TUGAS AKHIR – TM 184835

# ANALISIS TORSI PADA RODA GIGI MAGNETIK RADIAL SECARA SIMULASI DAN EKSPERIMEN

Aqbil Ghafara
NRP 02111640000098

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

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

**TUGAS AKHIR – TM 184835**

# ANALISIS TORSI PADA RODA GIGI MAGNETIK RADIAL SECARA SIMULASI DAN EKSPERIMEN

Aqbil Ghafara
NRP 02111640000098

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

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

**FINAL PROJECT – TM 184835**

# SIMULATION AND EXPERIMENT ANALYSIS ON TORQUE OF RADIAL MAGNETIC GEAR

Aqbil Ghafara
NRP 02111640000098

Advisor
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial and System Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

# ANALISIS TORSI PADA RODA GIGI MAGNETIK RADIAL SECARA SIMULASI DAN EKSPERIMEN

## TUGAS AKHIR

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


Oleh :
**AQBIL GHAFARA**
NRP. 02111640000098


Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

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

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

**SURABAYA**
**AGUSTUS, 2020**

# ANALISIS TORSI PADA RODA GIGI MAGNETIK RADIAL SECARA SIMULASI DAN EKSPERIMEN


| | |
|---|---|
| Nama Mahasiswa | : Aqbil Ghafara |
| NRP | : 02111640000098 |
| Departemen | : Teknik Mesin FTIRS-ITS |
| Dosen Pembimbing | : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA |


## ABSTRAK


Roda gigi magnetik merupakan salah satu inovasi dalam perkembangan roda gigi untuk mengatasi berbagai permasalahan yang timbul pada roda gigi mekanik. Namun pada roda gigi magnet torsi yang dihasilkan tidak lebih besar dari torsi yang dihasilkan pada roda gigi mekanik yang menjadikan hal ini sebagai salah satu kelemahan pada roda gigi maknetik. Untuk mengetahui besar torsi yang dihasilkan dari *magnetic gear* tersebut, maka diperlukan sebuah pengujian secara simulasi menggunakan *software* serta pengujian eksperimen sebagai validasi dari pengujian secara simulasinya.

Pemodelan 3D *radial external magnetic spur gear* dilakukan dengan menggunakan *software* Solidwork. Model 3D yang telah dibuat, di-*input* ke dalam *software* Ansys Maxwell 3D untuk dilakukan simulasi. Simulasi dilakukan dengan tiga variasi kecepatan pada *high speed gear*. Lalu dilakukan analisa *transient* untuk mencari besar dari torsi maksimum pada *high speed gear* maupun *low speed gear*. Dalam proses simulasi perlu dilakukan pengaturan untuk mengatur lama pengambilan data dan *timeframe* pengambilan data. Pada proses eksperimen, dilakukan beberapa tahapan, yakni proses perakitan peralatan dan bahan sesuai dengan skema percobaan. Kemudian setelah semua terangkai, maka dilakukan pengambilan data berupa besar torsi maksimumnya pada tiap tiga variasi kecepatan putar. Setelah itu dilakukan perhitungan efisiensi dari *radial external magnetic spur gear* yang diuji. Dilakukan pula pengujian dengan lima variasi pembebanan pada

LS rotor untuk kemudian diambil hasil berupa torsi dan rasio putarannya.

Hasil penelitian mengindikasikan bahwa semakin dekat jarang *air gap* maka torsi yang dapat disalurkan akan semakin besar karena nilai *magnetitation*-nya yang lebih besar dan semakin besar kecepatan rotasi *input*, maka torsi yang dapat disalurkan semakin rendah karena adanya efek *fictive torsion spring*. Dari perbandingan hasil simulasi dan eksperimen, didapatkan bahwa torsi maksimum yang dihasilkan pada metode eksperimen lebih kecil dibandingkan pada metode simulasi disebabkan oleh adanya factor-faktor penghambat seperti *losses* pada *bearing* serta dari beban poros yang digunakan. Dari perhitungan, dapat diketahui efisiensi dari *bearing* diperkirakan sebesar 97%. Didapatkan pula hasil dari eksperimen berupa efisiensi pada *magnetic gear* yang mana nilai efisiensinya dipengaruhi oleh daya pada rotor *input* dan daya pada rotor *output* dimana pada eksperimen ini nilai efisiensi tertinggi ada pada kecepatan 110 rpm dengan nilai sebesar 24,39%. Pada hasil pengujian dengan variasi beban yang dilakukan pada kecepatan 110 rpm didapatkan penambahan beban pada LS rotor mengakibatkan turunnya rasio putaran serta torsi pada LS gear dengan selisih perbedaan pada tiap variasi beban tidak lebih dari 10%.

**Kata kunci: *Radial external magnetic spur gear*, torsi, *magnetic field*, efisiensi, beban**

# SIMULATION AND EXPERIMENT ANALYSIS ON TORQUE OF RADIAL MAGNETIC GEAR


| | |
|---|---|
| Student Name | : Aqbil Ghafara |
| Student ID | : 02111640000098 |
| Departement | : Teknik Mesin FTIRS-ITS |
| Academic Advisor | : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA |


## ABSTRACT


*Magnetic gears are one of the innovations in the development of gears to overcome various problems that arise in mechanical gears. But in magnetic gears the torque generated is not greater than the torque generated in mechanical gears which makes this one of the weaknesses of magnetic gears. To find out the amount of torque produced from the magnetic gear, we need a simulation test using software and experimental testing as a validation of the simulation test.*

*3D modeling of radial external magnetic spur gear is done using Solidwork software. Then the 3D model that has been made, is input into the Ansys Maxwell 3D software for simulation. The simulation is done with three variations of speed on high speed gear. Then a transient analysis is performed to find the magnitude of the maximum torque on the high speed gear and low speed gear. In the simulation process, it is necessary to make arrangements to adjust the length of data retrieval and timeframe data retrieval. In the experimental process, several stages are carried out, namely the process of assembling equipment and materials by the experiment scheme. Then after everything is has been assembled, the data is taken in the form of maximum torque at each of the three variations in rotational speed. After that, the efficiency of the external magnetic spur gear radial is calculated. Also tested with five variations of loading on the LS rotor to then take the results in the form of torque and rotation ratio.*

*The results indicate that the closer the water gap is, the greater the torque that can be distributed because of the greater*

*magnetitation value and the greater the rotational speed of the input, the lower the torque that can be distributed is due to the fictive torsion spring effect. From the comparison of simulation and experimental results, it is found that the maximum torque produced in the experimental method is smaller than the simulation method caused by the presence of inhibiting factors such as losses on the bearing and from the load of shaft that used. From the calculations, it can be seen that the efficiency of the bearing is estimated at 97%. The results also obtained from the experiment in the form of efficiency on magnetic gear where the efficiency value is influenced by the power at the input rotor and the power at the output rotor where in this experiment the highest efficiency value is at 110 rpm with a value of 24,39%. In the test results with load variations carried out at a speed of 110 rpm, it was found that the additional load on the LS rotor resulted in a decrease in the rotation ratio and torque on the LS gear with the difference between the differences in each load variation of not more than 10%.*

***Key words*: *Radial external magnetic spur gear, torque, magnetic field, efficiency, load***

# KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang atas limpahan rahmat dan ridho-Nya, penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan tugas akhir ini dengan baik.

Penyusunan laporan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademis untuk kelulusan mahasiswa Program Studi S1 Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penulis memahami dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya bantuan, bimbingan dan do'a dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Totok Suryono dan Ibu Sugiarti selaku orangtua penulis, Iradatul Qudus selaku kakak penulis, dan keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan do'a yang tak henti-henti hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir Agus Sigit Pramono, DEA, selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan dan nasehat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST. MT, selaku dosen wali penulis.
4. Tim seperjuangan tugas akhir magnetik, Iqra Iffagano, M. Darma Susilo Aji Utomo, terima kasih atas kerjasamanya yang diberikan selama ini.
5. Fajri Wahidin, Zulfan Farruqi, dan Quraisy Amri terima kasih telah menjadi *partner survival* pengerjaan Tugas Akhir di Surabaya selama wabah pandemik Covid-19.
6. Teman-teman kontrakan SMRK Barokah yang selalu memberi bantuan, dukungan, serta tempat bernaung untuk penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.

7. Fahmi Yusuf, Naufal Irham, Eka Rizki W. Ainunnisa, Yudith Silvani dan Syafira Aufa yang turut memberikan dukungan dari tempat yang jauh disana kepada penulis.
8. Seluruh rekan-rekan Laboratorium Mekanika Benda padat yang telah memberikan bantuan dan dukungan dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.
9. Seluruh Keluarga Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS khususnya mantan pengurus LBMM 2016 yang tak henti-hentinya memberikan semangat kepada penulis.
10. Seluruh rekan-rekan Teknik Mesin ITS 2016 M59 Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri Intitut Teknologi Sepuluh Nopember yang turut membantu dan memberikan dukungan kepada penulis.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu satu

Semoga amal dan jasa yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat imbalan dari ALLAH SWT.

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

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

Surabaya, Agustus 2020

Penulis

**DAFTAR ISI**

**ABSTRAK ..... i**
**ABSTRACT ..... iii**
**KATA PENGANTAR ..... v**
**DAFTAR ISI ..... vii**
**DAFTAR GAMBAR ..... x**
**DAFTAR TABEL ..... xiv**
**BAB I PENDAHULUAN ..... 1**
1.1 Latar Belakang ..... 1
1.2 Rumusan Masalah ..... 5
1.3 Tujuan Penelitian ..... 5
1.4 Batasan Masalah ..... 6
1.5 Manfaat Penulisan ..... 6
1.6 Sistematika Penulisan ..... 7
**BAB II TINJAUAN PUSTAKA ..... 9**
3.1 Roda Gigi ..... 9
2.1.1 Roda Gigi Lurus (*Spur Gear*) ..... 10
2.2 Magnetic Gear ..... 11
2.2.1 Hubungan antara Jumlah Magnet terhadap Rasio Putaran ..... 13
2.2.2 Torque Density ..... 13
2.2.3 Effisiensi ..... 16
2.2.4 Perhitungan *Magnetitation* Paralel ..... 16
2.2.5 Perhitungan *Drive* Magnet *Surface Current Density* ..... 16

2.2.6 Pehitungan *External Flux Density Field* .. 17
2.2.7 Perhitungan Torsi ..... 18
2.3 Magnet Permanen ..... 21
2.3.1 Demagnetisasi ..... 24
2.3.2 Neodymium Magnet (NdFeB) ..... 25
2.4 Daya Hilang pada *Ball Bearing* ..... 28
2.5 Penelitian Terdahulu ..... 29
**BAB III METODE PENELITIAN..... 36**
3.1 Flowchart Penelitian ..... 37
3.1.1 Observasi ..... 38
3.1.2 Perumusan Masalah..... 38
3.1.3 Studi Literatur ..... 39
3.1.4 Penentuan Data Awal ..... 39
3.1.5 Desain 3D, Simulasi, dan Eksperimen ..... 39
3.1.6 Analisa Hasil Data dan Kesimpulan..... 39
3.1.7 Penulisan Laporan ..... 39
3.2 Pemodelan dan Simulasi ..... 40
3.2.1 *Flowchart* Simulasi ..... 40
3.2.2 Pemodelan 3D dengan *software* Solidworks ..... 42
3.2.3 Simulasi ..... 46
3.2.4 Post-processing..... 56
3.3 Proses Eksperimen ..... 57
3.3.1 Peralatan Eksperimen ..... 57

3.3.2 Instalasi Peralatan ..... 59
3.3.3 Langkah-langkah Eksperimen ..... 60
3.3.4 *Flowchart* Eksperimen ..... 65
3.4 Pengambilan dan Pengolahan Data ..... 68
**BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN .. 69**
4.1 Analisis Hasil Simulasi ..... 69
4.1.1 Analisis Pengaruh *Air Gap* dan Kecepatan Terhadap Torsi LS Rotor ..... 69
4.1.2 Analisis Pengaruh *Air Gap* dan Kecepatan Terhadap Torsi HS Rotor ..... 74
4.2 Analisis Hasil Eksperimen ..... 78
4.2.1 Analisis Torsi Eksperimen Pada LS rotor 79
4.2.2 Analisis Torsi Simulasi dan Eksperimen pada LS Rotor ..... 80
4.2.3 Analisis Efisiensi *Radial External Magnetic Spur Gear* Pada Eksperimen ..... 82
4.2.4 Analisis Pengaruh Variasi Beban terhadap Torsi LS dan Rasio Putaran ..... 84
**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN ..... 86**
5.1 Kesimpulan ..... 87
5.2 Saran ..... 88
**DAFTAR PUSTAKA ..... xv**
**LAMPIRAN I..... xvii**
**BIODATA PENULIS……..xix**

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Contoh kegagalan yang terjadi pada roda gigi ..... 3
Gambar 1.2 Contoh model sederhana *Radial external magnetic spur gear* ..... 4
Gambar 2.1 Macam-macam jenis roda gigi..... 9
Gambar 2.2 Geometri roda gigi lurus (*spur gear*)..... 11
Gambar 2.3 *Magnetic gear* dan diagram torsi ..... 12
Gambar 2.4 External magnetic spur gear ..... 13
Gambar 2.5 Ilustrasi perhitungan volume $V_T$ suatu *gearbox* ..... 15
Gambar 2.7 Ilustrasi perhitungan torsi ..... 18
Gambar 2.6 (a) Tipikal kurva histerisis *soft* dan *hard* ferromagnetik & (b) *Energy product* ($BH_{max}$)..... 23
Gambar 2.7 Magnet *neodymium*..... 27
Gambar 2.8 (a). *External magnetic gear* dengan magnet berbentuk persegi panjang (b). Geometri *external magnetic gear* ..... 30
Gambar 2.9 (a.) Hubungan antara torsi dengan jumlah pasangan magnet permanen (b.) Hubungan antara torsi dengan jarak *air gap* (c.) Hubungan antara torsi dengan *remanence* magnet permanen ..... 32
Gambar 2.10 Model axial magnetic spur gear..... 33
Gambar 2.11 (a.) Grafik perbandingan *air gap* vs torsi pada HS rotor (b.) Grafik perbandingan *air gap* vs torsi pada LS rotor ..... 35
Gambar 3.1 *Flowchart* penelitian..... 38

Gambar 3.3 (a) Sketch LS rotor (b) Sketch HS rotor (c) Sketch magnet permanen ..... 44
Gambar 3.4 (a) Model 3D LS rotor (b) Model 3D HS rotor (c) Model 3D magnet permanen. ..... 45
Gambar 3.5 Hasil *assembly part-part* yang telah dibuat sebelumnya ..... 46
Gambar 3.6 Hasil input model 3D radial external magnetic spur gear ..... 47
Gambar 3.7 Proses *assign material properties* dari model pada *software* (a.) material magnet NdFe35 (b.) material *gear blank* PLA ..... 48
Gambar 3.8 Hasil pembuatan *region* pada *magnetic gear* ..... 50
Gambar 3.9 Hasil pembuatan *mesh* pada objek..... 51
Gambar 3.10 Pengaturan *solve setup*..... 51
Gambar 3.11 Hasil analisis *mesh* yang telah dibuat ..... 52
Gambar 3.12 Hasil pembuatan *region band* pada HS ... 53
Gambar 3.13 *Motion setup* pada *region band* (a.) tipe *motion* rotasi dengan sumbu putar pada sumbu pusat *region band* (b.) kecepatan putar 100 rpm untuk data pertama ..... 54
Gambar 3.14 Pengaturan *setup* pengambilan data..... 55
Gambar 3.15 Validation check ..... 56
Gambar 3.16 (a.) Grafik torsi terhadap waktu pada HS (b.) grafik torsi terhadap waktu pada LS (c.) Arah vector dan besar nilai dari *flux density* ..... 57
Gambar 3.17 Instalasi peralatan uji ekperimen *radial magnetic spur gear* ..... 59

Gambar 3.18 Model 3D dari *gear blank* yang akan digunakan ..... 60
Gambar 3.19 Perbandingan resolusi pada sebuah model berbentuk bola ..... 61
Gambar 3.20 desain rancangan bagian-bagian alat uji eksperimen (a.) plat alat (b.) tiang dudukan poros (c.) poros bagian 1 (d.) poros bagian 2 bagian luar (e.) poros bagian 2 tampak bagian dalam ..... 63
Gambar 3.21 *Flowchart* eksperimen ..... 67
Gambar 4.1 Grafik torsi pada LS rotor terhadap variasi kecepatan serta *air gap* ..... 70
Gambar 4.2 Hasil simulasi LS rotor dengan *air gap* 1,5 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi..... 72
Gambar 4.3 Hasil simulasi LS rotor dengan *air gap* 2 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi ..... 73
Gambar 4.4 Hasil simulasi LS rotor dengan *air gap* 2,5 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi..... 74
Gambar 4.5 Grafik torsi pada HS rotor terhadap variasi kecepatan serta *air gap* ..... 75
Gambar 4.6 Hasil simulasi HS rotor dengan *air gap* 1,5 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi..... 76
Gambar 4.7 Hasil simulasi HS rotor dengan *air gap* 2 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi..... 77

Gambar 4.8 Hasil simulasi HS rotor dengan *air gap* 2,5 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi..... 78
Gambar 4.9 Grafik pengaruh besar torsi terhadap variasi kecepatan motor pada eksperimen..... 79
Gambar 4.10 Grafik perbandingan torsi pada simulasi dan torsi pada eksperimen ..... 80
Gambar 4.11 Perbandingan torsi simulasi setelah dikurangi torsi gesek dengan torsi eksperimen..... 82
Gambar 4.12 Grafik efisiensi terhadap kecepatan rotasi motor pada *air gap* 1,5 mm ..... 83

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Temperatur Curie pada magnet permanen .... 25
Tabel 2.2 *Properties* utama pada beberapa jenis magnet permanen ..... 27
Tabel 2.3 Koefisien gesek rata-rata ..... 28
Tabel 2.4 Spesifikasi magnet dan dimensi *external magnetic gear* ..... 30
Tabel 2.5 Dimensi *gear set* dan magnet permanen yang digunakan ..... 33
Tabel 2.6 Variasi pemodelan yang digunakan ..... 33
Tabel 3.1 Beberapa *properties* dari material yang ada pada model..... 49
Tabel 3.2 Lembar data hasil simulasi dengan variasi *air gap* ..... 68
Tabel 3.3 Lembar data hasil penelitian..... 68
Tabel 4.1 Torsi dan kecepatan dari HS rotor dan LS rotor ..... 82

# BAB I
# PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan dalam penelitian, manfaat dari penulisan, serta sistematika penulisan dalam laporan akhir penelitian.

## 1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan manusia tentunya tidak terlepas dari yang namanya sistem roda gigi, mulai dari roda gigi pada kendaraan, pada mesin-mesin industri, hingga pada mesin-mesin pembangkit. Roda gigi sendiri merupakan alat yang digunakan untuk mentransmisikan daya dan pengubah tingkat putaran pada dua poros yang berbeda. Roda gigi dapat pula digunakan untuk mengubah arah sumbu putar serta mengubah gerak rotasi ke gerak translasi atau sebaliknya. Pada mesin, roda gigi biasanya meneruskan daya dari motor atau penggerak melalui kontak antara gigi-gigi pada roda gigi penggerak (*pinion*) dengan gigi-gigi pada roda gigi yang digerakkan (*gear*), kemudian diteruskan dengan gerak *rolling* pada daerah *dedendum* (di bawah *pitch line*) dan *addendum* (di atas *pitch line*). Ada banyak jenis roda gigi yang biasa digunakan, salah satu yang paling banyak digunakan serta memiliki konstruksi yang paling sederhana adalah roda gigi lurus atau *spur gear*.

Banyak keuntungan yang didapatkan dalam penggunaan roda gigi, diantaranya adalah :

- Sistem yang kompak serta konstruksi yang sederhana sehingga pemasangannya mudah.
- Memiliki efisiensi transmisi daya yang tinggi.
- Ketahanan yang tinggi serta umurnya yang panjang
- Tidak akan terjadi slip.

– Dapat digunakan untuk mentransmisikan daya yang besar.

Namun karena adanya kontak antara gigi-giginya, dapat menimbulkan terjadinya kegagalan. Kontak dan *rolling* di permukaan gigi pada tegangan yang tinggi berlangsung secara berulang sehingga menimbulkan *inheret wear* yang dapat memicu terjadinya *failure*. Akibat adanya kontak ini juga dapat menimbulkan kerugian lainnya seperti keausan pada roda gigi, peningkatan suhu berlebih akibat gesekan yang berulang secara terus-menerus, suara bising dari gesekan yang terjadi, serta karena tidak adanya slip, saat terjadi torsi berlebih roda gigi dapat mengalami kerusakan parah. Oleh karena itu, perawatan dan pelumasan sangatlah penting untuk meningkatkan umur roda gigi. Kegagalan pada roda gigi biasanya bersumber dari dua buah tegangan yang terjadi pada gigi-gigi yang saling berkontak, yakni tegangan kontak dan tegangan *bending*. Disebutkan oleh Mulyadi ,kegagalan-kegagalan yang terjadi pada roda gigi adalah *wear, surface fatigue failure, plastic flow,* dan *breakage failure*

- *Wear*

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

- *Surface Fatigue Failure*

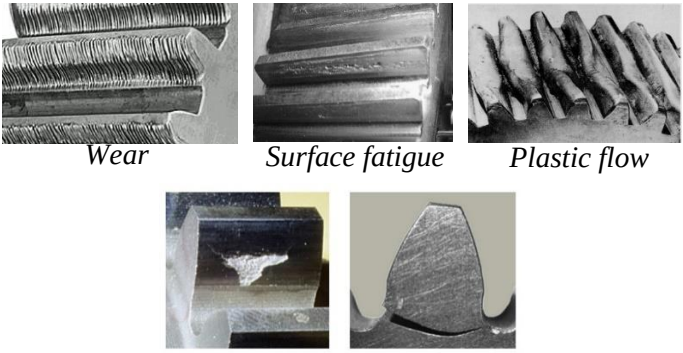
  *Surface fatigue failure* adalah pembentukan lubang-lubang di permukaan gigi dikarenakan pengurasan metal akibat tegangan yang berfluktuasi.

