



TESIS - TM 185400

**ANALISIS TORSI PADA *RADIAL INTERNAL
MAGNETIC SPUR GEAR* DENGAN
METODE NUMERIK DAN EKSPERIMEN**

KAFI HANNAN ALHADI

NRP. 6007201008

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

NIP. 196508101991021001

Program Studi Magister

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2022



TESIS - TM 185400

**ANALISIS TORSI PADA *RADIAL INTERNAL
MAGNETIC SPUR GEAR* DENGAN
METODE NUMERIK DAN EKSPERIMEN**

KAFI HANNAN ALHADI

NRP. 6007201008

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

NIP. 196508101991021001

Program Studi Magister

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2022



THESIS - TM 185400

**TORQUE ANALYSIS ON RADIAL
INTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR USING
NUMERICAL AND EXPERIMENTAL
METHODS**

KAFI HANNAN ALHADI

NRP. 6007201008

Advisor

Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

NIP. 196508101991021001

Study Program Master

Mechanical Engineering Department

Faculty Of Industrial and System Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh

Kafi Hannan AlHadi

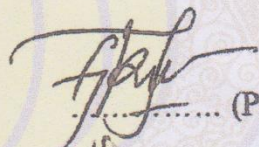
NRP. 6007201008

Tanggal Ujian: 14 Juli 2022

Periode Wisuda: September 2022

Disetujui oleh

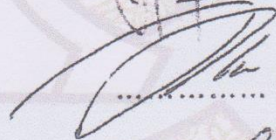
1. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA
NIP. NIP. 196508101991021001

 (Pembimbing)

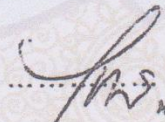
2. Alief Wikarta, S.T., MSc.Eng., Ph.D.
NIP. 198202102006041002

 (Penguji I)


3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M. Sc.
NIP. 198006272012121003

 (Penguji II)

4. Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197909262005011001

 (Penguji II)

Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem


Dr. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc.
NIP. 19660402198903100



ANALISIS TORSI PADA *RADIAL INTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR* DENGAN METODE NUMERIK DAN EKSPERIMEN

Nama Mahasiswa : Kafi Hannan AlHadi
NRP : 6007201008
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

ABSTRAK

Adanya kontak pada *mechanical gear* menimbulkan beberapa kerugian 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 akan mengakibatkan roda gigi dapat mengalami kerusakan parah. Oleh karena itu, perawatan dan pelumasan sangatlah penting untuk meningkatkan umur roda gigi.

Salah satu jenis *magnetic gear* yang ada adalah *radial internal magnetic spur gear*. Pada penelitian ini akan dilakukan analisa bagaimana performa dari jenis *radial internal magnetic spur gear* berdasarkan torsi yang dihasilkan. Penelitian ini akan dilakukan dengan metode numerik menggunakan Ansys Maxwell dan juga metode eksperimen untuk menganalisa besar torsi dari *radial internal magnetic spur gear*.

Semakin banyak jumlah *pole* yang digunakan maka akan semakin besar nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *magnetic gear* ini. Dengan interval penambahan 2 hingga 4 *pole* pada *high speed gear*, dan 4 hingga 8 *pole* pada *low speed gear*, maka akan didapatkan kenaikan nilai torsi statis maksimum sebesar 15,9% dan 43%. Selain itu, didapatkan pula bahwa semakin kecil *air gap* yang ada maka akan semakin meningkat nilai torsi yang dapat ditransmisikan oleh *radial internal magnetic spur gear*. Dengan interval pengecilan *air gap* sebesar 0,2 mm, maka akan didapatkan kenaikan nilai torsi maksimum sebesar 3,8% hingga 5,3%.

Kata Kunci: *Internal magnetic spur gear, magnet, pole, air gap, torsi*

TORQUE ANALYSIS ON RADIAL INTERNAL MAGNETIC SPUR GEAR USING NUMERICAL AND EXPERIMENTAL METHODS

Name : Kafi Hannan AlHadi
NRP : 6007201008
Advisor : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

ABSTRACT

The presence of contact on the mechanical gear causes several losses such as wear on the gears, an increase in excess temperature due to repeated friction continuously, noise from friction that occurs, and due to the absence of slippage, when excessive torque occurs, the gears can be damaged. critical. Therefore, maintenance and lubrication are very important to increase the life of the gears.

One type of magnetic gear that exists is the radial internal magnetic spur gear. This research will analyze how the performance of the radial internal magnetic spur gear type is based on the torque generated. This research will be carried out using a numerical method using Ansys Maxwell and also an experimental method to analyze the torque of the radial internal magnetic spur gear.

The more the number of poles used, the greater the maximum torque value that can be transmitted by this pair of magnetic gears. With the interval of adding 2 to 4 poles on the high speed gear, and 4 to 8 poles on the low speed gear, it will get an increase in the maximum static torque value of 15.9% and 43%, respectively. In addition, it was also found that the smaller the air gap, the higher the torque value that can be transmitted by the radial internal magnetic spur gear. With an air gap reduction interval of 0.2 mm, an increase in the maximum torque value of 3.8% to 5.3% will be obtained.

