pengaruh jumlah pole terhadap *torque density* adalah semakin bertambahnya jumlah pole pada magnet, maka besar *torque density* semakin kecil, trendline grafik FEMM maupun MATLAB mengalami penurunan seiring dengan pertambahan jumlah pole.

5.2 **Saran**

Saran yang bisa diajukan setelah pengerjaan tugas akhir kali ini adalah diperlukan adanya simulasi dan analisa pada kondisi yang lebih *detail* seperti pada saat magnet bergerak, supaya bisa terlihat system kerja pada *Magnetic Spur Gear*. Selain itu, diperlukan adanya penelitian lebih dalam tentang penggunaan *demagnetisasi* , sehingga bisa tahu berapa lama umur magnet.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Davey. Kent dkk, **“Magnetic Gears – An Essential Enabler for the Next Generation’s Electromagnetical Drives”**, University of Texas, 2012.
- [2] Fukuoka. Michinari, **“Experimental Tests and Efficiency Improvement of Surface Permanent Magnet Magnetic Gear”**, Tohoku University of Japan, 2013.
- [3] Jorgensen. Frank Thorleif, **“Design and Contruction of Permanent Magnetic Gears”**, Aalborg University : Denmark, 2010.
- [4] Muruganandam G., **“Torque Analysis of Magnetic Spur Gear with Different Configurations”**, International Journal of Electrical Engineering Vol. 5 No. 7, 2012.
- [5] Arora. Jasbir Signh, **“Introduction to Optimum Design”**, The University of Iowa : USA, 2017
- [6] Hamidizadeh, S., **“Study of Magnetic Properties and Demagnetization Models of Pemanent Magnets for Electric Vehicle Application”**. Department of Mining and Materials Engineering, McGill University : Canada, 2016

	r1s	r2s	r1d	r2d	Tebal driven	Akonstrain	Torque density Var 4 : 8	Torque density Var 6 : 12	Torque density Var 8 : 16
3.142857	2	5	10.5	13.59060504	3.090605044	300	16.3391	13.1167	11.6804
3.142857	2	5	10	13.20812422	3.208124222	300	16.4391	13.2922	11.8786
3.142857	2	5	9.5	12.83372687	3.333726873	300	16.4968	13.4287	12.0398
3.142857	2	5	9	12.46814122	3.468141219	300	16.5	13.5138	12.1518
3.142857	2	5	8.5	12.11216518	3.612165184	300	16.4342	13.5327	12.2002
3.142857	2	5	8	11.76667096	3.766670959	300	16.2818	13.4675	12.1673
3.142857	2	5	7.5	11.432660886	3.932660885	300	16.0222	13.2969	12.032
3.142857	2	5	7	11.1110101	4.111010101	300	15.6309	12.9958	11.7696
3.142857	2	5	6.5	10.8029878	4.302987802	300	15.0795	12.5348	11.3509
3.142857	2	5	6	10.50973575	4.509735746	300	14.3352	11.8799	10.7426
3.142857	2	5	5.5	10.2325239	4.732523904	300	13.3609	10.9926	9.9062
3.142857	2	5	5	9.972689981	4.972689981	300	12.1149	9.8298	8.7992
3.142857	2	5.5	10	13.00786475	3.007864754	300	15.7931	12.7022	11.3218
3.142857	2	5.5	9.5	12.62758125	3.127581249	300	15.8529	12.8442	11.4895
3.142857	2	5.5	9	12.2557964	3.255796402	300	15.8637	12.9404	11.6137
3.142857	2	5.5	8.5	11.8934665	3.393466503	300	15.812	12.9772	11.6809
3.142857	2	5.5	8	11.54142736	3.541427358	300	15.6816	12.9381	11.6749
3.142857	2	5.5	7.5	11.20064933	3.700649332	300	15.4534	12.8032	11.576
3.142857	2	5.5	7	10.87219138	3.872191382	300	15.1045	12.549	11.361
3.142857	2	5.5	6.5	10.55720349	4.057203486	300	14.6082	12.1478	11.0026
3.142857	2	5.5	6	10.25692671	4.256926706	300	13.9335	11.5675	10.4688
3.142857	2	5.5	5.5	9.972689981	4.472689981	300	13.045	10.7713	9.7234
3.142857	2	6	9	12.01892447	3.018924472	300	15.1338	12.2791	10.9917
3.142857	2	6	8.5	11.64922939	3.149229398	300	15.0948	12.3327	11.0767
3.142857	2	6	8	11.28957685	3.28957685	300	14.9857	12.3191	11.0972
3.142857	2	6	7.5	10.94095725	3.440957246	300	14.7889	12.2203	11.0352
3.142857	2	6	7	10.60445873	3.604458733	300	14.4835	12.0145	10.8693
3.142857	2	6	6.5	10.28127159	3.781271587	300	14.0447	11.6761	10.574
3.142857	2	6	6	9.972689981	3.972689981	300	13.4437	11.175	10.1196

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Akhmad Gafar, dilahirkan di Serang pada 24 Februari 1993. Penulis menempuh Pendidikan sekolah dasar pada tahun 1999-2005 di SDN 4 Cilegon, pendidikan di SMPN1 Cilegon pada tahun 2005-2008, lalu pada 2008-2011 di SMAN CMBBS Banten. Lalu penulis melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya dengan Departemen Teknik Mesin bidang studi Desain.