- *Plastic Flow*

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

- *Breakage Failure*

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

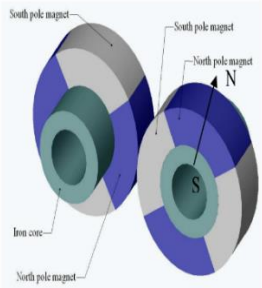



Gambar 1.1 Contoh kegagalan yang terjadi pada roda gigi

Untuk mengatasi kegagalan-kegagalan pada roda gigi, maka dicetuskan sebuah inovasi yang telah banyak dilakukan risetnya oleh peneliti maupun industri, yakni *magnetic gear*. *Magnetic gear* merupakan roda gigi yang gigi-giginya digantikan oleh magnet dan mengandalkan besar medan magnet dari gigi-gigi magnetnya sehingga tidak terjadi kontak antara gigi-gigi dari roda gigi. Banyak keunggulan dari *magnetic gear* ini yang dikarenakan tidak adanya kontak antara gigi-giginya, seperti tidak diperlukannya pelumasan, tidak timbul panas berlebihan, tidak terjadi keausan, umur yang lebih panjang, serta akan terjadi slip bila torsi yang masuk berlebih sehingga tidak akan timbul kerusakan pada roda gigi. Jenis-jenis dari *magnetic gear* sendiri sama seperti roda gigi biasa karena hanya gigi-giginya saja yang diganti

oleh magnet, salah satu jenisnya yang akan saya bahas pada penelitian ini adalah *radial external magnetic spur gear*.

*Radial external magnetic spur gear* adalah roda gigi lurus yang gigi-giginya berupa magnet permanen yang arah medan magnet kutub-kutubnya tegak lurus terhadap sumbu putar roda gigi seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.2. Model ini di latar belakangi oleh ketersediaan jenis magnet permanen yang ada dipasaran yang mana arah medan magnetnya saat dirangkai menjadi sebuah *gear* maka arahnya akan tegak lurus terhadap garis sumbu dari *gear*-nya serta merupakan model roda gigi magnet yang paling sederhana jika diaplikasikan.




Gambar 1.2 Contoh model sederhana *Radial external magnetic spur gear*

Dalam tugas akhir ini model roda gigi *radial external magnetic spur gear* akan dianalisa dengan menggunakan dua metode analisa, yakni menggunakan *Finite Element Method* (FEM) menggunakan *software* dan menggunakan metode eksperimen untuk diperoleh hasil yang nyata, yang hasil akhirnya nanti akan dibandingkan satu sama lain. Penggunaan dua metode analisa ini di latar belakangi oleh diperlukannya perbandingan antara metode analisa secara simulasi dan metode analisa secara eksperimen yang akan dibandingkan hasil keduanya. Dan adanya metode analisa secara eksperimen pada

*radial external magnetic spur gear* dikarenakan kurangnya penelitian pada metode ini sehingga diperlukan eksperimen untuk mencari hasil paling valid jika model roda gigi magnet ini diaplikasikan pada dunia nyata. *Finite Element Method* merupakan metode dengan membagi suatu model yang dianalisa menjadi beberapa bagian dengan jumlah terbatas (*finite*). Bagian-bagian ini disebut elemen yang tiap elemen satu dengan elemen lainnya dihubungkan dengan nodal (*node*). Kemudian dibangun persamaan matematika yang menjadi representasi benda tersebut. Pada metode eksperimen akan digunakan model yang sama dengan analisa FEM dan diuji pada peralatan uji roda gigi dan akan digunakan alat ukur, yakni *torquemeter* untuk diketahui hasilnya. Dengan adanya dua metode penelitian ini, diharapkan membantu dalam proses pendekatan saat melakukan simulasi FEM pada *magnetic gear* sehingga dapat diperkirakan hasil nyatanya saat diaplikasikan dalam dunia nyata.

## 1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa rumusan masalah, yakni sebagai berikut :

1. Bagaimana perbandingan torsi yang dihasilkan antara metode FEM menggunakan *software* dengan metode uji eksperimen?
2. Berapa efisiensi yang dihasilkan *radial external magnetic spur gear* pada uji eksperimen?
3. Bagaimana pengaruh variasi pembebanan terhadap rasio putaran *gear* dan besar torsi yang dapat disalurkan pada uji eksperimen?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui perbandingan torsi yang dihasilkan antara metode FEM menggunakan *software* dengan metode uji eksperimen.
2. Mengetahui nilai efisiensi yang dihasilkan *radial external magnetic spur gear* pada uji eksperimen.
3. Mengetahui pengaruh variasi pembebanan terhadap rasio putaran *gear* dan besar torsi yang dapat disalurkan pada uji eksperimen.

## 1.4 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah yang dilakukan pada penelitian ini, yakni sebagai berikut :

1. Topologi *magnetic gear* yang digunakan adalah *radial eksternal spur gear*.
2. Jenis magnet permanen yang digunakan adalah magnet neodymium (NdFeB) tipe N35.
3. Perhitungan pada *magnetic gear* menggunakan metode analisa 3D *finite element* menggunakan *software* ANSYS Electronics v19.3.
4. Rasio putaran yang digunakan sebesar 1:2
5. Tidak ada pengaruh dari perubahan temperatur.
6. Variasi *Air gap* yang digunakan pada simulasi adalah 1,5; 2; 2,5 mm.
7. Jumlah magnet permanen sebanyak 6 buah pada *high speed gear* dan 12 buah pada *low speed gear*.
8. Variasi kecepatan putar yang digunakan yakni 100 rpm, 200 rpm, dan 300 rpm.

## 1.5 Manfaat Penulisan

Pada penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam perancangan *magnetic gear* sebagai inovasi yang dapat menjadi masukan bagi produsen roda gigi dan industri-industri serta dapat diperkirakan saat melakukan desain roda gigi magnet

antara hasil simulasi FEM-nya dengan hasil uji coba nyatanya agar pada proses desain dapat dikembangkan. Dan kedepannya, diharapkan dapat mengatasi masalah yang sering terjadi pada roda gigi mekanis.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan berisi tentang gambaran umum dari setiap bab pada laporan tugas akhir. Laporan tugas akhir ini disusun dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN
Bab pendahuluan menjelaskan mengenai latar belakang, tujuan dan manfaat penelitian tugas akhir ini, serta sistematika penulisan laporan penelitian tugas akhir ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA
Bab tinjauan pustaka akan menjelaskan mengenai literatur-literatur yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini. Selain itu, akan dijelaskan review penelitian-penelitian sebelumnya yang digunakan sebagai dasar referensi dari penelitian tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN
Bab metodologi penelitian tugas akhir ini akan menjelaskan mengenai metodologi yang digunakan selama penelitian berlangsung.

BAB IV DATA ANALISIS DAN PEMBAHASAN
Bab pembahasn ini berisikan analisis data dari hasil penelitian tugas akhir yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN
Bab ini akan membahas mengenai kesimpulan dari hasil penyelesaian permasalahan sesuai dengan tujuan yang ingin

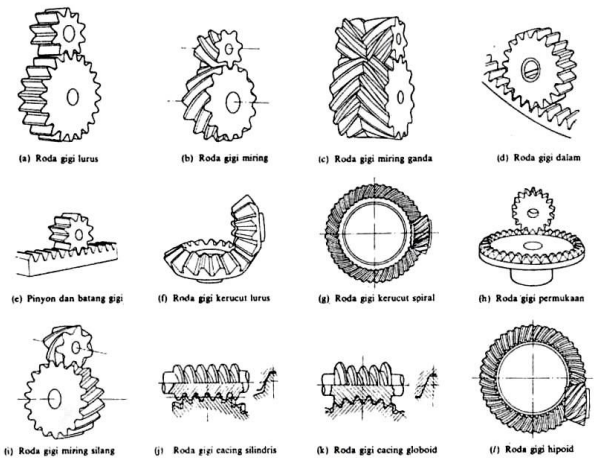
dicapai dan saran yang dapat diberikan terhadap penelitian tugas akhir ini.

# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai beberapa studi literatur serta referensi yang digunakan selama penelitian sebagai dasaran pengerjaan penelitian yang berasal dari jurnal-jurnal, buku, dan sumber lainnya.

## 3.1 Roda Gigi

Roda gigi (*mechanical gear*) merupakan salah satu elemen mesin yang banyak digunakan sebagai alat pentransmisi torsi (daya) dan pengubah tingkat putaran poros di berbagai aplikasi industri. Roda gigi meneruskan daya dari motor melalui kontak antar gigi-giginya. [7] Bagian dari pasangan roda gigi yang berfungsi untuk menggerakkan roda gigi pasangannya disebut *pinion*. Sedangkan pasangan roda gigi yang digerakkan disebut *gear*.

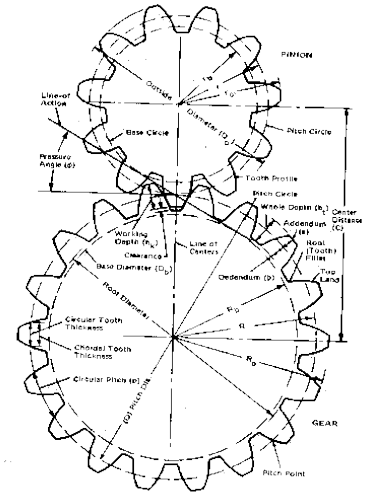



Gambar 2.1 Macam-macam jenis roda gigi

Roda gigi digunakan dalam beberapa aplikasi seperti mobil, *gear box*, mesin-mesin perkakas, mesin-mesin industri, mesin-mesin pertanian, *gear* motor, dan lain-lain. Roda gigi banyak dipilih karena memiliki torsi density yang tinggi, namun terdapat beberapa kekurangan seperti adanya gesekan antar komponen yang dapat menyebabkan keausan, kebisingan yang ditimbulkan, panas yang ditimbulkan bisa sangat tinggi, biasanya rusak apabila dikenai kondisi torsi yang berlebih, memerlukan pelumasan, perawatan secara rutin, dimana getaran dan keandalan menjadi perhatian utama.

### 2.1.1 Roda Gigi Lurus (*Spur Gear*)

Roda gigi lurus merupakan salah satu jenis roda gigi yang memiliki geometri paling sederhana dan paling banyak digunakan. Terdiri dari silinder atau piringan dengan gigi-gigi yang terbentuk secara radial. Ujung dari gigi-gigi tersebut berbentuk lurus dan tersusun paralel terhadap aksis rotasi. Fungsi dari roda gigi lurus ini adalah untuk mentransmisikan torsi (daya) dan pengubah tingkat putaran poros yang sejajar (paralel). Bagian-bagian dan penamaan dari roda gigi lurus terlihat pada Gambar 2.2.




Gambar 2.2 Geometri roda gigi lurus (*spur gear*)

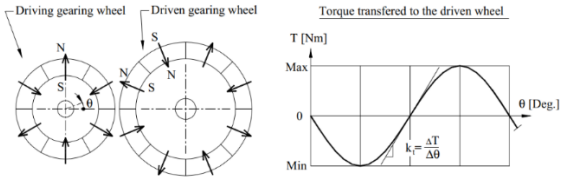
## 2.2 Magnetic Gear

*Magnetic gear* merupakan inovasi terbaru dari para *engineer* dalam pengembangan teknologi pada roda gigi dimana gigi-gigi roda gigi digantikan dengan magnet permanen sehingga tidak adanya kontak antar gigi-gigi dalam hal meneruskan torsi (daya) dan pengubahan tingkat putaran poros.

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

dan kompleksitas dari sistem magnetik. Maka dari itu, dilakukan riset-riset agar *torque density magnetic gear* dapat meningkat sehingga pengaplikasian *magnetic gear* dapat lebih luas lagi.

Dikarenakan tidak adanya kontak sehingga tidak terjadi aus pada *magnetic gear*, namun akan timbul *fictive torsion spring* antar kedua *gear*. *Fictive torsion spring* bisa dijelaskan dengan satu *gear* diam dan *gear* lainnya berputar dengan sudut yang kecil. Pada *mechanical gear* dikenal dengan nama *backlash*. Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar 2.3 dimana terdapat *magnetic gear* penggerak dan yang digerakkan.




Gambar 2.3 *Magnetic gear* dan diagram torsi

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

$$k_t = \frac{\Delta T}{\Delta \theta} \tag{2.1}$$

dimana :

$k_t$ = *torsion spring* (Nm/rad)

$\Delta T$ = perubahan torsi (Nm)

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

### 2.2.1 Hubungan antara Jumlah Magnet terhadap Rasio Putaran

Untuk mendapatkan rasio putaran pada *magnetic gear* sebenarnya tidak ada perbedaan yang signifikan dengan pencarian rasio pada *mechanical gear*. Rasio putarannya sangat bergantung pada banyaknya jumlah magnet $N_{in}$ pada *gear* yang dikenai putaran masukan (*driving gearing wheel*) dan banyaknya jumlah magnet $N_{out}$ pada *gear* yang menghasilkan putaran keluaran (*driven gearing wheel*). Hubungan ini dapat dilihat pada persamaan (2.2).

$$R_g = \frac{N_{in}}{N_{out}} \tag{2.2}$$

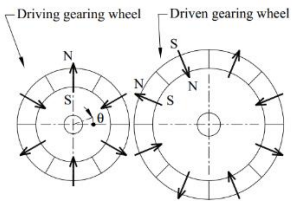
dimana :

$R_g$ = rasio gigi

$N_{in}$ = jumlah magnet pada poros masukan

$N_{out}$ = jumlah magnet pada poros keluaran

Kebanyakan rasio putaran *gear* lebih besar dari 1, dimana kecepatan putaran pada poros masukan tinggi sedangkan putaran pada poros keluaran rendah.




Gambar 2.4 External magnetic spur gear

### 2.2.2 Torque Density

Dalam upaya memperbaiki atau meningkatkan desain dan performa dari suatu sistem mekanik, perancang, produsen,

dan konsumen harus mempertimbangkan beberapa parameter-parameter yang ada. Salah satu parameter yang sering dipandang sebelah mata yaitu *torque density*. Torsi didefinisikan sebagai besaran dari gaya yang melawan pada objek yang berputar, seperti baut. *Torque Density* menunjukkan kemampuan torsi suatu objek, dimana torsi per unit volume atau torsi per total unit volume diberikan. Satuan SI dari *torque density* berupa *Joule* per meter kubik atau *foot-pounds per cubic foot* dalam satuan *British*. Singkatnya, *torque density* mengukur kemampuan suatu objek dalam membawa torsi pada berat dan ukuran tertentu.

Parameter performa seperti ini juga bisa diaplikasikan pada *magnetic gear*. *Gear* dengan permanen magnet memiliki volume dari rotor dan volume ini dibandingkan dengna torsi maksimum yang bisa disalurkan dinamakan dengan torsi density aktif, yang dinyatakan pada persamaan (2.3). *Active torque density* ($\rho_a$) cocok digunakan sebagai parameter untuk membandingkan antara jenis magnetik *gear* yang satu dengan jenis magnetik *gear* yang lainnya.

$$\rho_a = \frac{T_{max}}{V_A} \tag{2.3}$$

dimana :

$\rho_a$ = *active torque density* (Nm/m$^3$)

$T_{max}$ = torsi maksimal yang ditransmisiskan (Nm)

$V_A$ = volume rotor (m$^3$)

Mungkin diperlukan untuk membandingkan *torque density* dari *gear* magnetic dengan *gear* mekanik untuk mengetahui keunggulan pada *gear* magnetik. Semakin baik nilai dari *torque density* yang dihasilkan dari *magnetic gear* merupakan tujuan utamanya. Untuk mencari *total torque density* ($\rho_R$) pada *magnetic gear* dengan menggunakan persamaan (2.4).

$$\rho_R = \frac{T_{max}}{V_T} \tag{2.4}$$

dimana :

$\rho_R$ = *total torque density* (Nm/m$^3$)

Tmax = torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)

$V_T$ = volume total (m$^3$)

*Gear* mekanik memiliki factor *torque density* yang sesuai pada persamaan (2.5) yang mana dihitung dari nilai nominal torsi $T_{nom}$.

$$\rho_T = \frac{T_{nom}}{V_T} \tag{2.5}$$

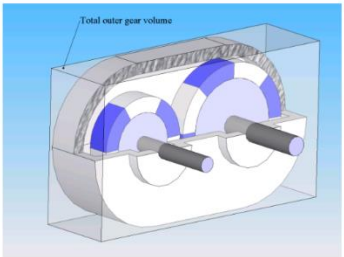
Dimana :

$\rho_T$ = *total torque density* (Nm/m$^3$)

$T_{nom}$ = *rated nominal torque* (Nm)

$V_T$ = volume total (m$^3$)

Volume $V_T$ yang digunakan pada persamaan-persamaan tersebut adalah total dari volume bagian luar *gear*. Karena gearbox sering memiliki bentuk pembulatan dan berbeda yang diekstrusi dari kelengkungan dasar, ini bisa menjadi perhitungan yang agak rumit. Itu sebabnya perhitungan volume adalah perkiraan volume disekitar *gearbox* terkecuali sumbu *gear*. Ilustrasi sederhananya tertera pada gambar 2.5, menunjukkan dimana volume $V_T$ terdefinisi.




Gambar 2.5 Ilustrasi perhitungan volume $V_T$ suatu *gearbox*

### 2.2.3 Effisiensi

Efisiensi digunakan untuk mengukur seberapa baik kinerja *gear* tersebut sehingga dapat menjadi salah satu pertimbangan dalam pemilihan rancangan. *Gear* mekanik dan *gear* magnetik memiliki efisiensi tertentu. Efisiensi ini didefinisikan sebagai hubungan antara *power* (daya) pada poros keluaran dibagi dengan *power* pada poros masukan, yang dinyatakan pada persamaan (2.6).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{2.6}$$

dimana :

$\eta$ = efisiensi

$P_{out}$ = daya pada poros keluaran (W)

$P_{in}$ = daya pada poros masukan (W)

### 2.2.4 Perhitungan *Magnetitation* Paralel

*Magnetitation* paralel *source magnet* terdapat pada arah radial dan tangensial. Persamaan (2.7) digunakan untuk mencari *magnetitation* paralel.

$$M_s(r, \emptyset) = M_r \cdot \hat{r} + M_\emptyset \cdot \hat{\varphi} \tag{2.7}$$

dimana :

$M_r$ = *magnetitation* arah radial (A/m)

$M_\emptyset$ = *magnetitation* arah tangensial (A/m)

### 2.2.5 Perhitungan *Drive* Magnet *Surface Current Density*

Kesetimbangan *surface current density* adalah distribusi *current density* yang memberikan medan magnet yang sama seperti magnet permanen. Persamaan (2.8) menunjukkan *current density* untuk permukaan luar dan dalam.

$$\mathbf{j_m}(p,r,\boldsymbol{\phi},\boldsymbol{\theta}) \models \begin{cases} M_s \sin(\boldsymbol{\theta})\hat{\mathbf{z}} & \begin{cases} r = R_2 \\ \boldsymbol{\phi}_1(p) \le \boldsymbol{\theta} \le \boldsymbol{\phi}_2(p) \Rightarrow \\ \boldsymbol{\phi} - \dfrac{\boldsymbol{\pi}}{N_{pole}}(1+2p) \le \boldsymbol{\theta} \le \boldsymbol{\phi} + \dfrac{\boldsymbol{\pi}}{N_{pole}}(1+2p) \end{cases} \\ -M_s \cos(\boldsymbol{\theta})\hat{\mathbf{z}} & \begin{cases} r = R_1 \\ \boldsymbol{\phi}_1(p) \le \boldsymbol{\theta} \le \boldsymbol{\phi}_2(p) \Rightarrow \\ \boldsymbol{\phi} - \dfrac{\boldsymbol{\pi}}{N_{pole}}(1+2p) \le \boldsymbol{\theta} \le \boldsymbol{\phi} + \dfrac{\boldsymbol{\pi}}{N_{pole}}(1+2p) \end{cases} \end{cases} \quad (2.8)$$

dimana :

jm = *surface current density* (A/m$^2$)

$M_S$ = *magnetitation source magnet* (A/m)

θ = sudut tertentu *source magnet* (rad)

ẑ = vector ke arah z

### 2.2.6 Pehitungan *External Flux Density Field*

Persamaan (2.9) dan (2.10) menunjukkan $B_x^{ext}$ dan $B_y^{ext}$ pada *drive magnet* yang dihasilkan dari medan *source magnet*.

$$B_x^{ext}(r, \Phi) = B_{r'}^{ext}(r'(r,\Phi), \Phi'(r,\Phi) \cos\big(\Phi'(r,\Phi)\big) - B_{\Phi'}^{ext}(r'(r,\Phi), \Phi'(r,\Phi) \sin(\Phi'(r,\Phi)) \quad (2.9)$$

$$B_y^{ext}(r, \Phi) = B_{r'}^{ext}(r'(r,\Phi), \Phi'(r,\Phi) \cos\big(\Phi'(r,\Phi)\big) - B_{\Phi'}^{ext}(r'(r,\Phi), \Phi'(r,\Phi) \sin(\Phi'(r,\Phi)) \quad (2.10)$$

dimana:

$B_x^{ext}$ = x-*direction external flux density field* (Wb)

$B^{yext}$ = y-*direction external density flux field* (Wb)

$B_{r'}^{ext}$ = *radial external flux density field* (Wb)

$B_{\Phi'}^{ext}$ = *tangensial external flux density field* (Wb)

r' = transformasi radius ke koordinat *drive magnet*

Φ' = transformasi tangensial ke koordinat *drive magnet*

### 2.2.7 Perhitungan Torsi

Dalam mencari nilai torsi dari *drive magnet*, pertama harus mengurai sistem menjadi distribusi yang seimbang antara *current densities* volume dan permukaan (Jm dan jm). Persamaan torsi yang terdiri dari dua integral dimana V dan S secara berurutan adalah volume dan permukaan magnet, yang dinyatakan dalam persamaan (2.11).

$$T = \int_v r \times (J_m(r, \emptyset) \times B_{ext}) r dr d\emptyset dz + \int_s r \times (j_m \times B_{ext}) da \qquad (2.11)$$

dimana :

T = torsi (Nm)

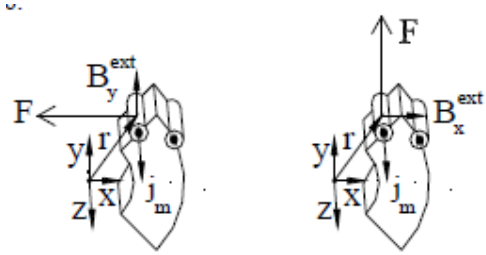
r = vector pada sumbu-r

$J_m$ = *volume current density* ($A/m^2$)

$j_m$ = *surface current density* (A/m)

$B_{ext}$ = *external flux density field* (Wb)

Karena $J_m = \nabla \times M = 0$, maka integral volume yang pertama menjadi nol dan yang tersisa hanya hasil integra permukaan. Semua *current density* pada permukaan harus dilalui oleh $B_{ext}$ dari *source* tersebut, seperti pada Gambar 2.7 yang mengilustrasikan sketsa isometrik.