Keywords: Internal magnetic spur gear, magnet, pole, air gap, torque

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah Subhanallahu Wa Ta'ala atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan Tesis ini. Tesis ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Magister S-2 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

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

1. Kedua orang tua penulis yang senantiasa memberi dukungan, semangat, doa dan nasihat untuk penulis.
2. Kakak penulis beserta keluarga yang selalu memberikan semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan perkuliahan dengan baik.
3. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA selaku dosen pembimbing tesis ini, terima kasih atas motivasi, dukungan dan bimbingan dengan sangat sabar selama ini sehingga penulis bisa menyelesaikan tesis ini.
4. Bapak Alief Wikarta, Bapak Yunus, Bapak Achmad Syaifudin selaku dosen penguji yang banyak memberikan arahan, masukan, dan diskusi untuk penelitian ini.
5. Kawan-kawan M59 yang membantu baik suka atau duka bagi penulis, dengan sabar menjadi kawan berdiskusi dan berkembang bagi penulis.
6. Para Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Mesin.
7. Dosen dan Tendik Lab. MBP yang membantu menjalankan penelitian ini.
8. Lab. Otomasi yang selalu bersedia untuk memberikan tempat, ide, masukan, dan bantuan dari awal pengerjaan hingga selesainya Tesis ini.
9. Cak Tris yang bersedia menemani saat proses pengerjaan Tesis hingga larut malam.
10. Kawan-kawan Mahasiswa S2 Teknik Mesin ITS.
11. Warga TIK(S) yang selalu mengisi hari-hari di saat penulis merasa lelah

Dengan segala keterbatasan kemampuan serta pengetahuan penulis, tidak menutup kemungkinan Tesis ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis

bersedia menerima kritik dan saran dari berbagai pihak untuk penyempurnaan lebih lanjut. Akhir kata, penulis berharap agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangan bagi perkembangan ilmu pengetahuan serta dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, 2 Agustus 2022

Penulis

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Mechanical Gear	5
2.2 Magnetic Gear.....	5
2.2.1 Rasio <i>Gear</i> dan Jumlah <i>Pole</i> pada <i>Magnetic Gear</i>	7
2.2.2 Torque Density	8
2.2.3 Efisiensi.....	10
2.3 Magnetic Spur Gear	10
2.3.1 <i>Magnetic Spur Gear</i> berdasarkan Arah Medan Magnet	11
2.3.2 <i>Magnetic Spur Gear</i> berdasarkan Konfigurasi.....	11
2.3.3 Radial External Magnetic Spur Gear (Torsi Magnetic Spur Gear).....	12
2.4 Magnet Permanen	15
2.4.1 Demagnetisasi	18
2.4.2 Neodymium Magnet (NdFeB)	19
2.5 Penelitian Terdahulu	22
2.5.1 Metode Analitik dan Numerik <i>Radial External Magnetic Spur Gear</i> ..	22
2.5.2 Metode Numerik dan Eksperimen <i>External Magnetic Spur Gear</i>	25
2.5.3 Metode Analitik, Numerik, dan Eksperimen <i>Cycloid Permanent Magnet Gear</i>	30

2.5.4 Analisa Torsi pada Berbagai Jenis <i>Magnetic Spur Gear</i>	38
BAB III METODE PENELITIAN	45
3.1 Metode Numerik.....	45
3.1.1 Pre-Processing	45
3.1.1 Processing	47
3.1.3 Post-Processing.....	49
3.2 Metode Eksperimen.....	50
3.2.1 Peralatan Eksperimen	50
3.2.2 Rangkaian Peralatan Eksperimen	53
3.2.3 Tahapan Eksperimen	54
3.2.4 Desain Eksperimen	55
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN	57
4.1 Analisis Hasil Simulasi	57
4.1.1 Verifikasi Pemodelan Simulasi dengan Penelitian Terdahulu.....	62
4.1.2 Analisis Pengaruh Jumlah <i>Pole</i> Terhadap Torsi <i>Radial Internal Magnetic Spur Gear</i>	67
4.1.3 Analisis Pengaruh Air Gap Terhadap Torsi Radial Internal Magnetic Spur Gear.....	71
4.1.4 Analisis Pengaruh Jumlah <i>Pole</i> dan <i>Air Gap</i> Terhadap Torsi <i>Radial Internal Magnetic Spur Gear</i>	72
4.2 Analisis Hasil Eksperimen	74
4.2.1 Analisis Pengaruh <i>Air Gap</i> Terhadap Torsi Statis.....	76
4.2.2 Analisis Pengaruh <i>Air Gap</i> Terhadap Torsi Dinamis.....	80
4.2.3 Analisis Torsi Statis dan Torsi Dinamis <i>Radial Internal Magnetic Spur Gear</i> dengan Eksperimen	82
4.3 Analisis Perbandingan Nilai Torsi pada Metode Simulasi dan Eksperimen	85
4.4 Analisis Perbandingan Kemampuan <i>Internal Magnetic Gear</i> pada Penelitian dengan <i>Internal Mechanical Gear</i>	87
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	91
5.1 Kesimpulan.....	91
5.2 Saran.....	92
DAFTAR PUSTAKA	95

LAMPIRAN	97
BIODATA PENULIS	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Jenis roda gigi	5
Gambar 2.2 <i>Magnetic gear</i>	6
Gambar 2.3 Jenis <i>magnetic gear</i>	7
Gambar 2.4 Konstruksi <i>magnetic gear</i>	8
Gambar 2.5 Rangkaian <i>magnetic gear</i> dalam <i>gear box</i>	10
Gambar 2.6 a) <i>Radial magnetic spur gear</i> b) <i>Axial magnetic spur gear</i>	11
Gambar 2.7 a) <i>External magnetic spur gear</i> b) <i>Internal magnetic spur gear</i>	11
Gambar 2.8 Model <i>magnetic spur gear</i> yang digunakan untuk perhitungan teoritis	12
Gambar 2.9 Model dua dimensi dari dua pasangan balok magnet yang saling bertemu	13
Gambar 2.10 Model planar dari kedua pasangan balok magnet yang saling bertemu pada <i>magnetic spur gear</i>	13
Gambar 2.11 Parameter geometri dari pasangan roda gigi magnetik menggunakan balok magnet	14
Gambar 2.12 (a) Tipikal kurva histerisis <i>soft ferromagnetic</i> & (b) <i>Hard ferromagnetic</i>	17
Gambar 2.13 <i>Energy product</i> (BHmax)	18
Gambar 2.14 Magnet neodmium	21
Gambar 2.15 <i>External magnetic gear</i> dengan magnet berbentuk persegi panjang	22
Gambar 2.16 (a) Hubungan antara torsi dengan jumlah pasangan magnet permanen (b) Hubungan antara torsi dengan remanence magnet (c) Hubungan antara torsi dengan jarak air gap	24
Gambar 2.17 Desain 3D <i>magnetic gear</i>	26
Gambar 2.18 Grafik torsi pada <i>magnetic gear</i> terhadap variasi jumlah <i>pole</i> dan <i>air gap</i> dengan metode <i>finite element</i>	27
Gambar 2.19 Grafik torsi pada <i>magnetic gear</i> terhadap variasi jumlah <i>pole</i> dan <i>air gap</i> dengan uji eksperimen	27
Gambar 2.20 Grafik perbandingan hasil <i>finite element</i> dan uji eksperimen	28