Gambar 2.7 Ilustrasi perhitungan torsi

Terdapat dua integrasi pada perhitungan torsi, yaitu integrasi permukaan radial dan integrasi permukaan tangensial. Integrasi radial dilakukan pada arah radial bidang permukaan magnet. Persamaan untuk torsi radial didapatkan dengan menggunakan metode integrasi *Simpson*, yang dinyatakan dalam persamaan (2.12).

$$T_r(\emptyset)= \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right)L(R_2-R_1)}{N_r} \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) r(q)$$

$$\text{x } [\cos\left(\emptyset_{edge}(\emptyset,p) B_x^{ext}\left(r(q), \emptyset_{edge}(\emptyset,p)\right)\right) + \sin\left(\emptyset_{edge}(\emptyset,p) B_x^{ext}\left(r(q), \emptyset_{edge}(\emptyset,p)\right)\right) \qquad (2.12)$$

dimana :

$T_r(\emptyset)$ = torsi radial (Nm)
$M_s$ = *magnetitation 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
$\emptyset_{edge}$ = sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)
$\emptyset$ = 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*, yang dinyatakan dalam

persamaan (2.13) dan (2.14).

$Tt_1(\emptyset)=$

$$-\frac{M_s L R_2^1\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right)}{N_t}\sum_{p=0}^{N_{pole}-1}\sum_{q=0}^{N_{pole}-1}(-1)^p S_r(q)\sin\left(\theta(q)\right)\left[\cos\left(\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\emptyset\right)B_x^{ext}\left(R_1,\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\emptyset\right)+\sin\left(\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\emptyset\right)B_y^{ext}\left(R_1,\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\emptyset\right)\right] \quad (2.13)$$

$Tt_2(\emptyset)=$

$$\frac{M_s L R_2^2\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right)}{N_t}\sum_{p=0}^{N_{pole}-1}\sum_{q=0}^{N_{pole}-1}(-1)^p S_r(q)\sin(\theta(q))\left[\cos\left(\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\emptyset\right)B_x^{ext}\left(R_1,\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\emptyset\right)+\sin\left(\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\emptyset\right)B_y^{ext}\left(R_1,\theta(q)+p\frac{2\pi}{N_{pole}}+\emptyset\right)\right] \quad (2.14)$$

dimana :

| | |
|---|---|
| $Tt(\emptyset)$ | = torsi tangensial (Nm) |
| $M_s$ | = *magnetitation source magnet* (A/m) |
| $N_t$ | = parameter integrasi torsi |
| $N_{pole}$ | = 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 |
| θ | = sudut tertentu dari *drive magnet* (rad) |
| ∅ | = 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) |

Persamaan total torsi dari *drive magnet* didapatkan dari penjumlahan dari integral permukaan, yang dinyatakan pada persamaan (2.15).

$$T(\emptyset) = Tr(\emptyset) + Tt_1(\emptyset) + Tt_2(\emptyset) \qquad (2.15)$$

Dimana :

$T(\emptyset)$ = torsi total (Nm)

$Tr(\emptyset)$ = torsi radial (Nm)

$Tt_1(\emptyset)$ = torsi tangensial dalam(Nm)

$Tt_2(\emptyset)$ = torsi tangensial luar (Nm)

## 2.3 Magnet Permanen

Magnet adalah logam yang dapat menarik besi atau baja dan memiliki medan magnet. Magnet dapat dibuat dari bahan besi, baja, dan campuran logam serta telah dimanfaatkan untik industri otomotif dan lainnya. Magnet yang paling banyak dikenal adalah yang mengandung besi metalik. [11] Berdasarkan sifat materialnya, material magnet dibedakan menjadi beberapa sifat, yaitu:

1. Diamagnetik
   Material yang bersifat diamagnetik adalah material yang kekuatan magnetnya sangat lemah dan berlawanan arah dengan medan magnet material magnet lainnya sehingga tidak dapat menarik material lain yang bersifat magnet bahkan terjadi tolak-menolak dengan material yang bersifat magnet disekitarnya.

2. Paramagnetik
   Material yang bersifat paramagnetic adalah material yang memiliki kekuatan magnet lemah namun memiliki arah yang searah terhadap medan magnet material magnet lainnya sehingga terjadi tarik-menarik dengan bahan yang bersifat magnet disekitarnya namun kekuatan tarik-menariknya

lemah.

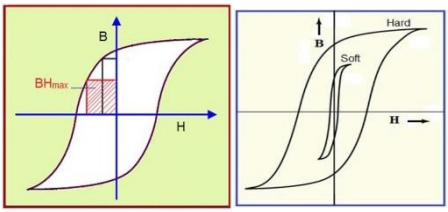
3. Ferromagnetik
   Sifat yang terakhir dan yang paling banyak digunakan adalah material yang bersifat ferromagnetik, dimana material ini memiliki kekuatan magnet yang kuat dan memiliki arah yang searah dengan medan magnet material magnet lainnya sehingga terjadi tarik-menarik dengan magnet disekitarnya dengan kekuatan tarik-menarik yang kuat. Material dengan sifat ferromagnetic biasanya banyak yang dijadikan sebagai bahan dasar dari permanen magnet.

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

Medan magnet (H) adalah daerah disekitar magnet yang masih dipengaruhi gaya magnet dan digambarkan dengan garis-garis gaya magnet yang menyebar dari kutub-kutub magnet. Garis-garis gaya magnet ini selalu keluar dari kutub utara menuju kutub selatan dan garis-garis gaya magnet tidak pernah saling berpotongan dengan garis-garis gaya magnet yang lain yang berasal dari magnet yang sama sehingga dapat diketahui apabila medan magnet terkuat terdapat pada kutub-kutub

magnet. Suatu medan magnet (H) dapat dihasilkan oleh arus listrik atau kutub magnet. Jika medan magnet dihasilkan oleh arus listrik, maka garis-garis medan magnet kontinu dan membentuk loop tertutup. Namun jika medan magnet dihasilkan dari kutub magnet, maka garis-garis medan magnet keluar dari kutub utara menuju kutub selatan. Misal suatu sampel yang ter*magnetitation* oleh medan yang diaplikasikan dari kiri ke kanan dan kemudian medan tersebut dihilangkan, maka kutub utara akan terbentuk di ujung sebelah kanan dan kutub selatan terbentuk disebalah kiri. Kuat medan H yang menyebabkan bahan magnetik mencapai saturasi adalah $M_{sat}$. Pada kondisi saturasi ini seluruh momen magnetik telah disearahkan sesuai dengan arah medan magnet pengimbas. Jika medan pengimbas tersebut kemudian diperkecil atau sampai dihilangkan, masih terdapat medan sisa pada bahan magnetic yang disebut dengan *remenence*. *Remanence* adalah medan magnet yang tersisa setelah dihilangkannya medan magnet pengimbas.

Histerisis menggambarkan proses *magnetitation* reversal pada bahan magnetik dari kondisi awal yang tidak ter*magnetitation* kemudian diinduksi oleh medan magnetik luar sehingga membentuk kurva histerisis. Tipikal kurva histerisis untuk *soft* ferromagnetik dan *hard* ferromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.6.




**(a)** **(b)**

Gambar 2.6 (a) Tipikal kurva histerisis *soft* dan *hard* ferromagnetik & (b) *Energy product* ($BH_{max}$)

Karakteristik yang membedakan bahan *softmagnetik* dengan bahan *hardmagnetic* adalah *energy product* ($BH_{max}$) yang bisa dihasilkan. *Energy product* ($BH_{max}$) merupakan luasan persegi terbesar yang dapat dibentuk pada quadran kedua.

Bahan *hardmagnetic* merupakan bahan yang memiliki kurva histerisis yang besar dan lebar seperti yang ditujukkan pada Gambar 2.8 (b). Bahan *hardmagnetic* adalah sebutan untuk bahan yang susah di-*magnetitation* dan juga susah untuk didemagnetisasi yang membuat bahan ini sangat cocok untuk dijadikan bahan dari magnet permanen. Bahan *harmagnetic* dibagi menjadi dua, yaitu magnet konvensional dan magnet tanah jarang. Magnet konvensional memiliki nilai maksimum *energy product* ($BH_{max}$) berkisar antara 2-80 kJ/m$^3$, seperti baja, paduan *Cunife* (Cu-Ni-Fe), paduan *Alnico* (Al-Ni-Co). Bahan *hardmagnetic* yang memiliki energi tinggi seperti $Nd_2Fe_{14}B$, $SmCo_5$ memiliki nilai $BH_{max}$ lebih besar dari 80 kJ/m$^3$ masuk dalam *rare earth magnet*. Bahan *hardmagnetic* biasanya banyak diapalikasikan pada motor, speaker, bor, dsb, dikarenakan semakin besar $BH_{max}$ maka bahan magnet tersebut akan sangat susah untuk didemagnitisasi.

### 2.3.1 Demagnetisasi

Demagnetisasi merupakan suatu peristiwa dimana suatu magnet kehilangan sifat kemagnetannya. Terdapat beberapa penyebab terjadinya demagnetisasi, yaitu elektromagnet secara AC dan temperatur pengoperasian. Temperatur dapat mengakibatkan efek de*magnetitation*, dikarenakan dengan meningkatnya temperatur menyebabkan atom-atom yang terdapat pada logam atau magnet bergetar sebanding dengan kenaikan temperatur. Sehingga *magnetic moment* memiliki orientasi yang acak. Semakin tinggi temperatur operasionalnya maka getaran atom-atomnya pun semakin meningkat.

*Magnetitation* sebuah material mencapai batas maksimalnya pada temperatur 0 K (-273$^{o}$C), karena pergerakan atom paling minimal. Terdapat sebutan temperatur Curie, yaitu temperatur maksimal dimana *magnetitation* suatu material bernilai nol. Besar temperatur Curie setiap material berbeda-beda. Pada Tabel 2.1 ditunjukkan temperatur Curie pada magnet permanen. [11]

Tabel 2.1 Temperatur Curie pada magnet permanen

| Material | Temperature Curie ($^{o}$C) |
|---|---|
| Alnico | 850 |
| SmCo | 720 |
| Ferrite | 450 |
| NdFeB | 310 |

### 2.3.2 Neodymium Magnet (NdFeB)

Magnet *neodymium* merupakan magnet permanen yang paling kuat. Magnet *neodymium* (juga dikenal sebagai NdFeB, NIB, atau magnet Neo), merupakan sejenis *rare earth magnet*, terbuat dari campuran logam *neodymium*. Dikembangkan pada tahun 1982 oleh *Sumitomo Special Metals*, mereka mengumumkan telah membuat magnet $Nd_{15}Fe_{77}B_8$ dengan *energy product* sebesar 290 kJ/m$^3$. Ditahun yang sama, *General Motor* di America Serikat juga telah menyelesaikan riset mereka mengenai magnet *neodymium* yang dibuat dengan teknik yang sedikit berbeda dan menghasilkan magnet *neodymium* dengan *energy product* sebesar 420 kJ/m$^3$. Magnet *neodymium* tersebut memegang rekor magnet permanen terkuat yang ada dan menggantikan peran magnet permanen SmCo karena harga dari magnet *neodymium* yang lebih murah daripada magnet permanen SmCo [11].

Magnet *neodymium* ini diklasifikasikan berdasarkan maksimum *energy product* yang dimiliki. Semakin besar

*energy product* yang dimiliki suatu magnet permanen mengindikasikan semakin kuat magnet tersebut. Berikut merupakan urutan klasifikasi dari magnet *neodymium* [6].

1. N35-N52
2. 33M-48M
3. 30H-45H
4. 30SH-42SH
5. 30UH-35UH
6. 28EH-35EH

Dimana angka yang tertera merupakan besarnya *energy product* yang bisa dihasilkan, sedangkan huruf yang mengikuti dibelakangnya merupakan maksimum temperatur operasinya (*Curie temperature*). Tingkatan dari maksimum temperatur operansinya mulai dari M (dapat digunakan hingga 100$^{o}$C) sampai EH (dapat digunakan hingga 200$^{o}$C).

Terdapat beberapa *properties* utama yang digunakan untuk membandingkan antara magnet *neodymium* dengan magnet permanen lainnya seperti yang tertera pada Tabel 2.3. Pada Tabel 2.3 terdapat beberapa *properties* utama dari beberapa jenis magnet permanen, [11] yaitu:

- *Remenence*

  *Remenance* digunakan untuk mengukur kekuatan medan magnet dari suatu material.
- *Coercivity*

  *Coercivity* merupakan ketahanan suatu material untuk kehilangkan sifat kemagnetannya (de*magnetitation*).
- *Energy product*

  *Energy product* merupakan rapat energi magnet dari suatu material.
- *Curie temperature*

  *Curie temperature* merupakan temperatur dimana

suatu material dapat kehilangan sifat kemagnetannya.

Tabel 2.2 *Properties* utama pada beberapa jenis magnet permanen

| Permanent Magnet | Remenence (T) | Coercivity (kA/m) | Maximum energy product (kJ/m$^3$) | Currie Tempera ture (ºC) |
|---|---|---|---|---|
| Ferrite | 0,23-0,39 | 150-250 | 8-28 | 450 |
| Alnico | 0,7-1,2 | 40-120 | 20-71 | 850 |
| NdFeB | 1,1-1,4 | 800-1100 | 235-430 | 310 |
| SmCO | 0,85-1,1 | 630-800 | 140-250 | 720 |

Berdasarkan Tabel 2.2 dapat dilihat bahwa magnet *neodymium* (NdFeB) lebih baik daripada jenis magnet permanen lainnya dalam beberapa aspek *properties* yang dimiliki. Sehingga magnet *neodymium* banyak digunakan pada alat yang membutuhkan magnet permanen, seperti motor, speaker, bor, dsb. Meskipun *currie temperature* dari magnet *neodymium* lebih rendah daripada SmCo atau Alnico namun *remanence*, *coercivity*, dan *energy product* lebih unggul daripada jenis magnet permanen lainnya dan juga harganya yang lebih murah.

Gambar 2.7 Magnet *neodymium*

Magnet *neodymium* cenderung rentan terhadap korosi. Secara khusus, korosi sekecil apapun dapat menyebabkan kerusakan magnet. Masalah ini dibahas dalam banyak produk

komersial dengan menyediakan lapisan pelindung. Pelapisan nikel atau dua pelapisan tembaga berlapis nikel digunakan sebagai metode standar, meskipun pelapisan dengan logam lainnya atau polimer dan lapisan pelindung pernis juga digunakan.

## 2.4 Daya Hilang pada *Ball Bearing*

Gesekan pada *bearing* sangat dipengaruhi, antara lain (misalnya histerisis, slip), oleh koefisien gesek antara bagian yang berkontak pada *bearing*. Data pada tabel 2.3 berikut berdasarkan akumulasi data pengujian bertahun-tahun, daftar koefisien gesek rata-rata (μ) untuk beberapa jenis *bearing* diukur pada permukaan poros.

Tabel 2.3 Koefisien gesek rata-rata

| Jenis *bearing* | *Starting* | | *Running* | |
|---|---|---|---|---|
| | Radial | *Thrust* | Radial | *Thrust* |
| *Ball Bearing* | 0,0025 | 0,0060 | 0,0015 | 0,0040 |
| *Spherical roller bearing* | 0,0030 | 0,120 | 0,0018 | 0,0080 |
| *Cylindrical roller bearing* | 0,0020 | - | 0,0011 | - |

Sebenarnya, kontribusi terbesar terhadap gesekan *bearing* dibuat oleh *seals* yang dapat menghasilkan gesekan beberapa kali daripada torsi *bearing*-nya. Jika perancang merasa bahwa gesekan *bearing* total (termasuk gesekan *seals*) merupakan faktor signifikan yang memengaruhi desainnya, maka konsultasi dengan pabrikan menjadi perlu.

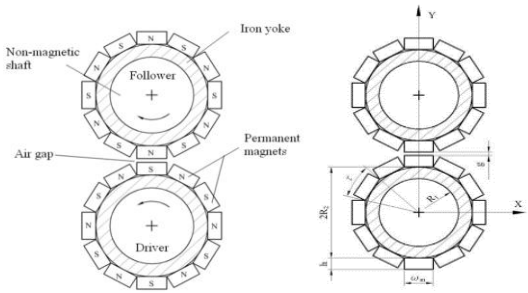
Meski tidak signifikan dalam banyak alasan, daya yang hilang karena adalah sebagai berikut ini:

$$hp = \frac{\mu F_r dn}{126050} \quad (2.16)$$

dimana
hp = daya (hp)
$\mu$ = koefisien gesek
n = kecepatan rotasi (rpm)
$F_r$ = beban radial (lb)
d = *bearing bore* (in)

## 2.5 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yi-Chang Wu dan Chih-Wen Wang pada tahun 2015 dengan judul "*Transmitted Torque Analysis of a Magnetic Gear Mechanism with Rectangular Magnets*" diperoleh pengaruh jumlah pasangan kutub magnet permanen, jarak *air gap*, dan *remanence* magnet permanen terhadap torsi maksimum yang dapat disalurkan dengan menggunakan magnet permanen berbentuk persegi panjang. Digunakan model 2D untuk pemodelan *magnetic gear* dan penggunaan *finite element method* untuk perhitungan torsi maksimum yang dapat disalurkan serta untuk melakukan validasi terhadap model analisisnya. Simulasi menggunakan *software* Ansoft/Maxwell untuk analisa medan magnet dan torsi maksimum yang dapat disalurkan. *Magnetic spur gear* dimodelkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 dengan dimensi dan spesifikasi permanen magnet yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.4. Variasi jumlah pasang kutub magnet yang digunakan yaitu 5 sampai dengan 10 pasang kutub magnet.