Gambar 2.21 (a) <i>External magnetic gear</i> (b) <i>Internal magnetic gear</i> (c) <i>Internal magnetic gear</i> dengan interaksi antar magnet yang tinggi dan rasio gear yang rendah.....	30
Gambar 2.22 (a) <i>Internal magnetic gear</i> (b) <i>Cycloidal magnetic gear</i>	31
Gambar 2.23 (a) Sistem koordinat <i>magnetic spur gear</i> (b) Sistem koordinat <i>cycloidal magnetic gear</i>	32
Gambar 2.24 Skema eksperimen <i>cycloidal magnetic gear</i>	37
Gambar 2.25 Torsi <i>cycloidal magnetic gear</i>	37
Gambar 2.26 Efisiensi <i>cycloidal magnetic gear</i>	37
Gambar 2.27 (a) <i>External magnetic spur gear</i> (b) <i>Coaxial magnetic spur gear</i> dengan magnet berbentuk balok (c) <i>Coaxial magnetic spur gear</i> dengan magnet berbentuk ring	39
Gambar 2.28 Analisa numerik pada <i>external magnetic spur gear</i> (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi	42
Gambar 2.29 Analisa numerik pada coaxial magnetic spur gear dengan magnet berbentuk balok (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi	43
Gambar 2.30 Analisa numerik pada coaxial magnetic spur gear dengan magnet berbentuk ring (a) <i>Flux density</i> (b) Torsi.....	44
Gambar 3.1 3D Model Magnetic Gear.....	45
Gambar 3.2 Hasil mesh model 3D radial internal magnetic spur gear	48
Gambar 3.3 Hasil pembuatan region pada radial internal magnetic spur gear	48
Gambar 3.4 (a) Grafik torsi dari pasangan magnetic gear terhadap waktu; (b) vektor dan besar nilai dari flux density.....	50
Gambar 3.5 Rangkaian Peralatan Eksperimen.....	54
Gambar 4.1 (a) Model Yi-Chang Wu; (b) Model Verifikasi pada Penelitian Ini .	62
Gambar 4.3 Pengaruh air gap terhadap torsi pada penelitian Yi-Chang Wu.....	64
Gambar 4.4 Pengaruh air gap terhadap torsi pada model verifikasi	64
Gambar 4.5 (a) Model Jorgensen; (b) Model Verifikasi pada Penelitian Ini.....	65
Gambar 4.6 Perubahan Torsi Terhadap Waktu pada Model Jorgensen.....	66
Gambar 4.7 Perubahan Torsi Terhadap Waktu pada Model Verifikasi.....	67
Gambar 4.8 Pengaruh Jumlah Pole Terhadap Torsi dengan Air Gap 1,6 mm.....	68
Gambar 4.9 Pengaruh Air Gap Terhadap Torsi dengan Pasangan Pole 10-20	71

Gambar 4.10 Pengaruh Jumlah Pole dan Air Gap Terhadap Torsi Maksimum	73
Gambar 4.11 Model setiap variasi jumlah pole (a) 4-8 pole; (b) 6-12 pole; (c) 10-20 pole	75
Gambar 4.12 Torsi Statis dengan Jumlah Pole 10-20 dan Variasi Air Gap	77
Gambar 4.13 Kecenderungan low speed gear berputar berlawanan arah.....	78
Gambar 4.14 Torsi Dinamis dengan Jumlah Pole 10-20, Kecepatan Input Konstan 110 rpm, dan Variasi Air Gap	81
Gambar 4.15 Perbandingan Nilai Torsi Statis dan Torsi Dinamis Maksimum.....	83
Gambar 4.16 Perbandingan Nilai Torsi Maksimum Metode Simulasi dan Eksperimen dengan variasi Air Gap dan Jumlah Pole 10-20.....	86
Gambar 4.17 Katalog Produk KHK Internal Gear	88
Gambar 4.18 Coaxial Magnetic Gear	89
Gambar 4.19 Cycloidal Magnetic Gear.....	89

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Temperature Curie</i> pada magnet permanen	19
Tabel 2.2 Properties utama pada beberapa jenis magnet permanen	21
Tabel 2.3 Spesifikasi magnet dan dimensi <i>external magnetic gear</i>	23
Tabel 2.4 Model magnetic gear yang digunakan.....	25
Tabel 2.5 Material properties magnet dan gear pada magnetic gear	26
Tabel 2.6 Perbandingan hasil finite element dan uji eksperimen	28
Tabel 2.7 Parameter yang digunakan pada penelitian Jorgensen	36
Tabel 2.8 Parameter magnetic spur gear pada penelitian Muruganandam.....	41
Tabel 2.9 Ringkasan komparasi nilai torsi maksimum dari 3 jenis magnetic spur gear.....	44
Tabel 3.1 Detail Model Magnetic Gear	46
Tabel 3.2 Material Properties	47
Tabel 3.3 Peralatan Eksperimen	50
Tabel 3.4 Lembar data hasil simulasi dengan variasi jumlah pole dan air gap	55
Tabel 3.5 Lembar data hasil eksperimen dengan jumlah pole 10-20 dan variasi air gap.....	55
Tabel 4.1 Keterangan Parameter yang digunakan pada Penelitian Jorgensen	60
Tabel 4.2 Torsi Maksimum Penelitian Yi-Chang Wu.....	63
Tabel 4.3 Torsi Maksimum Model Verifikasi	63
Tabel 4.4 Hasil Torsi pada Penelitian Jorgensen.....	66
Tabel 4.5 Koefisien Gesek pada Bearing	84

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya zaman, kebutuhan manusia dalam kehidupan sehari-hari terus meningkat. Saat ini bisa dikatakan semua sektor aktivitas manusia membutuhkan alat bantu untuk mempermudah manusia dalam pekerjaannya. Alat bantu tersebut berupa mesin yang bisa menggantikan peran manusia dan mempermudah proses pengerjaan. Dalam komponen mesin sering dijumpai rangkaian *gear* yang disusun untuk mentransmisikan daya dari sumber penggerak menuju aktuator. Dalam mentransmisikan daya, *gear* ataupun roda gigi ini dapat berperan sebagai pengubah tingkat putaran pada dua poros berbeda, ataupun sebagai peningkat torsi yang dihasilkan pada poros sekunder, dan juga dapat berperan sebagai pengubah arah sumbu putar.

Gear ataupun roda gigi yang saat ini sering kita temui merupakan jenis *mechanical gear*. *Mechanical gear* bekerja akibat adanya kontak antara gigi-gigi pada roda gigi penggerak (*pinion*) dengan gigi-gigi pada roda gigi yang digerakkan (*gear*). Jenis *mechanical gear* sering menjadi pilihan untuk mentransmisikan daya karena memiliki banyak keuntungan, diantaranya adalah:

- Sistem transmisi yang kompak serta konstruksi yang sederhana sehingga pemasangannya mudah.
- Memiliki efisiensi transmisi daya yang tinggi karena tidak terjadi *slip*.
- Ketahanan yang tinggi serta umurnya yang panjang.
- Dapat digunakan untuk mentransmisikan daya yang besar.

Jenis *mechanical gear* ini memang memiliki banyak keuntungan, namun bukan berarti tidak terdapat kekurangan dalam pengaplikasian *mechanical gear* ini. Salah satu kekurangan *mechanical gear* ini timbul karena kebutuhannya terhadap kontak antara gigi-gigi pada roda gigi penggerak dan yang digerakkan. Apabila kontak dan *rolling* di permukaan gigi terjadi pada tegangan yang tinggi dan berlangsung secara berulang, hal tersebut dapat menimbulkan *inherent wear* yang dapat memicu terjadinya kegagalan pada roda gigi. 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 akan mengakibatkan roda gigi dapat mengalami kerusakan parah. Oleh karena itu, perawatan dan pelumasan sangatlah penting untuk meningkatkan umur roda gigi.

Salah satu inovasi yang dikembangkan untuk mengatasi kekurangan yang terdapat pada *mechanical gear* adalah dengan menggantikan sistem transmisi menggunakan rangkaian *magnetic gear*. *Magnetic gear* merupakan roda gigi dimana peran gigi yang ada pada *mechanical gear* tersebut digantikan oleh magnet, sehingga tidak ada lagi kontak yang ditimbulkan dari gigi-gigi yang ada pada *gear*. *Magnetic gear* memiliki banyak keunggulan akibat tidak adanya kontak antara *gear* penggerak dan *gear* yang digerakkan. Keunggulan tersebut diantaranya adalah tidak diperlukannya pelumasan, tidak timbul panas berlebihan, umur yang lebih panjang, serta akan terjadi slip bila torsi yang masuk berlebih sehingga tidak akan timbul kerusakan pada *gear*. Salah satu jenis *magnetic gear* yang ada adalah *radial internal magnetic spur gear*. Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk menganalisa jenis *radial external magnetic spur gear* karena memang dibutuhkan analisa lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana performa yang dihasilkan dari rangkaian *magnetic gear* ini.

Radial internal magnetic spur gear sendiri memiliki susunan yang berbeda dengan *radial external magnetic spur gear*. Pada *radial internal magnetic spur gear* ini roda gigi penggerak (*pinion*) terletak di dalam roda gigi yang digerakkan (*gear*). Dengan susunan tersebut maka akan dihasilkan arah putaran yang sama antara poros *input* dan poros *output*, sehingga poros *output* dapat memiliki arah putaran yang sama dengan arah putaran motor atau sumber penggerak. *Internal gear* sendiri merupakan konsep dasar dari terbentuknya susunan *planetary gear*. *Planetary gear* banyak digunakan dalam transmisi kendaraan dengan sistem *automatic*. Oleh karena itu, pada penelitian ini penulis ingin menganalisa lebih lanjut tentang bagaimana performa *magnetic gear* dengan jenis *radial internal magnetic spur gear*. Melalui penelitian ini nantinya dapat kita bandingkan bagaimana performa yang dihasilkan dari *radial internal magnetic spur gear* dan juga *radial external magnetic spur gear* dari penelitian sebelumnya. Dengan dilaksanakannya penelitian

ini diharapkan dapat memberikan masukan dan menambah wawasan dalam dunia industri untuk mengembangkan dan menyempurnakan inovasi *magnetic gear*.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini terdapat beberapa rumusan masalah, diantaranya adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi jumlah *pole* terhadap torsi yang dihasilkan dari *radial internal magnetic spur gear*?
2. Bagaimana pengaruh variasi *air gap* terhadap torsi yang dihasilkan dari *radial internal magnetic spur gear*?
3. Bagaimana perbandingan pengamatan nilai torsi yang dihasilkan dengan metode numerik *finite element* dan metode eksperimen?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi jumlah *pole* terhadap torsi yang dihasilkan dari *radial internal magnetic spur gear*
2. Mengetahui pengaruh variasi *air gap* terhadap torsi yang dihasilkan dari *radial internal magnetic spur gear*
3. Mengetahui perbandingan pengamatan nilai torsi yang dihasilkan dengan metode numerik *finite element* dan metode eksperimen