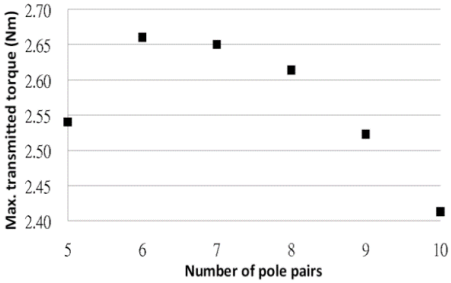

(a) (b)

Gambar 2.8 (a). *External magnetic gear* dengan magnet berbentuk persegi panjang (b). Geometri *external magnetic gear*

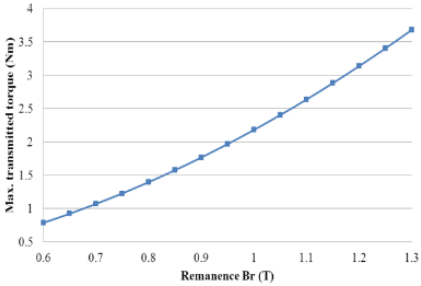
Tabel 2.4 Spesifikasi magnet dan dimensi *external magnetic gear*

| NdFeB (N-35) Magnet | | |
|---|---|---|
| *Items* | *Symbol* | *Values* |
| *Remenence* | Br | 1,15 |
| *Relative permeability* | $\mu_r$ | 1,09 |
| *Magnet width (mm)* | $w_m$ | 10,70 |
| *Magnet height (mm)* | h | 5,00 |
| *Axial length (mm)* | L | 40,00 |
| *Number of pole pairs* | n | 6 |
| *Geometric dimensions of the gear set* | | |
| *Items* | *Symbol* | *Values* |
| *Inner radius of the iron yoke* (mm) | R1 | 15,00 |
| *Outer radius of the iron yoke* (mm) | R2 | 20,00 |
| *Air gap length* (mm) | g | 1,50 |
| *Length of pole pitch* (mm) | $\tau$ | 11,78 |
| *Ratio of pole width to pole* pitch | $\alpha_e$ | 0,91 |

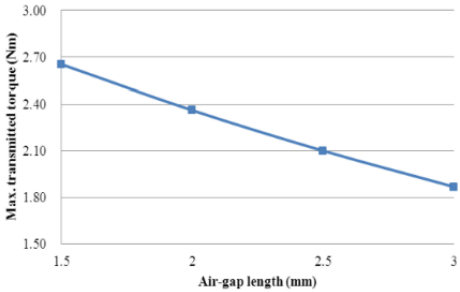
Setelah dilakukan analisa dan simulasi pada permodelan seperti diatas, didapatkan hasil berupa torsi maksimum yang dapat disalurkan naik seiring dengan bertambahnya jumlah dari pasangan kutub magnet permanen. Torsi maksimum terbesar yang dapat disalurkan terjadi pada saat jumlah pasang kutub magnet berjumlah 6 sebesar 2,66 (hasil perhitungan analitis) dan sebesar 2,87 (hasil FEA) setelah itu terjadi penurunan secara kontinu hingga pasang kutub magnet berjumlah 10. Untuk hubungan antara jarak *air gap* terhadap torsi maksimum yaitu menurun seiring bertambahnya jarak *air gap*, sedangkan hubungan antara *remanence* terhadap torsi maksimum yaitu naik seiring makin besarnya nilai dari *remanence* magnet permanen yang digunakan.




(a.)



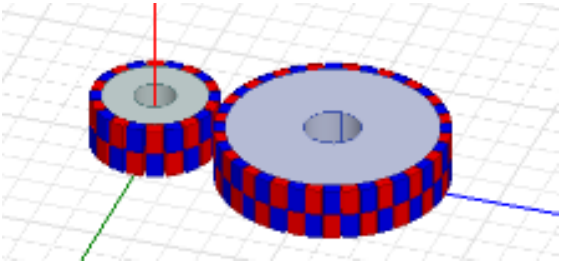

(b.)




(c).

Gambar 2.9 (a.) Hubungan antara torsi dengan jumlah pasangan magnet permanen (b.) Hubungan antara torsi dengan *remanence* magnet permanen (c.) Hubungan antara torsi dengan jarak *air gap*.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Akbar Robbi C pada tahun 2018 dengan judul "Pengaruh Jumlah Magnet Permanen dan *Air Gap* terhadap Torsi Maksimum *Axial External Magnetic Spur Gear*" diperoleh pengaruh jumlah magnet permanen yang digunakan terhadap torsi yang dihasilkan serta pengaruh dari jarak *air gap* terhadap torsi yang dihasilkan. Digunakan model 3D untuk pemodelan *axial magnetic spur gear* dan penggunaan *finite element method* untuk perhitungan torsi maksimumnya. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys Electronics Maxwell 3D untuk analisa torsi maksimum yang dapat disalurkan dan analisa medan magnetnya. Model dari *axial magnetic spur gear* digambarkan seperti pada gambar 2.10 dengan dimensi dari *gear set* serta dimensi dari magnet permanennya yang digunakan ditunjukkan pada tabel 2.5. Pada penelitian ini dilakukan variasi pada jumlah magnet serta *air gap* antara LS *gear* dan HS *gear* seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.6.



Gambar 2.10 Model axial magnetic spur gear

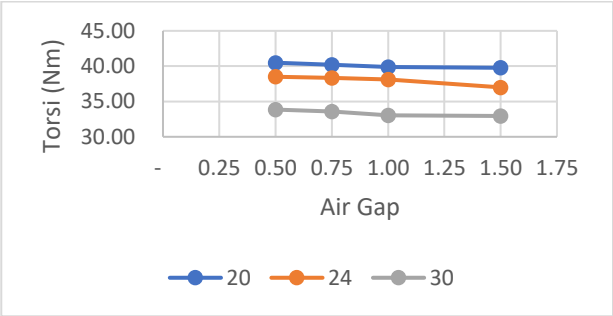
Tabel 2.5 Dimensi *gear set* dan magnet permanen yang digunakan

| NdFe35 Magnet | |
|---|---|
| | Values |
| Lebar (mm) | 5 |
| Tinggi (mm) | 3 |
| Panjang (mm) | 15 |
| Dimensi *Gear Set* | |
| | Values |
| Diameter luar HS *gear* (mm) | 30 |
| Diameter luar LS *gear* (mm) | 60 |
| Lebar tiap *gear* (mm) | 15 |

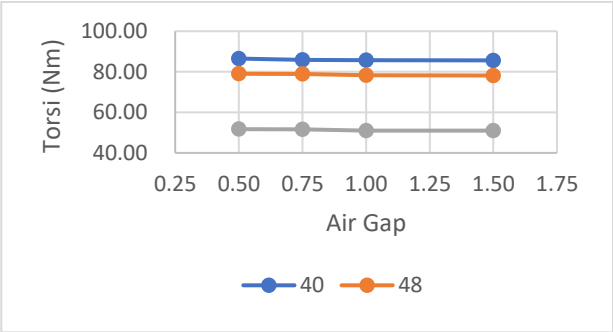
Tabel 2.6 Variasi pemodelan yang digunakan

| Jumlah pasangan magnet permanen | Jarak air gap |
|---|---|
| 20-40 | 0,50 mm |
| 24-48 | 0,75 mm |
| 30-60 | 1,00 mm |
| | 1,50 mm |

Setelah dilakukan analisa dan simulasi yang dilakukan dengan pemodelan dana variasi seperti diatas, didapat hasil yakni torsi maksimum yang dapat disalurkan pada HS rotor yang terjadi pada variasi *air gap* sebesar 0,5 mm untuk seluruh variasi jumlah pasangan magnet dan untuk torsi maksimum pada HS rotor dari keseluruhan variasinya terdapat pada variasi jumlah magnet HS rotor sebanyak 20 kutub dengan *air gap* 0,5 mm dengan torsi sebesar 40,49 Nm seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 (a.). Dan didapat pula hasil yakni torsi maksimum yang dapat disalurkan pada LS rotor yang terjadi pada variasi *air gap* sebesar 0,5 mm untuk seluruh variasi jumlah pasangan magnet dan untuk torsi maksimum pada LS rotor dari keseluruhan variasinya terdapat pada variasi jumlah magnet LS rotor sebanyak 40 kutub dengan *air gap* 0,5 mm dengan torsi sebesar 86,51 Nm seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.11 (b.). Dengan demikian, hubungan antara torsi yang dapat disalurkan dengan jumlah magnet yang digunakan adalah jika jumlah magnet permanen yang digunakan semakin banyak, maka torsi yang dapat disalurkan akan semakin menurun dan hubungan antara torsi yang dapat disalurkan dengan *air gap* antara HS rotor dan LS rotor adalah semakin besar *air gap*, maka torsi yang dapat disalurkan akan semakin kecil.




(a.)




(b.)

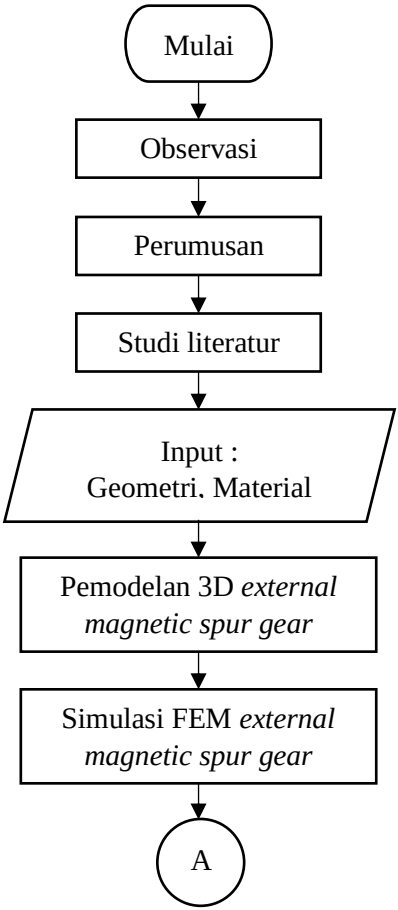
Gambar 2.11 (a.) Grafik perbandingan *air gap* vs torsi pada HS rotor (b.) Grafik perbandingan *air gap* vs torsi pada LS rotor

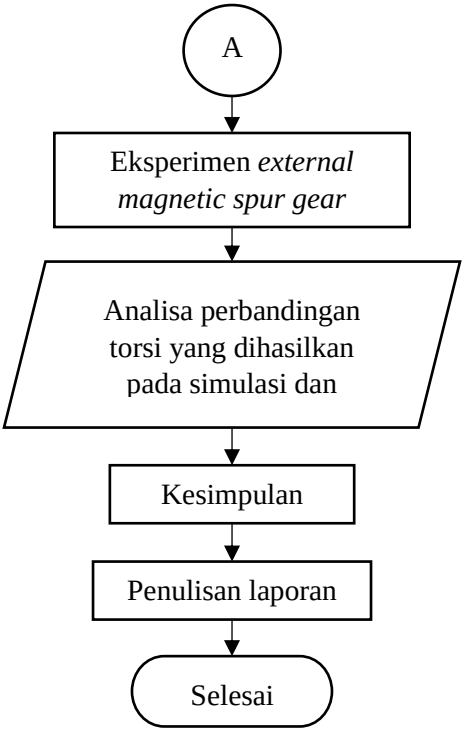
**(Halaman ini sengaja di kosongkan)**

# BAB III
# METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan oleh penulis. Pada bab ini akan dibahas tahapan-tahapan yang dilakukan oleh penulis secara rinci dan detail dalam melakukan penelitian ini.

## 3.1 Flowchart Penelitian






Gambar 3.1 *Flowchart* penelitian

### 3.1.1 Observasi

Observasi merupakan langkah pertama yang dilakukan penulis. Tujuan utama dari proses ini adalah untuk menentukan ruang lingkup permasalahan yang akan diteliti. Pada tahap ini observasi difokuskan pada lingkup *magnetic gear* yaitu *radial external magnetic spur gear*.

### 3.1.2 Perumusan Masalah

Setelah dilakukan observasi, langkah selanjutnya yang dilakukan adalah perumusan masalah. Dalam hal ini permasalahan yang dicoba untuk diteliti oleh penulis adalah perbandingan dari torsi yang dihasilkan dari simulasi FEM

menggunakan *software* Ansys Maxwell 3D dengan hasil dari eksperimen menggunakan model yang sama dengan simulasi FEM.

### 3.1.3 Studi Literatur

Dilakukan studi literatur untuk mendapatkan informasi secara lebih detail serta menunjang penelitian yang akan dilakukan. Informasi berupa dasar teori *magnetic gear*, keuntungan menggunakan *magnetic gear* dibandingkan dengan roda gigi mekanik, pencarian torsi pada *magnetic gear* maupun penelitian terdahulu yang dirangkum penulis berasal dari berbagai sumber.

### 3.1.4 Penentuan Data Awal

Data awal yang digunakan pada penelitian adalah besar rasio dari spur gear yakni 1:2 serta menentukan diameter dari *pinion* dan jumlah magnet dari pinion, yaitu berdiameter 3,5 cm pada pinion dan 6 *poles* pada pinion, sehingga dengan perhitungan rumus *gear* didapat geometri dari keseluruhan *gear*.

### 3.1.5 Desain 3D, Simulasi, dan Eksperimen

Perencanaan desain 3D menggunakan *software* SolidWork 2016 sehingga mempermudah dalam hal redesain

### 3.1.6 Analisa Hasil Data dan Kesimpulan

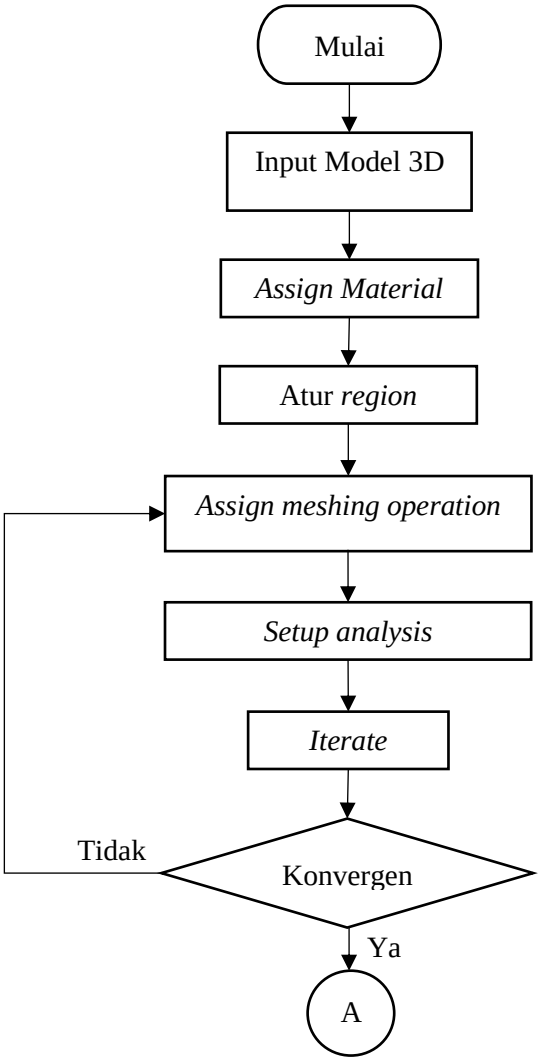
Setelah dilakukan desain dan simulasi akan didapatkan data berupa nilai torsi pada *radial external magnetic spur gear.* Analisa akan dilakukan pada hasil data tersebut serta akan didapatkan beberapa kesimpulan dari penelitian ini.

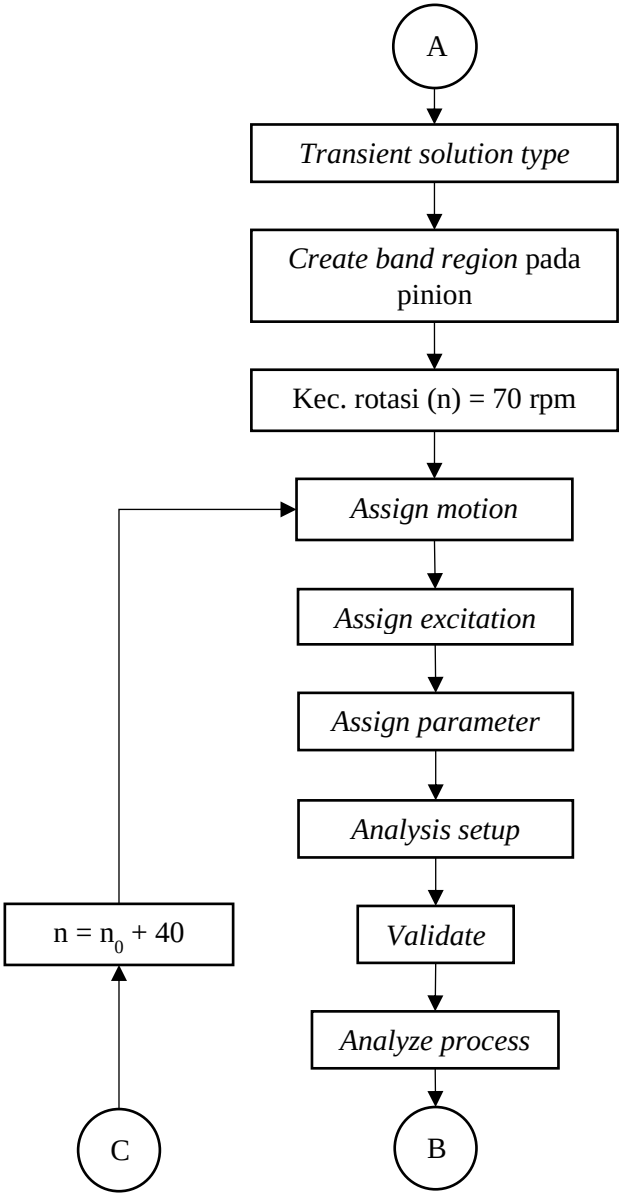
### 3.1.7 Penulisan Laporan

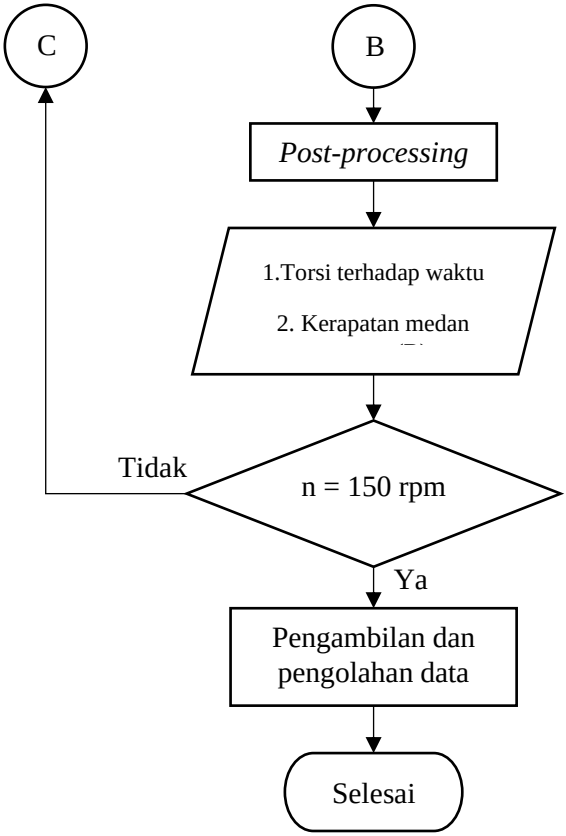
Tahap terakhir dari penelitian ini adalah penulisan laporan. Penulisan laporan ini dilakukan berdasarkan sistematika laporan yang ada.

## 3.2 Pemodelan dan Simulasi

### 3.2.1 *Flowchart* Simulasi




A
Transient solution type
Create band region pada pinion
Kec. rotasi (n) = 70 rpm
Assign motion
Assign excitation
Assign parameter
Analysis setup
Validate
Analyze process
B
C
n = n0 + 40




Gambar 3.2 *Flowchart* Simulasi

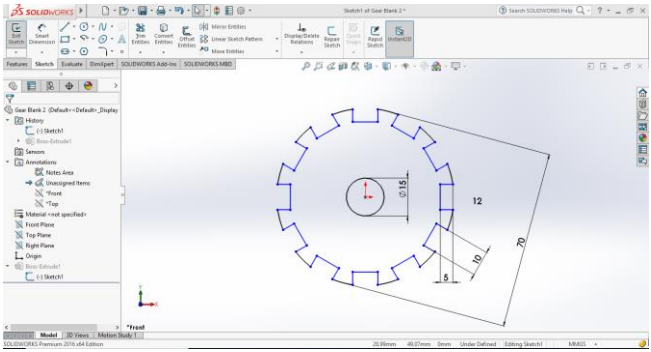
Gambar 3.2 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan simulasi penelitian ini. Simulasi menggunakan *software* Ansys Electronics v19.3.