1.4 Batasan Masalah

Terdapat beberapa batasan masalah yang ada pada penelitian ini, diantaranya adalah:

1. Topologi *magnetic gear* yang digunakan adalah *radial internal magnetic spur gear*.
2. Jenis magnet permanen yang digunakan adalah magnet neodmium (NdFeB) grade N35.
3. Perhitungan pada *magnetic gear* menggunakan metode 3D *finite element* dengan *software* ANSYS Electronics v19.3.
4. Rasio putaran yang digunakan yaitu 1:2.
5. Diameter pada *high speed rotor* sebesar 40 mm dan pada *low speed rotor* 80 mm.

6. Tebal pada *high speed rotor* 30 mm dan *low speed rotor* sebesar 40 mm.
7. Volume magnet pada *high speed rotor* 9000 mm³ dan pada *low speed rotor* 18000 mm³.
8. Tidak ada pengaruh dari perubahan temperatur.
9. Variasi *air gap* yang digunakan pada simulasi adalah 1,2; 1,4; dan 1,6 mm.
10. Variasi jumlah *pole* dengan volume magnet konstan yaitu sebanyak 4, 6, dan 10 buah pada *high speed rotor* dan 8, 12, dan 20 buah pada *low speed rotor*.
11. Variasi pembebanan *brake* dengan tarikan sebesar 6, 8, dan 10 mm.
12. Kecepatan putar yang diberikan pada *high speed rotor* konstan sebesar 110 rpm.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam mengembangkan dan menyempurnakan inovasi *magnetic gear*, dan menjadi salah satu rujukan dalam pengetahuan tentang *magnetic gear*. Seperti yang kita ketahui bersama bahwa *magnetic gear* ini diharapkan dapat menjadi alternatif bagi para *engineer* dalam mendesain sebuah transmisi daya untuk mengatasi beberapa kekurangan yang terdapat pada *mechanical gear*. Metode numerik dan eksperimen yang diterapkan pada penelitian ini, serta hasil yang didapatkan dari metode tersebut diharapkan dapat menjadi acuan bagi para *designer* dalam merancang transmisi menggunakan *magnetic gear*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mechanical Gear

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



Gambar 2.1 Jenis roda gigi

Roda gigi banyak dipilih karena memiliki nilai torsi *density* yang tinggi, namun terdapat beberapa kekurangan seperti adanya gesekan antar komponen yang dapat menyebabkan keausan, kebisingan yang ditimbulkan, panas yang ditimbulkan bisa sangat tinggi, biasanya rusak apabila dikenai kondisi torsi yang berlebih, memerlukan pelumasan, perawatan secara rutin, dimana getaran dan keandalan menjadi perhatian utama [Jorgensen, 2010].

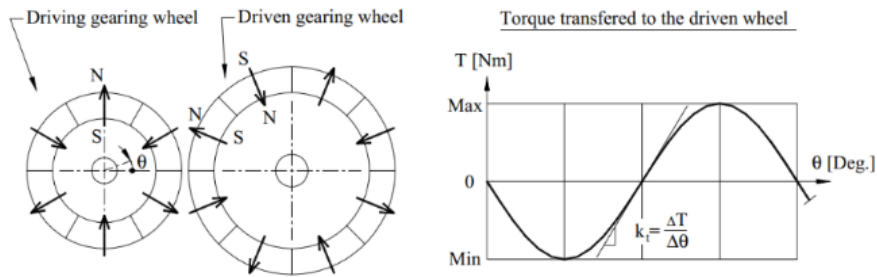
2.2 Magnetic Gear

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 perubahan 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 [Jorgensen, 2010].



Gambar 2.2 *Magnetic gear*

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) [Jorgensen, 2010].

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

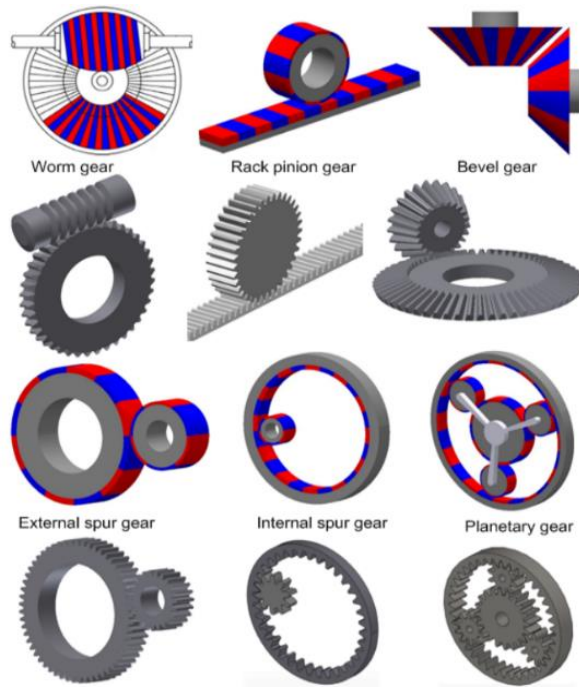
dimana:

k_t = *torsion spring* (Nm/rad)

ΔT = perubahan torsi (Nm)