### 3.2.2 Pemodelan 3D dengan *software* Solidworks

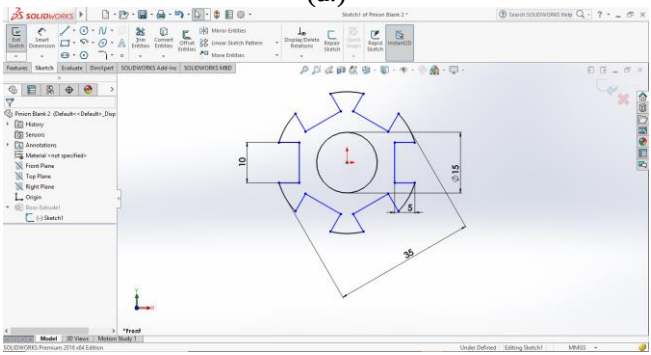
Perancangan model 3D *radial external magnetic spur gear* dilakukan menggunakan *software* SolidWorks 2016. Terdapat tiga buah bagian yang dibuat yaitu *high speed* (HS)

rotor atau pinion, *low speed* (LS) rotor atau gear, dan magnet permanen. Berikut penjelasan lebih detail dari pemodelan 3D:

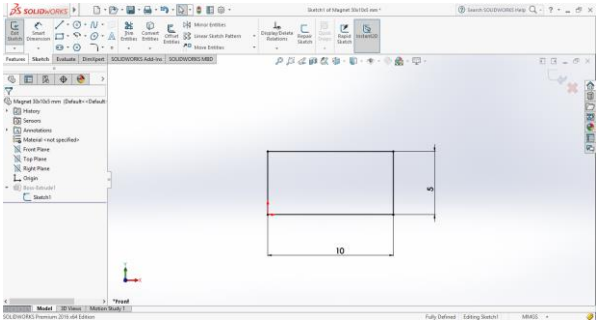
a. Membuat *sketch* yang nantinya akan diproses agar menjadi 3 dimensi. Dilakukan pembuatan *sketch* untuk 3 *part* yaitu HS rotor berbentuk lingkaran dengan celah persegi panjang sebanyak 6 celah untuk magnet, LS rotor berbentuk lingkaran dengan celah persegi panjang juga sebanyak 12 celah untuk magnet, dan magnet permanen berbentuk persegi panjang seperti pada Gambar 3.3




(a.)



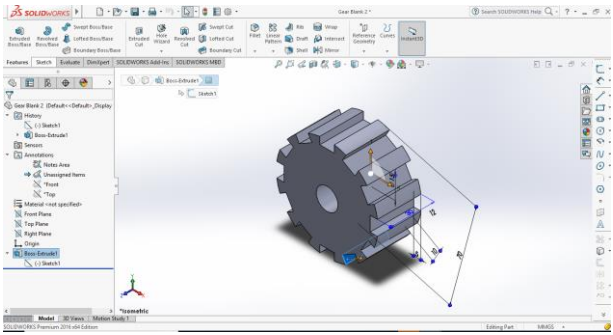

(b.)



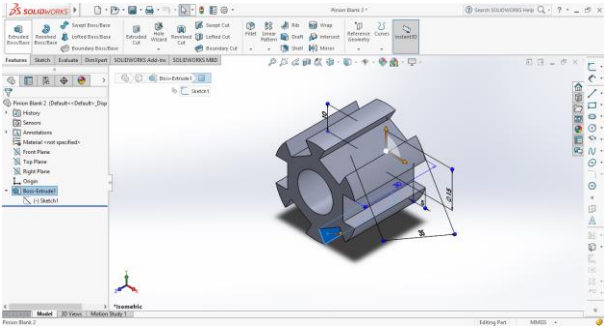

(c.)

Gambar 3.3 (a) Sketch LS rotor (b) Sketch HS rotor (c) Sketch magnet permanen

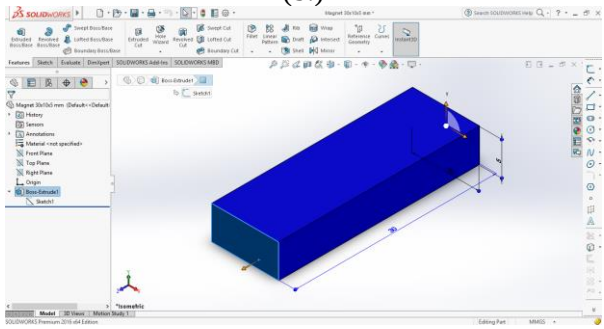
b. *Sketch* yang telah dibuat kemudian diproses dengan *extrude* agar menjadi 3 dimensi. Ketiga *part* tersebut dilakukan *extrude* dengan ukuran yang sama, sehingga HS rotor membentuk tabung, LS rotor juga membentuk tabung, dan manget permanen membentuk balok seperti pada Gambar 2.



(a.)



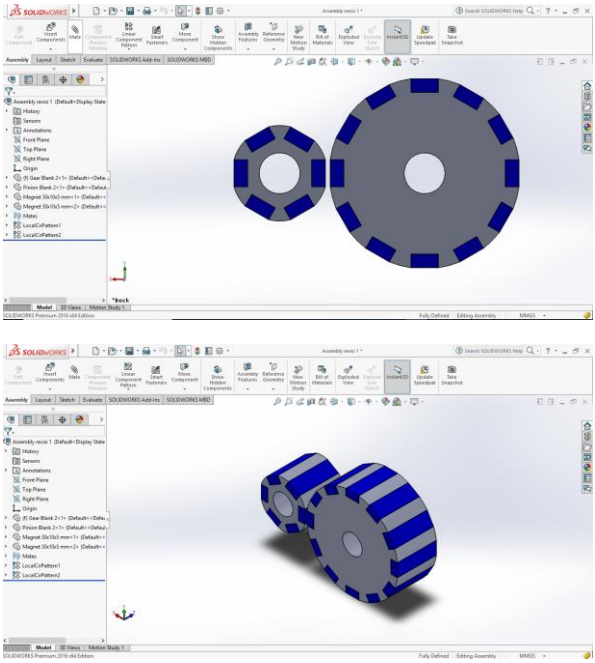
(b.)



(c.)

Gambar 3.4 (a) Model 3D LS rotor (b) Model 3D HS rotor (c) Model 3D magnet permanen.

Bagian-bagian yang telah dibuat sebelumnya kemudian digabungkan pada *software* Solidworks dengan membuka mode *assembly part*. Pada proses *assembly* dilakukan pula penganturan variasi *air gap* antara LS dan HS, yakni sebesar 1,5 mm; 2 mm; 2,5 mm, sehingga akan terlihat seperti pada gambar 3.5.



Gambar 3.5 Hasil *assembly part-part* yang telah dibuat sebelumnya

### 3.2.3 Simulasi

Setelah membuat model 3D dari *radial external magnetic spur gear* tersebut, dilakukan simulasi menggunakan metode analisis FEM dengan menggunakan *software* Ansys Maxwell Electromagnetic v19.3 dengan penyelesaian analisa *magnetostatic* dan analisa *transient*. Pada tahap analisa *magnetostatic* dilakukan pengaturan *meshing* pada *software* dan pada analisa *transient* dilakukan proses perhitungan *finite element* yang dilakukan *software*. Pemodelan 3D pada tahap sebelumnya dilanjutkan dengan mengatur nilai *mesh* pada metode analisis *magnetostatic*

dimana panjang *mesh* tersebut harus konvergen. Lalu dilakukan beberapa pengaturan lainnya pada metode analisis *transient*s sebelum dilakukan simulasi analisis 3D *finite element*. Hasil yang diinginkan yaitu kerapatan medan magnet (B) dan torsi yang dihasilkan tiap pasangan gear magnet.

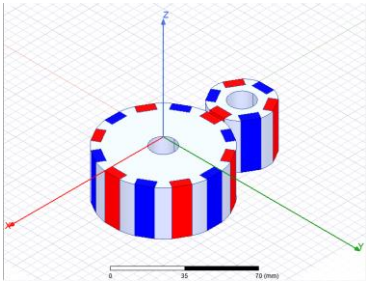
Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisa pada *magnetostatic* adalah sebagai berikut :

a. *Insert Maxwell 3D Design*

Membuka *software* Ansys Maxwell Electromagnetic v19.3 dan memilih *project* Maxwell 3D Design.

b. *Input Modeler*

*Input* model 3D dari *radial external magnetic spur gear* yang telah di-*assembly* pada *software* Solidworks.

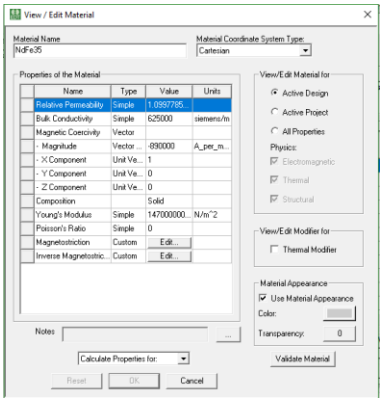



Gambar 3.6 Hasil input model 3D radial external magnetic spur gear

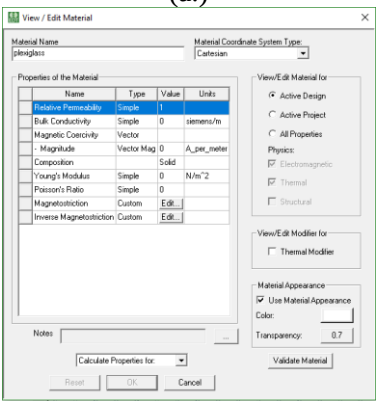
c. *Assign Material*

Setelah melakukan *input* model 3D dari *radial external magnetic spur gear* tersebut ke dalam *project*, dilakukan *assign material* dari tiap komponen yang ada pada *gear* untuk memberikan material pada model. Material yang digunakan

berasal dari *library* Ansys Electromagnetic v19.3. Material HS dan LS rotor adalah *plexiglass*, sedangkan material magnet permamen menggunakan NdFe35. Untuk *properties* dari tiap material tersebut ditunjukan pada gambar 3.7.




(a.)




(b.)

Gambar 3.7 Proses *assign material properties* dari model pada *software* (a.) material magnet

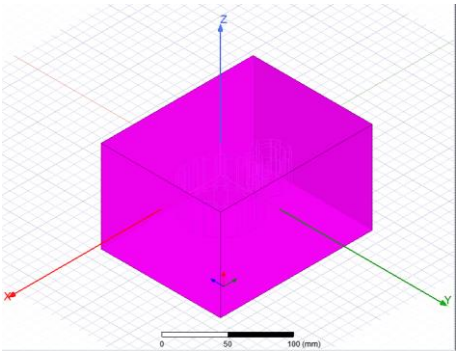
NdFe35 (b.) material *gear blank* PLA

Tabel 3.1 Beberapa *properties* dari material yang ada pada model

| *Properties* NdFeb N35 | Nilai |
|---|---|
| *Remanence* (T) | 1,15 |
| *Relative permeability* | 1,09977 |
| *Mass Density* (kg/m$^3$) | 7400 |
| *Currie Temperature* (ºC) | 310 |
| *Properties* PLA | Nilai |
| *Density* (g/cm$^3$) | 1,3 |
| Temperatur leleh (ºC) | 173 |
| *Tensile Strenght* (MPa) | 37 |
| Elongasi | 6% |
| *Flextural Modulus* (GPa) | 4 |

d. Atur *region*

*Region* adalah daerah batas dari ruang operasi disekitar *radial external magnetic spur gear* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. *Region* dibuat dengan cara membuat membuat model 3D yang berbentuk balok bervolume udara diluar komponen *magnetic spur gear* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.8 berikut.



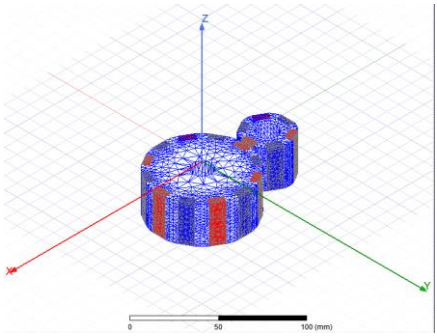

Gambar 3.8 Hasil pembuatan *region* pada *magnetic gear*

e. *Assign Boundary* dan *Excitation*

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

f. *Assign Mesh Operation*

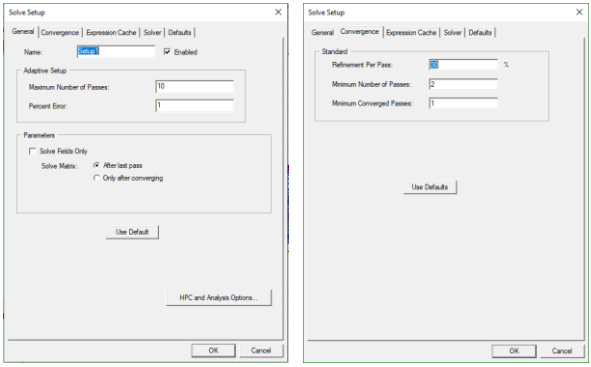
Kemudian dilakukan pengaturan *mesh* pada komponen-komponen dari setiap model 3D. Bentuk *meshing* yang digunakan pada *software* ini adalah tipe tetrahedral. Untuk metode *mesh* yang digunakan adalah *mesh inside selection, length based.*




Gambar 3.9 Hasil pembuatan *mesh* pada objek

g. *Setup Analysis*

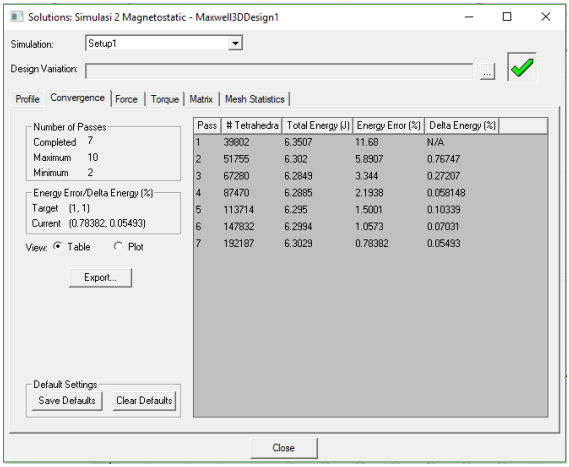
Merupakan langkah pengaturan untuk mendapatkan proses iterasi *mesh* yang mencapai konvergen. Dengan menggunakan metode *adaptive passes* pada *software* sebanyak 10 dengan persentase *error* sebesar 1% seperti pada Gambar 3.10.




Gambar 3.10 Pengaturan *solve setup*

h. *Iterate*

Langkah terakhir adalah *iterate*, yakni proses perhitungan yang dilakukan *software* untuk mengetahui apakah panjang *mesh* yang ditentukan telah mencapai kriteria konvergen. Jika hasil analisa tidak mencapai kriteria untuk dianggap konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada *meshing* yang telah dibuat. Gambar 3.11 merupakan hasil *meshing* yang telah konvergen sebab telah memenuhi kriteria untuk konvergen.



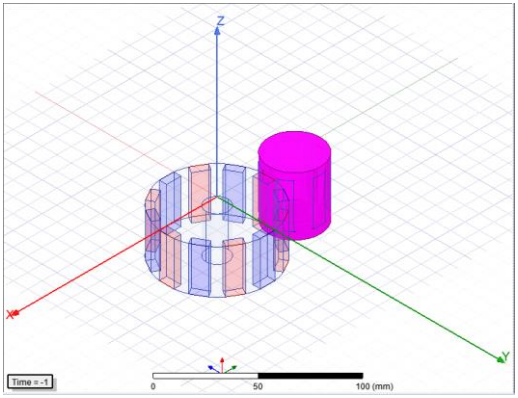

Gambar 3.11 Hasil analisis *mesh* yang telah dibuat

Setelah melakukan analisa *magnetostatic* dan didapat hasil yang konvergen, maka langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi dengan analisa *transient*. Untuk masuk ke analisa *transient*, atur *sub menu* Solution Type pada *menu* Maxwell 3D lalu pilih metode *transient*.

Adapun langkah-langkah dalam melakukan analisa pada metode *transient* adalah sebagai berikut:

a. *Create Band Region*

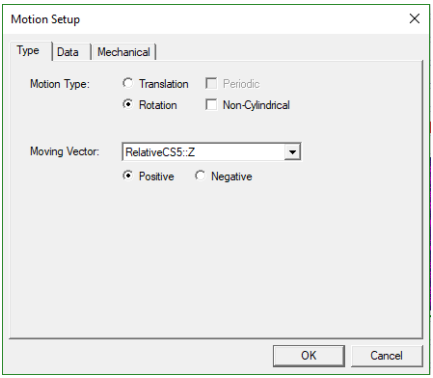
Merupakan langkah untuk membuat *region* berbentuk tabung bervolume vakum yang menyelubungi HS yang merupakan bagian *input* putaran seperti pada gambar 3.12. *Region* ini nantinya akan digunakan untuk *setting motion*.



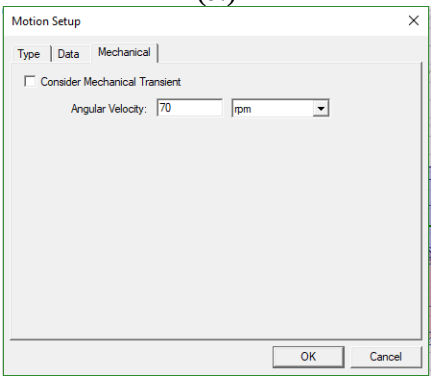

Gambar 3.12 Hasil pembuatan *region band* pada HS

b. *Assign Motion*

Selajutnya menentukan *part* yang dianggap sebagai *driving part* dengan cara memberikan *motion* pada part tersebut. *Driving part* yang ditentukan adalah HS rotor yang diberi *input* putaran sebesar 70 rpm hingga 150 rpm setiap kenaikan 40 rpm seperti pada gambar 3.13.




(a.)




(b.)

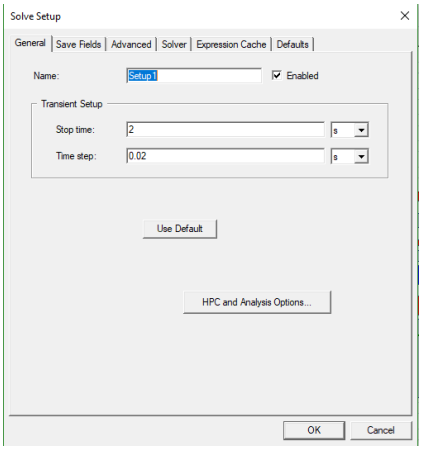
Gambar 3.13 *Motion setup* pada *region band* (a.) tipe *motion* rotasi dengan sumbu putar pada sumbu pusat *region band* (b.) kecepatan putar 100 rpm untuk data pertama

c. *Assign Parameter*

Langkah ini merupakan langkah untuk menentukan parameter yang nanti akan dihasilkan dan ditampilkan oleh *software*. Parameter yang diinginkan adalah torsi.

d. *Analysis Setup*

Langkah berikutnya adalah pengaturan analisis yang dilakukan *software*. Pengaturan ini berfungsi untuk mengatur lama pengambilan data dan *timeframe* pengambilan data. Lama pengambilan data 2 detik dan pengambilan data setiap 0,02 detik seperti pada Gambar 3.14.

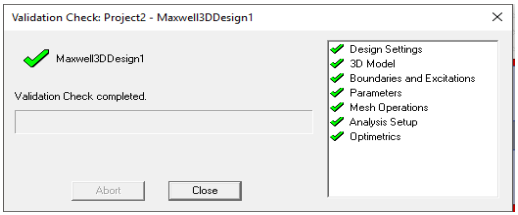



Gambar 3.14 Pengaturan *setup* pengambilan data

e. *Validate*

Selanjutnya adalah *validation check*, yakni proses validasi apakah *project model* sudah siap untuk dilakukan analisa. Untuk melakukan proses validasi adalah dengan memilih *Validate* pada *toolbar simulation*. Jika seluruh kriteria pada *Validate* telah terpenuhi seperti pada gambar 3.15,

maka dapat langsung menuju tahap analisa keseluruhan.



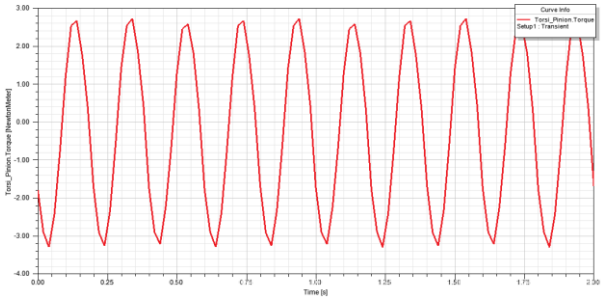

Gambar 3.15 Validation check

f. *Analyze Process*

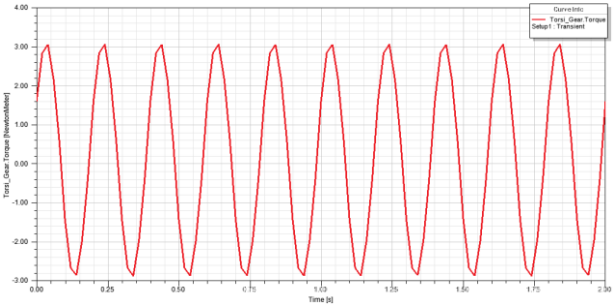
Setelah semua tervalidasi pada *validation check*, maka selanjutnya dilakukan analisa dari *project* dengan cara memilih ikon *Analyze All* pada *toolbar simulation*.

### 3.2.4 Post-processing

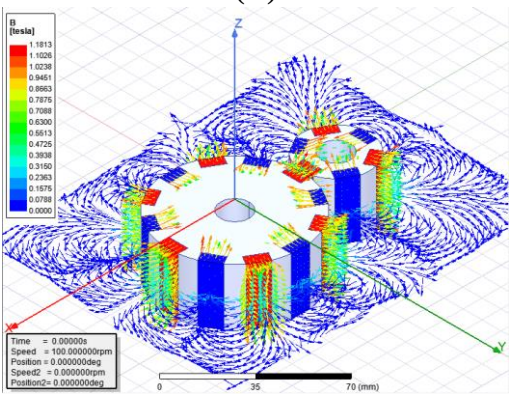
Tahap post-*processing* merupakan tahap pengambilan hasil simulasi. Setelah proses simulasi dan analisis 3D *finite element* selesai, kita akan mendapatkan data mengenai kerapatan medan magnet (B) dan torsi yang dihasilkan *radial external magnetic spur gear* seperti pada Gambar 3.16.




(a.)




(b.)




(c.)

Gambar 3.16 (a.) Grafik torsi terhadap waktu pada HS (b.) grafik torsi terhadap waktu pada LS (c.) Arah vector dan besar nilai dari *flux density*

## 3.3 Proses Eksperimen

### 3.3.1 Peralatan Eksperimen

Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian eksperimen yang saya lakukan adalah sebagai berikut :

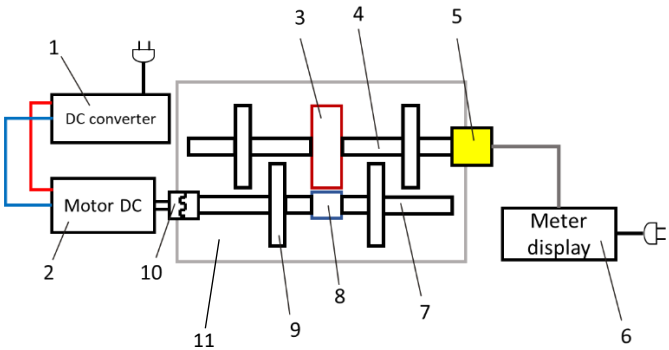
1. *Radial external magnetic spur gear*
   - Bagian *gear blank* dibuat dari 3D *printing* dan untuk magnet menggunakan jenis

neodymium N35 ukuran 30 × 10 × 5 mm, yang keduanya digabung dengan menggunakan lem super.

2. Motor DC
   - Merek motor : Toshiba DC Motor
   - Putaran maks : 300 rpm
   - Tegangan maks : 24 V DC
   - Torsi : 70 kg.cm
3. *Tachometer* yang berfungsi untuk mengukur kecepatan putaran pada HS dan LS *radial external magnetic spur gear*.
4. *Torquemeter* untuk mengukur besar dari torsi *input* dan torsi *output* pada HS dan LS *radial external magnetic spur gear* dengan spesifikasi sebagai berikut :
   - *Type* : TQ503-160
   - *Torque range* : 0 – 160 Nm
   - *Connection type* : *Square connection*
   - *Electrical output* : 2 mV/V
   - *Bridge Resistance* : 350 Ω
   - *Rated Speed Range* : 0 - 3000 rpm
   - *Accuracy* : ± 0.2% FS
5. Jangka sorong yang berfungsi untuk mengatur jarak antara poros *input* dan poros *output.*
6. Bantalan berupa *bearing* agar poros tidak mengalami fluktuasi saat berotasi. Tipe *bearing Deep groove ball bearings – Single row - sealed type* - 6004 ZZ
7. Poros aluminium
8. Konverter untuk mengubah arus AC ke DC dan mengatur tegangan yang masuk ke motor DC dengan besar arusnya 6 Ampere.

### 3.3.2 Instalasi Peralatan

Eksperimen ini dilakukan dengan memasang *radial external magnetic spur gear* pada poros *input* berupa *gear* HS dan poros *output* berupa *gear* LS yang kemudian dirotasikan pada kecepatan putar tertentu dan kemudian dihitung torsi pada poros *input* dan torsi poros *output* menggunakan tachometer. Skema instalasi ekperimen dapat dilihat pada gambar berikut ini




Gambar 3.17 Instalasi peralatan uji ekperimen *radial magnetic spur gear*

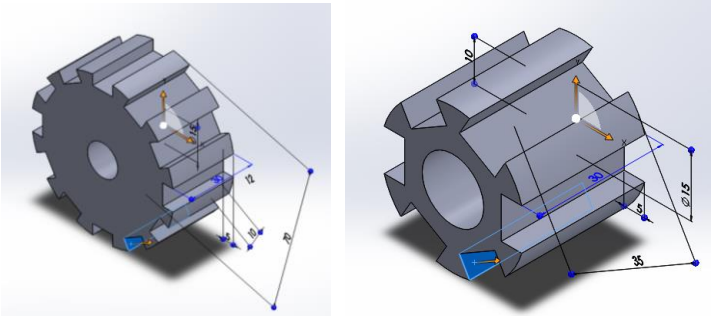
Keterangan :

1. Konverter
2. Motor DC
3. LS *radial magnetic spur gear*
4. Poros *output*
5. *Torquemeter*
6. *Meter display*
7. Poros *input*
8. HS *radial magnetic spur gear*
9. Bantalan *bearing*
10. *Coupling*
11. Plat alas

### 3.3.3 Langkah-langkah Eksperimen

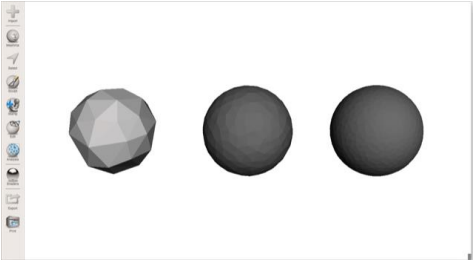
Dalam eksperimen ini terdapat prosedur yang dilakukan untuk pengambilan data, berikut ini merupakan langkah – langkah dalam melakukan eksperimen :

1. Tahap perancangan alat
   a. Model 3D dari *gear blank* dibuat sesuai dengan geometri yang digunakan pada proses uji simulasi.




Gambar 3.18 Model 3D dari *gear blank* yang akan digunakan

   b. Kemudian dilakukan proses 3D *printing* dari model tersebut dengan menggunakan material PLA (Polylactic Acid), pada proses 3D *printing* sendiri terdapat beberapa tahapan yang dilakukan, yakni :
      1. Tingkat resolusi pada model STL dipahami untuk menentukan *detail* dari model 3D yang akan diproses 3D *printing* dimana pada format *file* STL digunakan serangkaian segitiga untuk menciptakan permukaan model, semakin tinggi resolusi, makan segitiga yang digunakan semakin banyak.

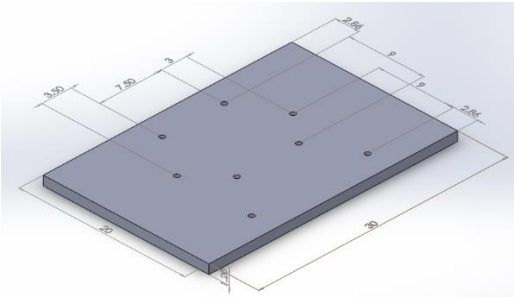


Gambar 3.19 Perbandingan resolusi pada sebuah model berbentuk bola

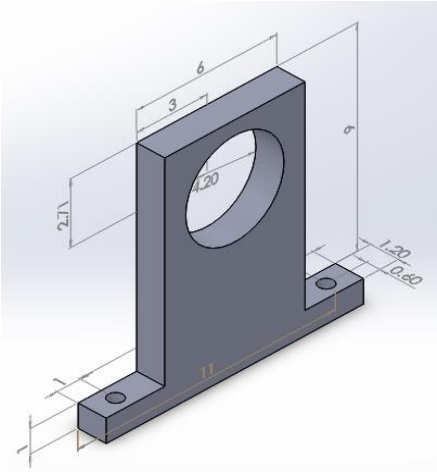
2. Kemudian dilakukan penentuan resolusi dari model STL yang digunakan.
3. *File* desain model 3D yang telah dibuat dikonversi dalam *file format* STL

c. Model 3D dari *gear blank* yang telah diproses 3D *printing* di-*assembly* dengan magnet permanen neodymiun N35 yang direkatkan dengan menggunakan lem.

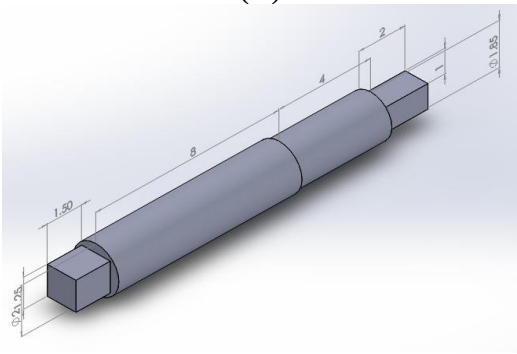
d. Setelah roda gigi magnet dibuat, dilakukan perancangan alat pengujian sesuai pada skema gambar 3.17 dengan geometri pada tiap bagian yakni sebagai berikut:



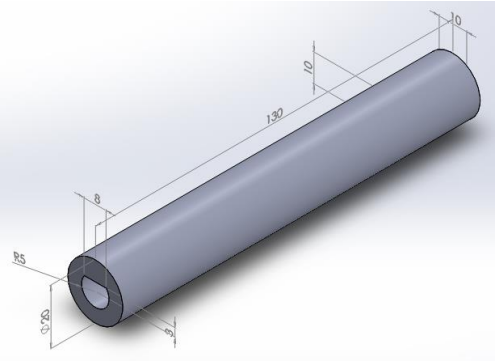

(a.)



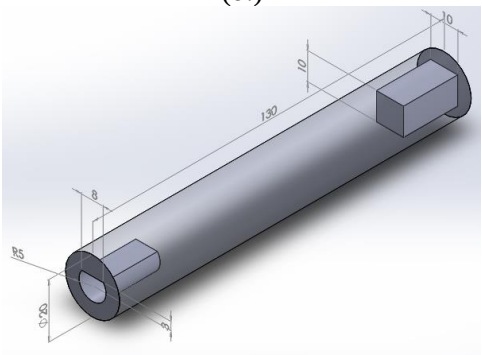

(b.)




(c.)




(d.)




(e.)

Gambar 3.20 desain rancangan bagian-bagian alat uji eksperimen (a.) plat alat (b.) tiang dudukan poros (c.) poros bagian 1 (d.) poros bagian 2 bagian luar (e.) poros bagian 2 tampak bagian dalam

dimana antara poros bagian 1 dengan poros bagian 2 nantinya akan disambungkan menjadi satu poros utuh untuk HS rotor dan LS rotor.

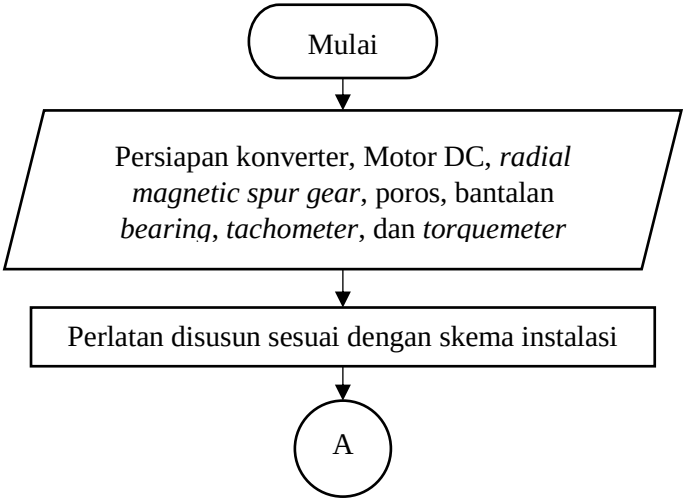
e. Model 3D dari peralatan uji kemudian dibuat dengan proses pembubutan dimana material yang digunakan

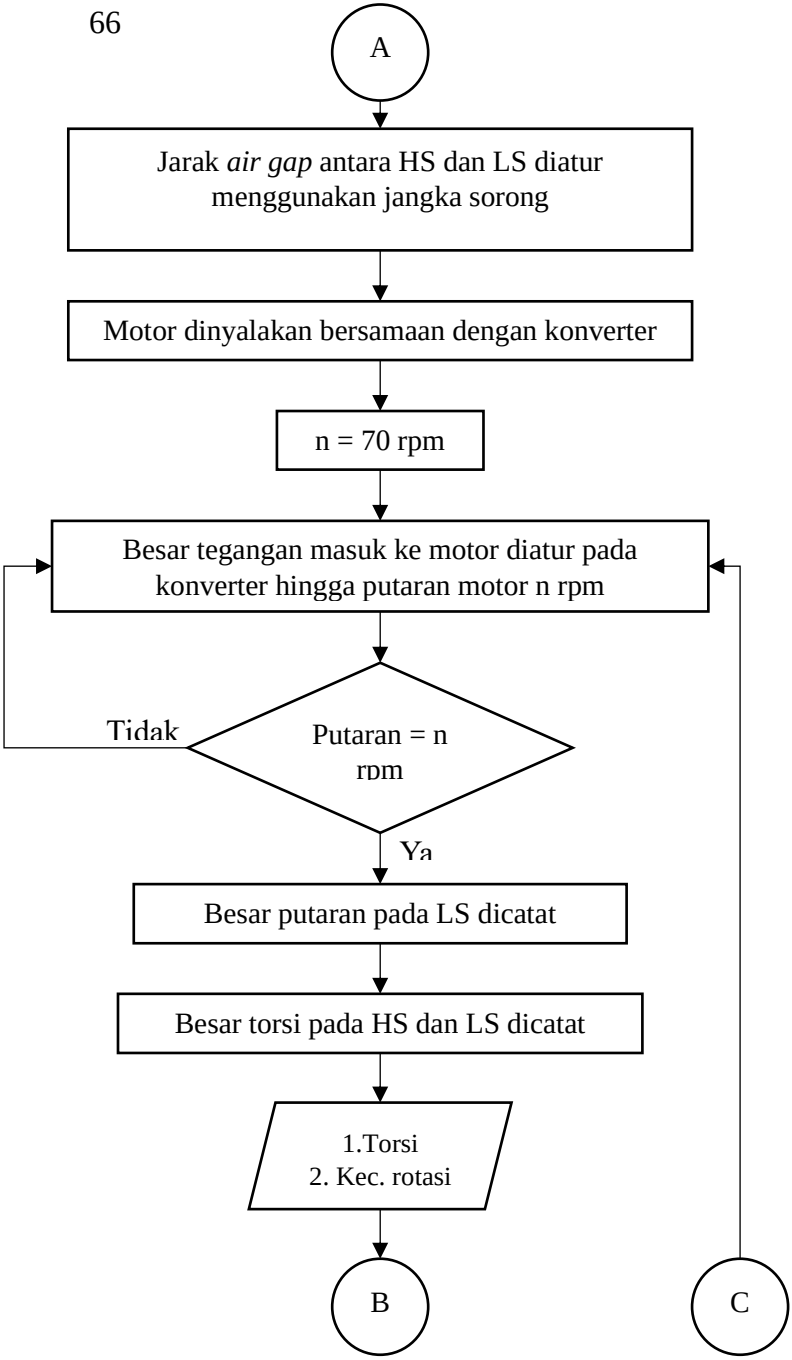
adalah material besi untuk tiang dudukan dan plat alas serta menggunakan material aluminium untuk porosnya.

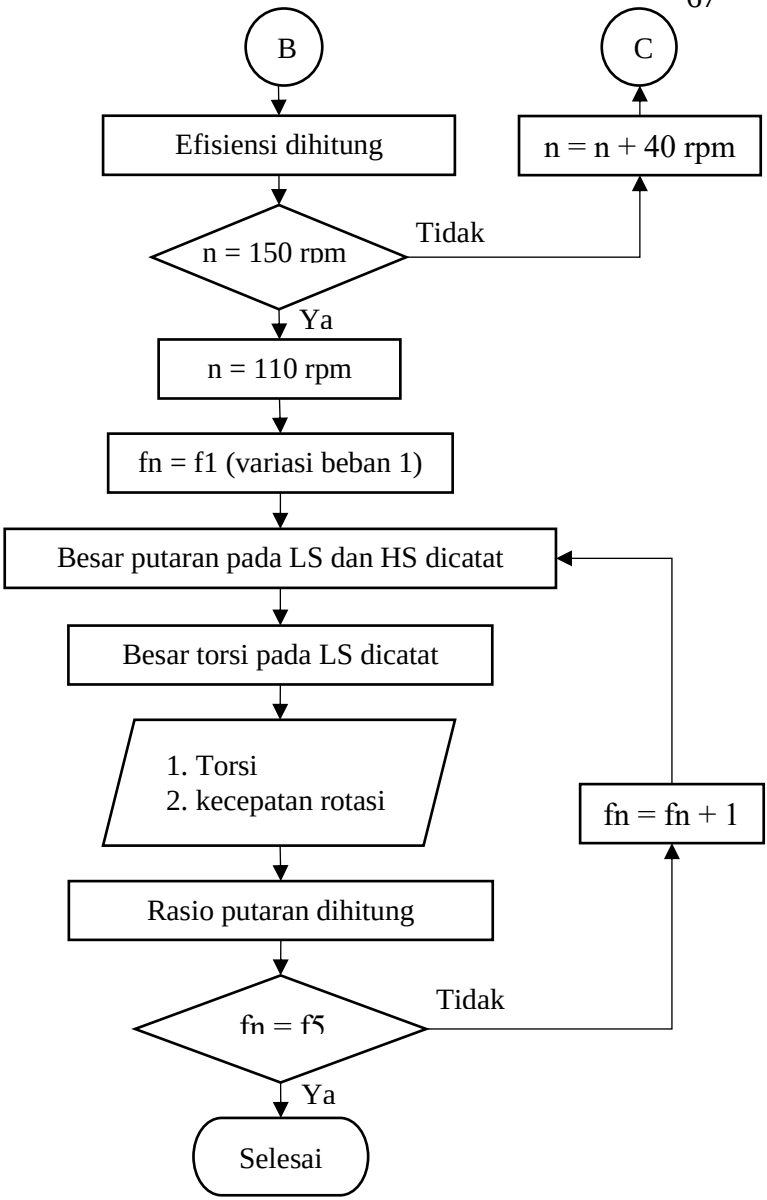
2. Tahap persiapan
   a. Seluruh peralatan yang akan digunakan dalam eksperimen disiapkan.
   b. Peralatan dirangkai sesuai dengan skema percobaan.
   c. Jarak antara poros *input* dan poros *output* diatur dengan cara menggesernya dan mengukur jaraknya pada menggunakan jangka sorong sehingga didapatkan *air gap* yang diinginkan, sesuai dengan *air gap* yang didapat dari simulasi yang menghasilkan torsi terbesar.
   d. Sistem peralatan uji dipastikan telah terinsteraksi dengan baik dan benar sesuai dengan skema peralatan.
   e. Alat tulis disiapkan untuk mencatat data.
3. Tahap pengambilan data
   a. Motor DC dinyalakan bersamaan dengan koverter.
   b. Besar tegangan yang masuk ke motor diatur pada converter agar putaran pada poros *input* sebesar 70 rpm.
   c. Putar pada poros *input* atau pada HS *radial magnetic spur gear* diperiksa kembali menggunakan *tachometer* apakah telah sesuai pada putaran 70 rpm atau belum, jika belum diatur kembali besar tegangan yang masuk ke motor hingga mencapai 70 rpm.
   d. Besar kecepatan rotasi pada poros *output* atau LS *radial magnetic spur gear* diukur dan dicatat menggunakan *tachometer*.
   e. Besar dari torsi yang ditunjukkan pada *torquemeter* dicatat untuk kedua *torquemeter*.
   f. Efisiensi dihitung dari data torsi *input* dan torsi *output* serta besar rotasi *input* dan rotasi *output*.
   g. Langkah b. hingga f. dilakukan untuk variasi kecepatan yang lain (110 rpm dan 150 rpm).

h. Pada proses variasi pembebanan, dilakukan pada kecepatan 110 rpm dengan lima variasi pembebanan.
i. Pembebanan dilakukan dengan cara poros *output* dijepit menggunakan tang dengan besar pembebanannya menggunakan karet dengan jumlah tertentu.
j. Besar kecepatan rotasi pada poros *output* dan poros *input* diukur dan dicatat menggunakan *tachometer*.
k. Rasio putaran dihitung dengan membandingkan kecepatan rotasi pada LS rotor dan HS rotor.
l. Besar torsi pada LS rotor diukur dan dicatat menggunakan *torquemeter*.
m. Langkah i. hingga l. dilakukan sebanyak lima kali dengan jumlah karet yang berbeda pada tiap variasi beban.

### 3.3.4 *Flowchart* Eksperimen




A
Jarak *air gap* antara HS dan LS diatur menggunakan jangka sorong
Motor dinyalakan bersamaan dengan konverter
n = 70 rpm
Besar tegangan masuk ke motor diatur pada konverter hingga putaran motor n rpm
Tidak
Putaran = n rpm
Ya
Besar putaran pada LS dicatat
Besar torsi pada HS dan LS dicatat
1.Torsi
2. Kec. rotasi
B
C




Gambar 3.21 *Flowchart* eksperimen

## 3.4 Pengambilan dan Pengolahan Data

Setelah tahap *post-processing* dan eksperimen selesai, didapat data dari simulasi kemudian dikumpulkan dan diolah sebelum dilakukan analisa dan pembahasan. Data yang didapat dicatat dalam bentuk tabel seperti pada tabel 3.1 dan tabel 3.2.