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

Pada dasarnya *magnetic spur gear* dirancang sesuai dengan persamaan *gear* mekanis, dengan melihat hubungan antara antar gigi yang berperan untuk mendorong dan menarik gigi lainnya maka digunakanlah *gear* rasio dalam merancang. *Magnetic gear* bisa dirancang untuk mengikuti hampir semua jenis *mechanical gear* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Jenis *magnetic gear*

[Tlali et al., 2014]

2.2.1 Rasio *Gear* dan Jumlah *Pole* pada *Magnetic Gear*

Perbandingan putaran antara dua *gear* (*high speed* (HS) *gear* dan *low speed* (LS) *gear*) ditentukan berdasarkan jumlah *pole* dan diameter *gear*. Sebagian besar sistem *gear* memiliki rasio *gear* lebih besar dari satu yang mana *gear* berkecepatan tinggi terjadi pada HS *gear* dan *gear* berkecepatan rendah terjadi pada LS *gear*. Melalui persamaan (2.2) dapat ditentukan rasio *gear* melalui hubungan dengan diameter *gear* dan jumlah *pole* [Jorgensen, 2010].

$$G_r = \frac{N_{poleLS}}{N_{poleHS}} = \frac{D_{LS}}{D_{HS}} = \frac{\omega_{HS}}{\omega_{LS}} \quad (2.2)$$

dimana:

G_r = rasio *gear*

N_{poleHS} = jumlah *pole high speed rotor*

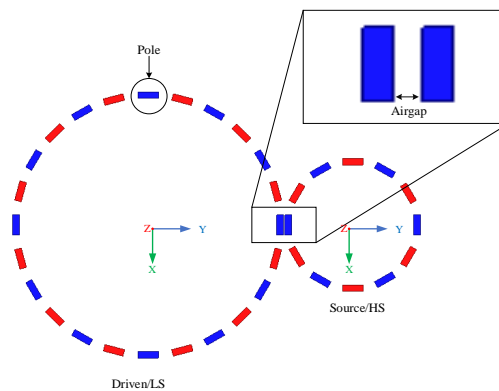
N_{poleLS} = jumlah *pole low speed rotor*

D_{LS} = diameter *low speed rotor*

D_{HS} = diameter *high speed rotor*

ω_{HS} = kecepatan putar *high speed rotor* (rpm)

ω_{LS} = kecepatan putar *low speed rotor* (rpm)



Gambar 2.4 Konstruksi *magnetic 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. 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 dengan torsi maksimum yang bisa disalurkan dinamakan dengan torsi density aktif, yang dinyatakan pada persamaan (2.3). *Active torque density* (ρ_a)

cocok digunakan sebagai parameter untuk membandingkan antara jenis magnetik *gear* yang satu dengan jenis magnetik *gear* yang lainnya.

$$\rho_a = \frac{T_{max}}{V_A} \quad (2.3)$$

dimana:

ρ_a = *active torque density* (Nm/m³)

T_{max} = torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)

V_A = volume rotor (m³)

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* (ρ_R) pada *magnetic gear* dengan menggunakan persamaan (2.4).

$$\rho_R = \frac{T_{max}}{V_T} \quad (2.4)$$

dimana:

ρ_R = *total torque density* (Nm/m³)

T_{max} = torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)

V_T = volume total (m³)

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

$$\rho_T = \frac{T_{nom}}{V_T} \quad (2.5)$$

dimana:

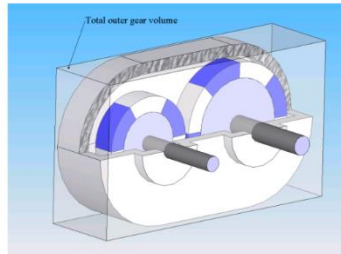
ρ_T = *total torque density* (Nm/m³)

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

V_T = volume total (m³)

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 [Jorgensen, 2010].



Gambar 2.5 Rangkaian *magnetic gear* dalam *gear box*

2.2.3 Efisiensi

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) [Jorgensen, 2010].

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.6)$$

dimana :

η = efisiensi

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

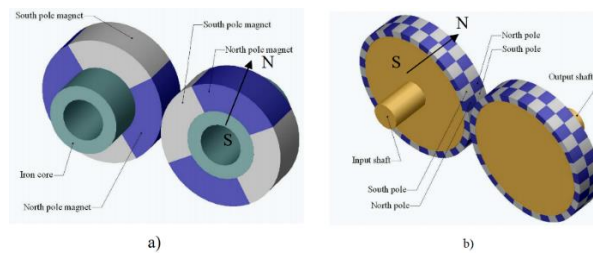
P_{in} = daya pada poros masukan (W)

2.3 Magnetic Spur Gear

Magnetic spur gear pada dasarnya memiliki desain topologi yang sama dengan mekanik gear, dimana terdapat dua rotor atau lebih berbentuk lingkaran gear yang saling berinteraksi untuk melakukan transmisi torsi. Terdapat beberapa jenis *magnetic spur gear* yang dibedakan berdasarkan arah medan magnet dan konfigurasi.

2.3.1 *Magnetic Spur Gear* berdasarkan Arah Medan Magnet

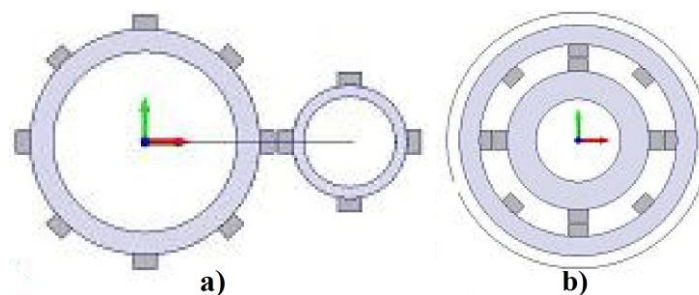
Magnetic spur gear berdasarkan arah medan magnet ada dua, yaitu *radial magnetic spur gear* dan *axial magnetic spur gear*. *Radial magnetic spur gear* arah medan magnetnya tegak lurus terhadap sumbu putaran gear, sedangkan *axial magnetic spur gear* arah medan magnetnya sejajar dengan sumbu putar gear. Kedua model tersebut diperlihatkan seperti gambar 2.6.