Tabel 3.2 Lembar data hasil simulasi dengan variasi *air gap*

| | Torsi (Nm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Air Gap (mm) | 1,5 | | 2 | | 2,5 | |
| Kecepatan (rpm) | LS | HS | LS | HS | LS | HS |
| 70 | | | | | | |
| 110 | | | | | | |
| 150 | | | | | | |

Tabel 3.3 Lembar data hasil penelitian

| Kecepatan input | $T_{max}$ simulasi LS rotor (Nm) | $T_{max}$ eksperimen LS rotor (Nm) |
|---|---|---|
| 70 rpm | | |
| 110 rpm | | |
| 150 rpm | | |

# BAB IV
# ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab analisa data dan pembahasan akan dijelaskan mengenai data hasil simulasi menggunakan *software* Ansys Maxwell Electromagnetic 3D dan juga data hasil eksperimen *radial external magnetic spur gear* serta analisis dan pembahasan mengenai hasil simulasi dan eksperimen dari tiap-tiap variasi yang ada.

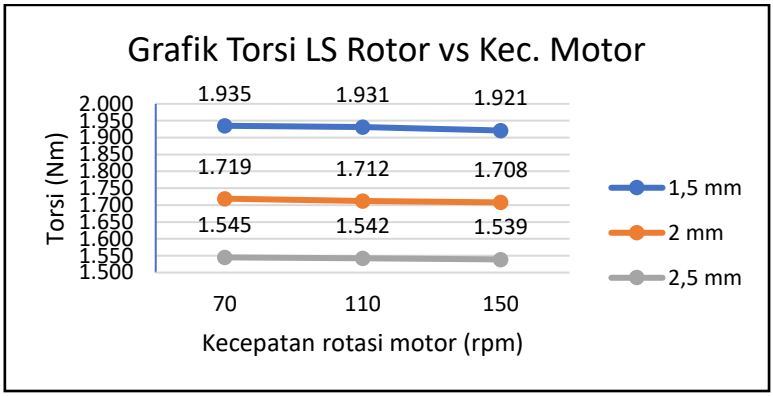
## 4.1 Analisis Hasil Simulasi

Pada penelitian tugas akhir ini dilakukan simulasi menggunakan *software* Ansys Maxwell Electromagnetic 3D untuk memperoleh data berupa berupa torsi terhadap waktu yang kemudian diambil data torsi maksimumnya yang dapat disalurkan oleh *radial external magnetic spur gear*. Pada simulasi dilakukan beberapa variasi yakni variasi pada *air gap* serta variasi pada kecepatan HS *gear* atau *driver gear*. Variasi *air gap* yang digunakan sebesar 1,5 mm, 2 mm, serta 2,5 mm dengan variasi kecepatan *driver* sebesar 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm. Hasil dari simulasi pada *software* Ansys Maxwell Electromagnetic 3D berupa data torsi pada *magnetic gear* yang kemudian akan dianalisa serta dibandingkan dengan torsi pada hasil eksperimen.

### 4.1.1 Analisis Pengaruh *Air Gap* dan Kecepatan Terhadap Torsi LS Rotor

Pada analisa ini, dilakukan perbandingan hasil simulasi pada LS rotor berjari-jari 2 mm dengan variasi kecepatan input dari HS rotor sebesar 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm. Dari tiap variasi kecepatan *input* pada HS rotor, divariasikan dengan 3 *air gap* sebesar 1,5 mm, 2 mm, dan 2,5 mm. Variasi *air gap* dilakukan untuk mencari pada *air gap* berapa yang akan

menghasilkan torsi paling maksimum untuk kemudian dilakukan eksperimen menggunakan *air gap* terpilih tersebut untuk dibandingkan hasil torsi eksperimen dengan torsi simulasi.

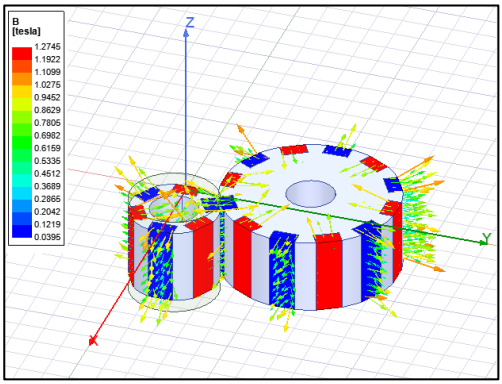



Gambar 4.1 Grafik torsi pada LS rotor terhadap variasi kecepatan serta *air gap*

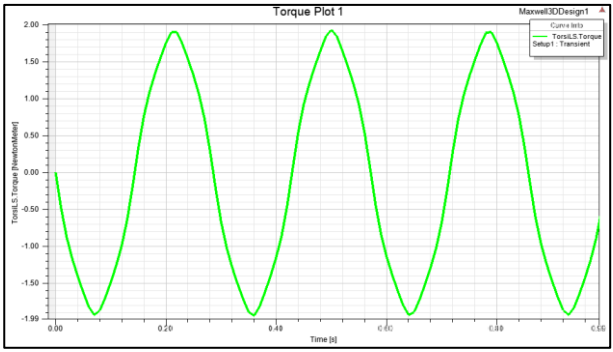
Pada gambar 4.1 dapat dilihat bahwa LS rotor dengan *air gap* 1,5 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm memiliki torsi maksimal masing-masing sebesar 1,935 Nm, 1,931 Nm, dan 1,921 Nm. LS rotor dengan *air gap* 2 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm memiliki torsi maksimal masing-masing sebesar 1,719 Nm, 1,712 Nm, dan 1,708 Nm. Dan LS rotor dengan *air gap* 2,5 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm memiliki torsi maksimal masing-masing sebesar 1,545 Nm, 1,542 Nm, dan 1,539 Nm.

Dari perbandingan yang telah dilakukan didapatkan data torsi dimana torsi terendah dari variasi semua *air gap* ada pada *air gap* sebesar 2,5 mm. Sementara torsi terbesar ada pada variasi *air gap* sebesar 1,5 mm. Hal ini disebabkan oleh LS rotor

dengan *air gap* 1,5 mm memiliki nilai *air gap* terkecil dibandingkan variasi *air gap* lainnya. Dengan berkurangnya nilai *air gap* maka dapat meningkatkan *flux density* karena nilai *magnetitation*-nya yang lebih besar. Kenaikan *flux density* berdampak pada kenaikan torsi yang dihasilkan pada LS rotor. Dari gambar 4.1 terlihat pula bahwa seiring dengan naiknya kecepatan *input* pada HS rotor torsi maksimal yang dihasilkan semakin berkurang, hal ini dikarenakan tidak adanya kontak langsung antara HS *gear* dengan LS *gear* yang mana pergerakan dari LS rotor hanya dipengaruhi oleh *flux density* yang memberikan efek *fictive torsion spring*, sehingga apabila kecepatan rotasinya semakin besar, maka torsi yang dapat diterima semakin kecil.

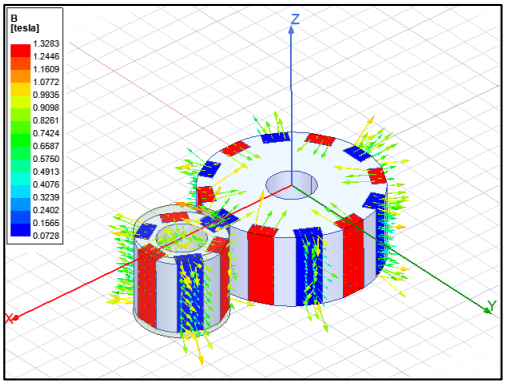



(a.)

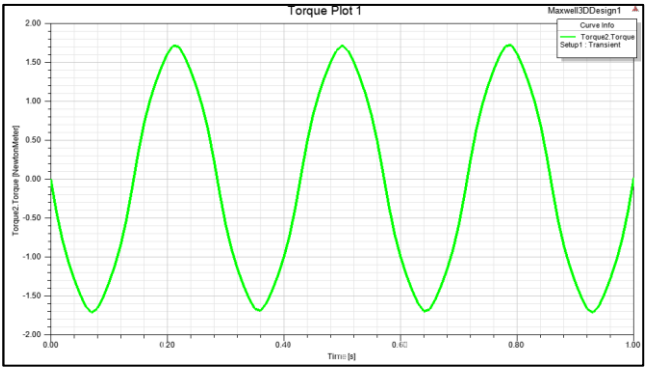



(b.)

Gambar 4.2 Hasil simulasi LS rotor dengan *air gap* 1,5 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi

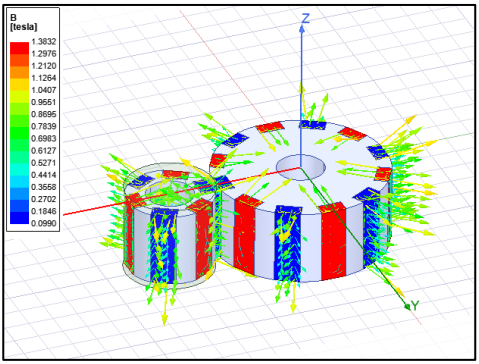



(a.)

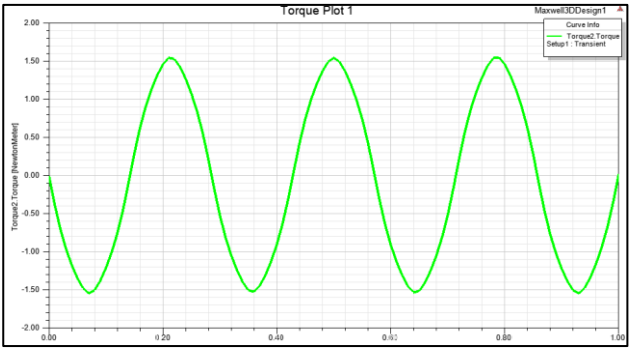



(b.)

Gambar 4.3 Hasil simulasi LS rotor dengan *air gap* 2 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi




(a.)

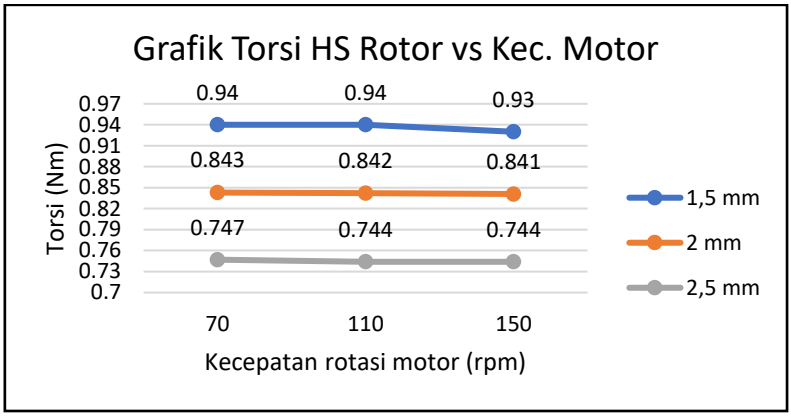



(b.)

Gambar 4.4 Hasil simulasi LS rotor dengan *air gap* 2,5 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi

### 4.1.2 Analisis Pengaruh *Air Gap* dan Kecepatan Terhadap Torsi HS Rotor

Pada analisa ini, dilakukan perbandingan hasil simulasi pada HS rotor berjari-jari 2 mm dengan variasi kecepatan input dari HS rotor sebesar 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm. Dari tiap variasi kecepatan *input* pada HS rotor, divariasikan dengan 3 *air gap* sebesar 1,5 mm, 2 mm, dan 2,5 mm. Variasi *air gap* dilakukan untuk mencari pada *air gap* berapa yang akan menghasilkan torsi paling maksimum untuk kemudian dilakukan eksperimen menggunakan *air gap* terpilih tersebut untuk dibandingkan hasil torsi eksperimen dengan torsi simulasi.

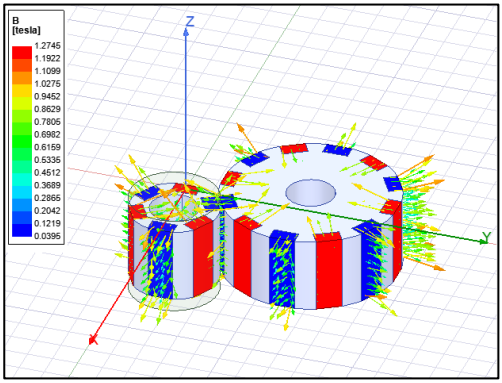



Gambar 4.5 Grafik torsi pada HS rotor terhadap variasi kecepatan serta *air gap*

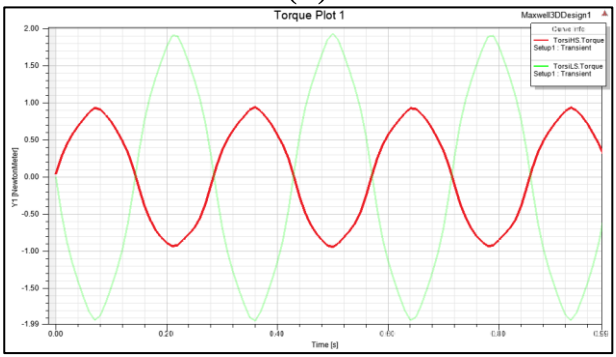
Pada gambar 4.5 dapat dilihat bahwa HS rotor dengan *air gap* 1,5 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm memiliki torsi maksimal masing-masing sebesar 0,94 Nm, 0,94 Nm, dan 0,93 Nm. HS rotor dengan *air gap* 2 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm memiliki torsi maksimal masing-masing sebesar 0,843 Nm, 0,842 Nm, dan 0,841 Nm. Dan LS rotor dengan *air gap* 2,5 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm memiliki torsi maksimal masing-masing sebesar 0,747 Nm, 0,744 Nm, dan 0,744 Nm.

Dari perbandingan yang telah dilakukan didapatkan data torsi dimana torsi terendah dari variasi semua *air gap* ada pada *air gap* sebesar 2,5 mm. Sementara torsi terbesar ada pada variasi *air gap* sebesar 1,5 mm. Hal ini disebabkan oleh HS rotor dengan *air gap* 1,5 mm memiliki nilai *air gap* terkecil dibandingkan variasi *air gap* lainnya. Dengan berkurangnya nilai *air gap* maka dapat meningkatkan *flux density* karena nilai *magnetitation*-nya yang lebih besar. Kenaikan *flux density*

berdampak pada kenaikan torsi yang dihasilkan pada HS rotor. Dari gambar 4.5 terlihat pula bahwa seiring dengan naiknya kecepatan *input* pada HS rotor torsi maksimal yang dihasilkan semakin berkurang, hal ini dikarenakan tidak adanya kontak langsung antara HS *gear* dengan LS *gear* yang mana pergerakan dari LS rotor hanya dipengaruhi oleh *flux density* yang memberikan efek *fictive torsion spring*, sehingga apabila kecepatan rotasinya semakin besar, maka torsi yang dapat disalurkan semakin kecil.



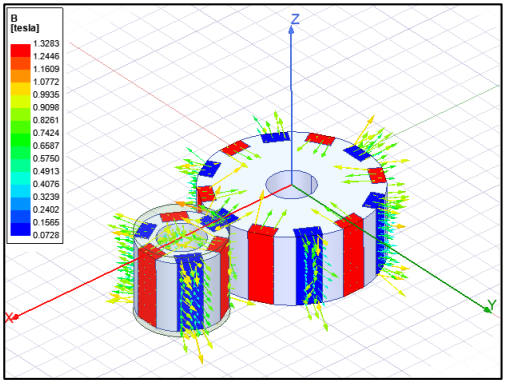

(a.)



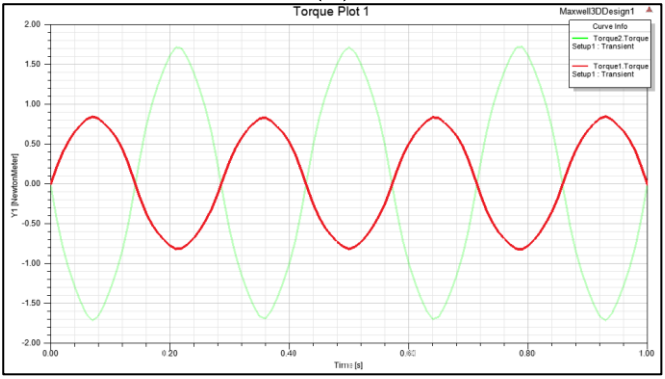

(b.)

Gambar 4.6 Hasil simulasi HS rotor dengan *air gap* 1,5 mm

dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi

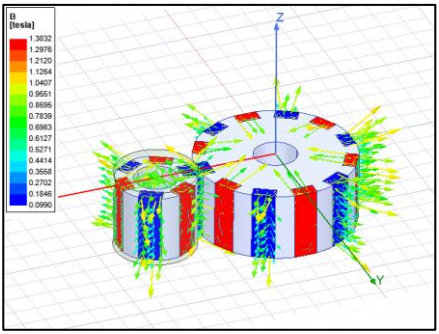



(a.)

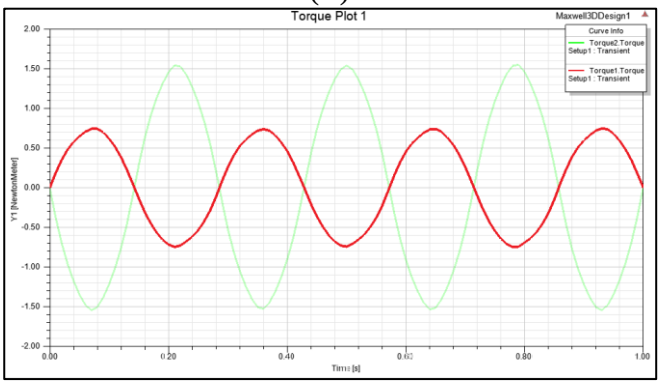



(b.)

Gambar 4.7 Hasil simulasi HS rotor dengan *air gap* 2 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi




(a.)




(b.)

Gambar 4.8 Hasil simulasi HS rotor dengan *air gap* 2,5 mm dan kecepatan rotasi 70 rpm (a) *Flux density* (b) grafik torsi hasil simulasi

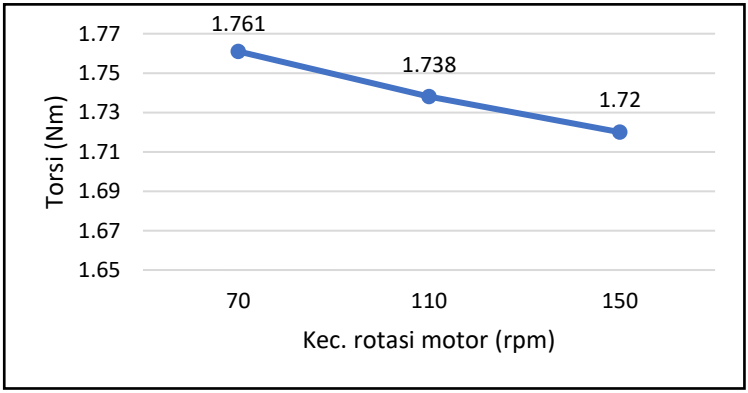
## 4.2 Analisis Hasil Eksperimen

Setelah dilakukannya penelitian dengan metode simulasi menggunakan *software* Ansys Maxwell Electromagnetic 3D, dilakukan pula metode eksperimen untuk memperoleh hasil yang riil jika model tersebut diaplikasikan pada dunia nyata. Dari proses simulasi diperoleh *air gap* paling efektif untuk diterapkan yakni sebesar 1,5 mm dikarenakan torsi

yang dihasilkan paling besar pada *air gap* 1,5 mm ini. Pada eksperimen data yang diperoleh berupa data torsi, kecepatan pada HS rotor dan LS rotor, serta daya *input* dan daya *output* dari *magnetic gear* untuk memperoleh besar dari effisiensi *gear*-nya.

### 4.2.1 Analisis Torsi Eksperimen Pada LS rotor

Pada eksperimen ini dilakukan pengukuran besar torsi pada LS rotor dengan variasi kecepatan yakni sebesar 70 rpm pada tegangan 6 volt, 110 rpm pada tegangan 9 volt, dan 150 rpm pada tegangan 13,8 volt dengan arus listrik pada motor sebesar 6 Ampere untuk semua kecepatan.