Gambar 2.6 a) *Radial magnetic spur gear* b) *Axial magnetic spur gear*

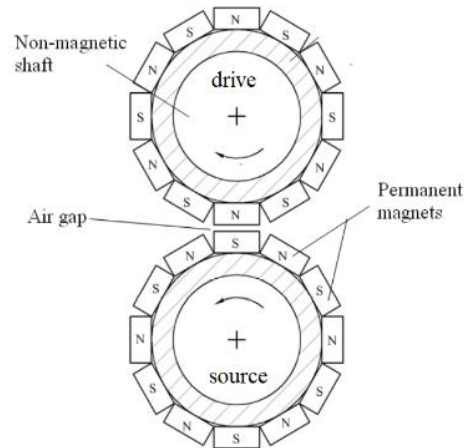
2.3.2 *Magnetic Spur Gear* berdasarkan Konfigurasi

Terdapat dua model *magnetic spur gear* berdasarkan konfigurasi, *external magnetic spur gear* dan *internal magnetic spur gear*. Pada model *external magnetic spur gear* membutuhkan banyak ruang karena posisi kedua gearnya berdampingan. Sedangkan model *internal magnetic spur gear* tidak membutuhkan banyak ruang karena posisi kedua gearnya dalam satu sumbu [Muruganandam et al. 2012]. Kedua model tersebut diperlihatkan seperti pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 a) *External magnetic spur gear* b) *Internal magnetic spur gear*

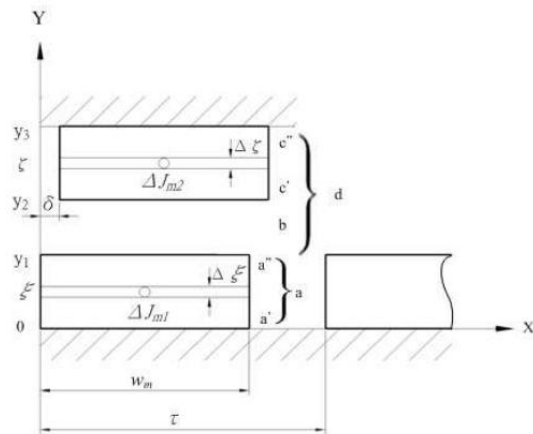
2.3.3 Radial External Magnetic Spur Gear (Torsi Magnetic Spur Gear)



Gambar 2.8 Model *magnetic spur gear* yang digunakan untuk perhitungan teoritis

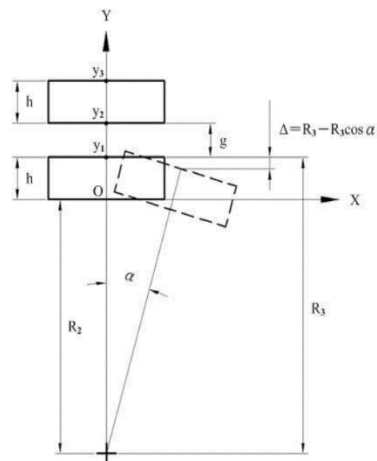
Pada Gambar 2.8 menunjukkan *source* magnet dan *drive* magnet yang mana digunakan dalam diskripsi teoritik. Perhitungan *drive* magnet diuraikan menjadi *current density* yang ekuivalen dan torsi dihitung dengan mempertimbangkan distribusi *current density* dibawah pengaruh *flux density* eksternal (B_{ext}) dari *source* magnet.

Flux density (B) sebagai fungsi koordinat posisi. Langkah selanjutnya dari pengelesaian ini yaitu mentransformasikan medan *fluks density* (B) yang didefinisikan ke dalam sistem koordinat *drive* magnet, dimana torsi akan dihitung. *Drive* magnet kemudian diuraikan menjadi distribusi *current density* yang ekuivalen. *Current density* terdapat pada permukaan luar setiap kutub magnet di sisi *drive* magnet. Pada bagian terakhir, torsi pada akhirnya akan dihitung dengan melakukan integrasi di sepanjang *drive* magnet. Integrasi torsi dilakukan dengan mempertimbangkan *fluks density* dari *source* magnet dan *current density* dari *drive* magnet yang kemudian akan digunakan untuk menghitung torsi [Jorgensen, 2010]. Semua *current density* (J) pada permukaan harus dilalui oleh B dari *source* magnet untuk menghasilkan torsi pada *drive* magnet. Artinya B pada *source* magnet akan saling silang dengan *current density* pada *drive* magnet kemudian akan menciptakan gaya dan torsi.



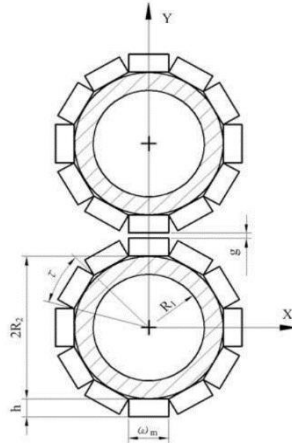
Gambar 2.9 Model dua dimensi dari dua pasangan balok magnet yang saling bertemu

[Wu et al., 2015]



Gambar 2.10 Model planar dari kedua pasangan balok magnet yang saling bertemu pada *magnetic spur gear*

[Wu et al., 2015]



Gambar 2.11 Parameter geometri dari pasangan roda gigi magnetik menggunakan balok magnet [Wu et al., 2015]