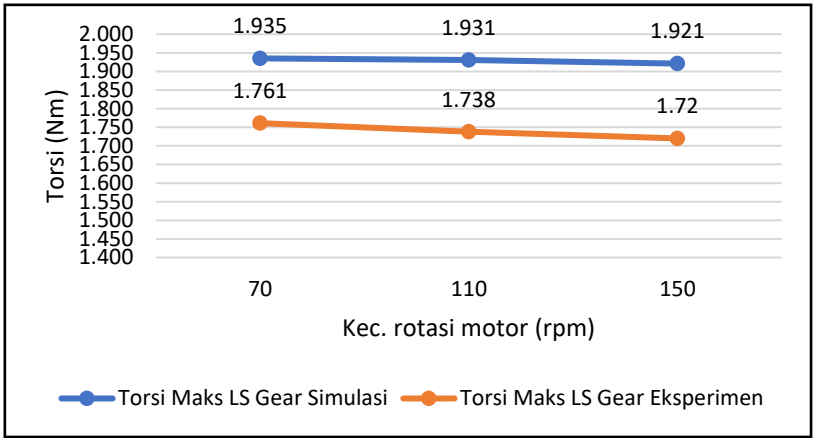

Gambar 4.9 Grafik pengaruh besar torsi terhadap variasi kecepatan motor pada eksperimen

Pada gambar 4.9 dapat dilihat bahwa besar torsi pada *air gap* 1,5 mm dengan variasi kecepatan sebesar 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm masing-masing sebesar 1,761 Nm, 1,738 Nm, dan 1,72 Nm dengan perbedaan torsi antara tiap variasi kecepatan motor tidak lebih dari 5% sehingga tidak dikatakan signifikan sebab perbedaannya yang sangat kecil. Hal ini bisa diakibatkan karena selisih variasi kecepatan yang kecil

sehingga torsi yang dipengaruhi juga tidak besar perbedaannya. Terlihat bahwa *trendline* turun yang artinya semakin besar kecepatan rotasi motor maka torsi yang dapat diterima oleh LS rotor pada eksperimen semakin kecil, hal ini telah sesuai dengan apa yang ada pada simulasi serta efek dari *fictive torsion spring* dimana semakin besar kecepatan rotasinya maka torsi yang dapat diterima oleh LS rotor semakin kecil.

### 4.2.2 Analisis Torsi Simulasi dan Eksperimen pada LS Rotor

Setelah dilakukan eksperimen, maka hasil torsi dari eksperimen dibandingkan dengan hasil pada simulasi untuk *air gap* dan variasi kecepatan yang sama, yakni pada *air gap* 1,5 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm.

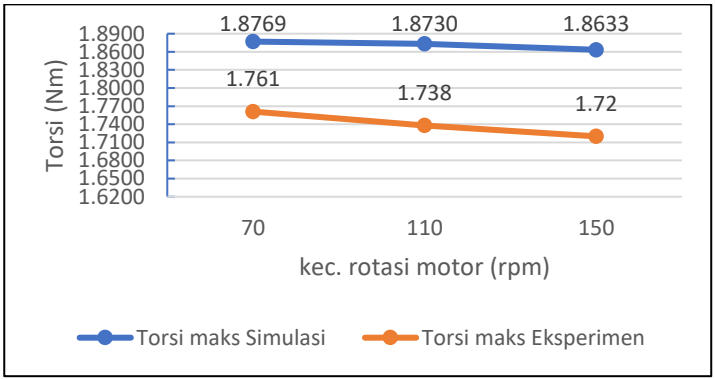



Gambar 4.10 Grafik perbandingan torsi pada simulasi dan torsi pada eksperimen

Dari gambar 4.10 dapat dilihat bahwa torsi maksimum pada metode simulasi pada *air gap* 1,5 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm masing-masing

sebesar 1,935 Nm, 1,931 Nm, dan 1,921 Nm. Sedangkan untuk torsi maksimum pada metode eksperimen pada *air gap* 1,5 mm dengan variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm masing-masing sebesar 1,761 Nm, 1,738 Nm, dan 1,72 Nm. Terlihat bahwa nilai torsi maksimum pada metode simulasi sekitar 9% hingga 10% lebih besar dari nilai torsi maksimum pada metode eksperimen untuk semua variasi kecepatan. Hal ini disebabkan adanya *mechanical losses* pada metode eksperimen seperti gesekan pada bantalan *bearing* yang menyebabkan beban tambahan pada rotor LS sehingga memperkecil besar torsi yang dihasilkan serta beban dari porosnya itu sendiri yang bisa mengurangi torsi yang diterima LS *gear*. Dengan menggunakan persamaan 2.16 serta data hasil simulasi berupa torsi yang kemudian digunakan untuk menghitung gaya radial yang terjadi maka dapat diketahui perkiraan dari daya yang hilang akibat dari gesekan pada *bearing* yang terjadi pada LS rotor. Daya yang hilang pada LS rotor untuk kecepatan rotasi *input* sebesar 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm secara berurutan yakni, 0,2127 watt, 0,3336 watt, dan 0,4526 watt, sehingga jika dikonversi menjadi torsi gesekannya pada masing-masing kecepatan rotasi LS rotor 35 rpm, 55 rpm, dan 75 rpm secara berurutan yakni sebesar 0,05807 Nm, 0,05796 Nm, dan 0,05765 Nm. Jika torsi hasil simulasi seperti pada gambar 4.10 dikurangi oleh torsi gesekan *bearing*, maka torsi akhirnya dari simulasi akan bernilai 1,8769 Nm pada kecepatan *input* 70 rpm, 1,8730 Nm pada kecepatan *input* 110 rpm, dan 1,8633 Nm pada kecepatan *input* 150 rpm seperti yang terlihat pada gambar 4.11 dimana torsi akhirnya dibandingkan dengan torsi hasil uji eksperimen. Terlihat bahwa perbedaan nilai yang terjadi besarnya sekitar 6,17% untuk kecepatan 70 rpm, 7,2% untuk kecepatan 110 rpm, dan 7,69% untuk kecepatan 150 rpm sehingga dapat dikatakan perbedaanya tidak terlalu signifikan. Namun dari kedua hasil tersebut, *trendline* dari torsinya sama-

sama cenderung menurun ketika kecepatan rotasi semakin bertambah.



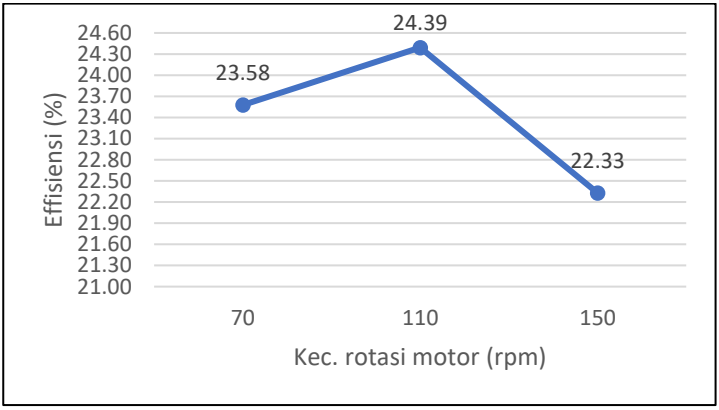

Gambar 4.11 Perbandingan torsi simulasi setelah dikurangi torsi gesek dengan torsi eksperimen

### 4.2.3 Analisis Efisiensi *Radial External Magnetic Spur Gear* Pada Eksperimen

Setelah didapatkan hasil torsi pada eksperimen kemudian dibandingan dengan torsi hasil metode simulasi, dilakukan pula perhitungan *power* dari *magnetic spur gear* untuk menghitung berapa efisiensi yang dihasilkan oleh *magnetic gear* ini. Berikut ini adalah data torsi dan kecepatan yang diperoleh dari eksperimen untuk perhitungan daya dari torsi dan putaran masing-masing rotor yang digunakan sebagai perhitungan efisiensi.

Tabel 4.1 Torsi dan kecepatan dari HS rotor dan LS rotor

| Torsi HS (Nm) | Kec. HS rotor (rpm) | Torsi LS (Nm) | Kec. LS rotor (rpm) |
|---|---|---|---|
| 3.734 | 70 | 1.761 | 35 |
| 3.564 | 110 | 1.738 | 55 |
| 4.007 | 150 | 1.72 | 75 |

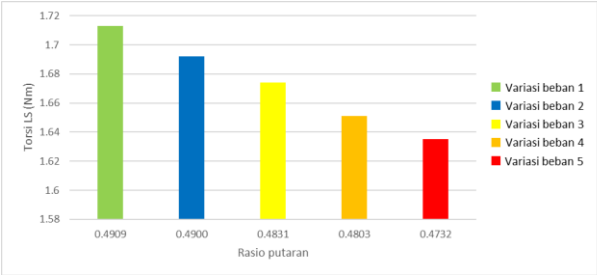



Gambar 4.12 Grafik efisiensi terhadap kecepatan rotasi motor pada *air gap* 1,5 mm

Dapat dilihat pada gambar 4.12 dimana efisiensi pada *air gap* 1,5 mm untuk variasi kecepatan 70 rpm, 110 rpm, dan 150 rpm masing-masing sebesar 23,58%, 24,39%, dan 22,33%. Dari grafik terlihat bahwa *trendline*-nya naik sedikit dari 70 rpm ke 110 rpm kemudian turun cukup rendah dari 110 rpm ke 150 rpm. Terjadinya kenaikan efisiensi dari 70 rpm ke 110 rpm dikarenakan perbandingan daya antara daya HS dan daya LS pada 110 rpm lebih kecil dibandingkan pada 70 rpm sehingga efisiensi pada 110 rpm adalah paling tinggi dibandingkan pada variasi kecepatan lain dan pada 150 rpm memiliki efisiensi paling rendah dari semua variasi kecepatan pada eksperimen karena perbandingan yang cukup besar antara daya HS dan daya LS pada kecepatan tersebut. Daya pada HS rotor didapatkan dari persamaan daya yang mana parameter yang mempengaruhi adalah torsi terukur dari HS rotor dan kecepatan *input* pada HS rotor. Dan daya pada LS rotor didapatkan dari persamaan daya yang mana parameter yang mempengaruhi adalah torsi terukur dari LS rotor dan kecepatan *output* pada HS rotor.

### 4.2.4 Analisis Pengaruh Variasi Beban terhadap Torsi LS dan Rasio Putaran

Dilakukan pula eksperimen dengan lima variasi beban acak untuk melihat pengaruhnya terhadap torsi yang dapat disalurkan serta terhadap rasio putaran yang dihasilkan. Berikut ini adalah data yang diperoleh dari eksperimen tersebut.




Gambar 4.13 Grafik torsi terhadap variasi beban dan rasio putaran.

Dapat dilihat pada gambar 4.13 dimana pada variasi beban 1 besar torsi dan rasio putarannya yakni 1,713 Nm dan rasio 0,4909 , variasi beban 2 besar torsi dan rasio putarannya yakni 1,692 Nm dan rasio 0,49 , variasi beban 3 besar torsi dan rasio putarannya yakni 1,674 Nm dan rasio 0,4831 , variasi beban 4 besar torsi dan rasio putarannya yakni 1,651 Nm dan rasio 0,4803 , dan terakhir variasi beban 5 besar torsi dan rasio putarannya yakni 1,635 Nm dan rasio 0,4732. Variasi beban 1 merupakan pembebanan paling ringan sedangkan variasi beban 5 merupakan pembebanan paling besar.

Terlihat bahwa semakin tinggi beban yang diberikan maka torsi yang dapat dihasilkan akan semakin berkurang yang mana hal ini diakibatkan karena besar torsi maksimal yang dihasilkan berkurang dikarenakan adanya beban tambahan sehingga akan menghambat torsi putarannya. Dari eksperimen terlihat bahwa perbedaan torsi yang terjadi antara variasi beban

tidak lebih dari 10%. Terlihat pula bahwa semakin tinggi pembebanan yang diberikan maka rasio putarannya akan semakin kecil yang diakibatkan karena pada roda gigi magnet terdapat peristiwa slip jika terdapat pembebanan sehingga akan mempengaruhi kecepatan dari rotor dimana kecepatannya akan semakin berkurang jika beban yang diberikan semakin tinggi sebab slipnya yang juga semakin tinggi. Dikarenakan berkurangnya kecepatan maka berakibat berubahnya rasio dari *magnetic gear* tersebut.

**(Halaman ini sengaja dikosongkan)**

# BAB V
# KESIMPULAN DAN SARAN

## 5.1 Kesimpulan

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

1. Hasil penelitian menunjukkan hubungan linear proporsional antara besar *air gap* terhadap torsi yang disalurkan dimana semakin bertambahnya besar *air gap* pada *radial external magnetic spur gear*, maka semakin kecil torsi yang dapat disalurkan antara *gear* yang disebabkan karena gaya magnetik akan semakin besar jika jaraknya semakin didekatkan, sebaliknya jika dijauhkan maka gayanya semakin melemah. Hasil penelitian ini juga menunjukkan hubungan linear proporsional antara besar kecepatan terhadap torsi yang disalurkan dimana semakin bertambahnya kecepatan rotasi yang diaplikasikan, maka torsi yang dapat disalurkan akan semakin kecil. Hal ini disebabkan adanya efek *fictive torsion spring* pada magnet yang apabila kecepatan rotasi semakin besar, maka torsi yang disalurkan akan semakin kecil. Torsi terbesar yang dapat disalurkan ada pada *air gap* 1,5 mm dan pada kecepatan 70 rpm dengan torsi sebesar 1,935 Nm pada LS rotor untuk metode simulasi dan 1,761 Nm pada LS rotor untuk metode eksperimen.
2. Torsi maksimum pada uji eksperimen lebih kecil dibandingkan dengan torsi maksimum pada uji simulasi dengan *air gap* yang sama yakni 1,5 mm dan variasi kecepatan yang sama. Hal ini dikarenakan pada eksperimen terdapat faktor *losses* salah satunya *losses bearing* yang terjadi yang menambah beban pada rotor, sedang pada simulasi kondisinya sangat ideal tanpa *losses*. Dari hasil perhitungan daya hilang akibat

gesekan pada *bearing*, diketahui rata-rata efisiensi dari *bearing* sekitar 97% yang didapat dari perbandingan torsi simulasi setelah dikurangi oleh torsi gesekan terhadap torsi simulasi sebelum dikurangi oleh torsi gesekan. Perbedaan hasil antara uji simulasi dan uji eksperimen sekitar 6% hingga 7% lebih kecil torsi uji eksperimen dibanding torsi uji simulasi

3. Nilai efisiensi dipengaruhi oleh besar daya dari masing-masing rotor dimana semakin kecil perbandingan daya antara daya HS rotor dengan daya LS rotor maka nilai efisiensinya akan semakin besar. Daya HS dan daya LS sendiri didapat dari persamaan dengan parameter torsi dan kecepatan rotasi pada masing-masing rotor. Efisiensi terbesar pada eksperimen ini ada pada kecepatan motor *input* 110 rpm dengan efisiensi sebesar 24,39%.
4. Pembebanan pada LS rotor memberikan pengaruh terhadap nilai kecepatan rotasi pada LS rotor maupun pada HS rotor serta mempengaruhi besar torsi yang dihasilkan pada LS rotor dimana pemberian beban yang semakin tinggi maka nilai rasio putaran akan semakin berkurang serta nilai torsi yang dapat dihasilkan akan semakin berkurang. Perbedaan besar torsi antara variasi beban yang terjadi tidak lebih dari 10%.

## 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat disampaikan guna mengembangkan penelitian selanjutnya mengenai *magnetic spur gear* ini, berikut beberapa saran yang dapat disampaikan:

1. Perlu dilakukannya uji eksperimen pada variasi lainnya seperti pada variasi *air gap* dan/atau variasi jumlah

magnet permanen yang digunakan terhadap torsi yang dapat disalurkan.

2. Perlu dilakukannya uji eksperimen pada kecepatan rotasi yang lebih tinggi dan selisih variasi kecepatan rotasi yang lebih besar untuk benar-benar melihat pengaruh dari kecepatan rotasi terhadap torsi pada kecepatan yang tinggi.
3. Pengoptimalan torsi maksimum dapat disalurkan dengan cara-cara seperti modifikasi geometri dari magnet permanen, jenis magnet permanen yang digunakan, serta konfigurasi susunan atau jenis dari *magnetic gear*.
4. Penyempurnaan alat penguji *magnetic spur gear* dengan melakukan rancang bangun alat pengujian yang telah didesain sedemikian rupa dan telah melalui proses simulasi pada *software*, seperti simulasi *static structural*, *thermal*, dan *magnetostatic*, guna mengetahui geometri serta bahan-bahan yang optimal untuk dipakai pada alat pengujian *magnetic spur gear*.

# DAFTAR PUSTAKA


Mulyadi, R. 2011. **Penyusunan Program Excell untuk Perancangan Rodagigi Lurus dan Rodagigi Miring Berdasarkan Metode Nieman [Skripsi]**. Padang (ID): Universitas Andalas

Jorgensen, F. T. (2010). *Design and Contruction of Permanent Magnetic Gears.* **Department of Energy Technology, Aalborg University.**

Muruganandam, G., Padma, D. S., & Selvakumar, P. (2012). Torque Analysis of Magnetic Spur Gear with Different Configurations. ***International Journal of Electrical Engineering,*** *Volume* 5.

Rahimi, M. A., Durali, M., & Asghari, M. (2018). A Design Approach for Coaxial Magnetic Gear and Determination of Torque Capability. ***Scientia Iranica***, *25*(2), 772-789.

Tlali, P., Wang, R.-J., & Gerber, S. (2014). Magnetic Gear Technologies: A Review. ***Institute of Electrical and Electronics Engineers***.

Singh, A., Gite, M., & Narkhede, A. (2014). An Overview of Neodymium Magnets over Normal Magnets for the Generation of Energy. ***International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication***, *volume* 2 (Issue 12).

Deutschman, A., Michels, W., & Wilson, W. (1975). ***Machine Design: Theory and Practice***. New York: Macmillan.

Raj, Y., Varghese, L., Nair, V., & Vincent, M. (2016, May). Magnetic Gearing System. ***International Journal for Innovative Research in Science & Technology***, *volume* 2 (Issue 12).

*Spur gear*. (n.d.). ***Advantages of spur gear***. Retrieved 2013, *from* http://mechteacher.com/spur-gear-advantages-disadvantages-applications/

Wu, Y.-C., & Wang, C.-W. (2015). Transmitted Torque Analysis of a Magnetic Gear Mechanism with Rectangular Magnets. ***Applied Mathematics & Information Sciences***.

Hamidizadeh, S. (2016). *Study of Magnetic Properties and Demagnetization Models of Pemanent Magnets for Electric Vehicle Application.* **Canada: Department of Mining and Materials Engineering**, McGill University.

Akbar R C. 2018. Pengaruh Jumlah Magnet Permanen dan *Air Gap* terhadap Torsi Maksimum *Axial External Magnetic Spur Gear* [skripsi]. Surabaya (ID): **Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

# LAMPIRAN I

Berikut merupakan tabel data torsi maksimum yang didapatkan dari hasil simulasi *transient* pada Ansys Maxwell Electromagnetic 3D.

| | Torsi Maksimum (Nm) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Air Gap (mm) | 1,5 | | 2 | | 2,5 | |
| Kecepatan (rpm) | LS | HS | LS | HS | LS | HS |
| 70 | 1,935 | 0,94 | 1,719 | 0,843 | 1,545 | 0,747 |
| 110 | 1,931 | 0,94 | 1,712 | 0,842 | 1,542 | 0,744 |
| 150 | 1,921 | 0,93 | 1,708 | 0,841 | 1,539 | 0,744 |

Berukut ini merupakan tabel data torsi yang didapatkan dari simulasi dan eksperimen pada variasi *air gap* 1,5 mm yang akan dibandingkan hasilnya pada pembahasan.

| Kecepatan input | $T_{max}$ simulasi LS rotor (Nm) | $T_{max}$ eksperimen LS rotor (Nm) |
|---|---|---|
| 70 rpm | 1,935 | 1,761 |
| 110 rpm | 1,931 | 1,738 |
| 150 rpm | 1,921 | 1,72 |

Berikut ini merupakan beberapa dokumentasi yang diambil selama proses penelitian.

1.720
2
3
4
▲/MAX
▶/MIN
MENU
RESET
MATSUVIVA
MIN
MAX

1.738
2
3
4
MAX
▶/MIN
MENU
RESET
MATSUVIVA
MIN
MAX

1.761
2
3
4
▲/MAX
▶/MIN
MENU
RESET
MATSUVIVA
MIN
MAX

# BIODATA PENULIS

Aqbil Ghafara dilahirkan di Malang, 10 Februari 1998 merupakan anak kedua dari 2 bersaudara yang terlahir dari orangtua bernama Totok Suryono dan Sugiarti. Riwayat pendidikan penulis diawali di SD Unggulan Al-Amin, Kec. Ngamprah Kab. Bandung Barat pada kelas I-IV (2004-2008), lalu pindah sekolah ke MI Asih Putera, Kota Cimahi pada kelas V-VI (2008-2010). Penulis melanjutkan pendidikannya di MTS Asih Putera pada tahun 2010-2013, kemudian melanjutkan pendidikannya di SMAN 2 Cimahi pada tahun 2013-2016. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang S-1 Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis mengambil bidang studi Desain tepatnya pada Lab. Mekanika Benda Padat pada Departemen Teknik Mesin ITS. Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi Kabiro Akademik Divisi *Human Resource Development* (HRD) di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS (LBMM ITS) pada periode 2017-2018. Selanjutnya menjadi Staff Ahli Divisi HRD di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin ITS pada periode 2018-2019. Penulis juga menjadi Koordinator Wilayah Bandung pada pelaksanaan event *Mechanic's Skill Competition* dan salah satu pemateri "Sistem Pemasukan Bahan Bakar" dalam event Kursus Dasar-Dasar Otomotif 2019. Selain aktif berorganisasi, penulis juga aktif mengikuti seminar dan pelatihan seperti pelatihan *software* Autodesk Inventor. Penulis juga aktif dalam kegiatan non-organisasi seperti olahraga badminton.

Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email robbi.cahyana@gmail.com.