Berdasarkan penelitian [Wu et al., 2015], untuk menghitung *flux density* berdasarkan arah radial, maka *flux density* dihitung melalui komponen y yang merupakan komponen radial dari *flux density* di sepanjang *air gap* ($B_{y-air\ gap}$) seperti pada persamaan 2.7.

$$B_{y-air\ gap} = \left(\frac{\mu_0 \cdot J \cdot \tau}{\pi} \right) \cdot \sinh\left(\frac{\pi}{\tau} y_1\right) \cdot \operatorname{csch}\left(\frac{\pi}{\tau} y_3\right) \cdot \cosh\left(\frac{\pi}{\tau} y - \frac{\pi}{\tau} y_3\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (2.7)$$

dimana:

μ_0 = permeabilitas dari udara

τ = *pitch pole* (mm)

h = ketebalan/ketinggian *pole* magnet (mm)

g = *air gap* (mm)

R_2 = radius dalam *source* magnet (mm)

y_1 = $R_2 + h$

y_3 = $R_2 + 2h + g$

Pada penelitian yang dilakukan oleh Yi Chang Wu, J merupakan *surface current density* (A/m^2) yang ditampilkan pada persamaan (2.8).

$$J = \left(\frac{4B_r}{\mu_0\tau}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{w_m}{\tau}\right) \quad (2.8)$$

dimana:

B_r = *remanence* magnet (T)

w_m = lebar *pole* magnet (mm)

Berdasarkan persamaan gaya Lorentz, dimana pada penelitian [Wu et al., 2015] dijelaskan bahwa sepertiga dari magnet permanen berkontribusi terhadap torsi yang ditransmisikan, maka persamaan torsi dapat di tuliskan sebagai berikut.

$$T = \frac{nL}{3} \int_{y_2}^{y_3} \int_0^\tau (y + R_2) \cdot J \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau}x + \frac{\pi}{\tau}\delta\right) \cdot B_{y-airgap} dx dy \quad (2.9)$$

dimana:

T = torsi yang dihasilkan (Nm)

n = jumlah pasangan *pole* magnet

L = tebal *gear* atau panjang *pole* magnet (mm)

y_2 = $R_2 + h + g$

Torsi maksimum pada model *radial magnetic spur gear* terjadi ketika posisi *gear* berada pada setengah sudut *pitch pole gear* [Wu et al., 2015].

2.4 Magnet Permanen

Magnet adalah sebuah benda yang mampu menarik benda disekitarnya karena memiliki sifat kemagnetan. Kemagnetan sendiri adalah suatu fenomena fisik yang timbul dari medan magnet. Sifat dari suatu magnet dapat ditentukan dari medan magnet, induksi magnet dan lain sebagainya. Magnet memiliki beberapa jenis dan tipe, salah satunya adalah magnet permanen. Dari segi ukuran, magnet permanen mampu menghasilkan medan magnet yang sama dengan kumparan elektromagnetik dengan ukuran yang lebih kecil. Magnet yang paling banyak dikenal adalah yang mengandung besi metalik. [Hamidizadeh, 2016] 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 paramagnetik 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

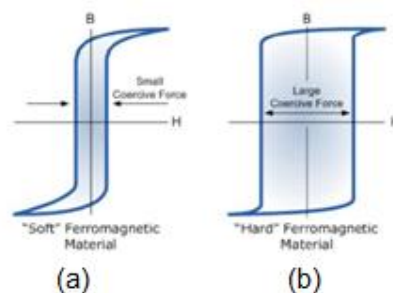
Sifat yang terakhir dan yang paling banyak digunakan adalah material yang bersifat ferromagnetik, dimana material ini memiliki kekuatan magnet yang kuat dan memiliki arah yang searah dengan medan magnet material magnet lainnya sehingga terjadi tarik-menarik dengan magnet disekitarnya dengan kekuatan tarik-menarik yang kuat. Material dengan sifat ferromagnetik 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 *termagnetitation* 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 *remanence*. *Remanence* adalah medan magnet yang tersisa setelah dihilangkannya medan magnet pengimbas.

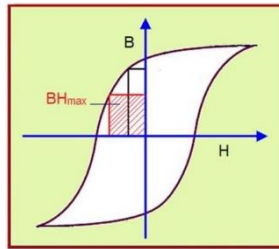
Histerisis menggambarkan proses *magnetitation reversal* pada bahan magnetik dari kondisi awal yang tidak *termagnetitation* kemudian diinduksi oleh medan magnetik luar sehingga membentuk kurva histerisis. Tipikal kurva histerisis untuk *soft* ferromagnetik dan *hard* ferromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.12 [Hamidizadeh, 2016].



Gambar 2.12 (a) Tipikal kurva histerisis *soft ferromagnetic* & (b) *Hard ferromagnetic*

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

kuadran kedua [Hamidizadeh, 2016].



Gambar 2.13 *Energy product* (BHmax)

Bahan *hardmagnetic* merupakan bahan yang memiliki kurva histerisis yang besar dan lebar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 di atas. Bahan *hardmagnetic* adalah sebutan untuk bahan yang susah di-*magnetization* dan juga susah untuk didemagnetisasi yang membuat bahan ini sangat cocok untuk dijadikan bahan dari magnet permanen. Bahan *hardmagnetic* dibagi menjadi dua, yaitu magnet konvensional dan magnet tanah jarang. Magnet konvensional memiliki nilai maksimum *energy product* (BHmax) berkisar antara 2-80 kJ/m³, seperti baja, paduan Cunife (Cu-Ni-Fe), paduan Alnico (Al-Ni-Co). Bahan *hardmagnetic* yang memiliki energi tinggi seperti Nd₂Fe₁₄B, SmCo₅ memiliki nilai BHmax lebih besar dari 80 kJ/m³ masuk dalam rare earth magnet. Bahan *hardmagnetic* biasanya banyak diaplikasikan pada motor, *speaker*, bor, dsb, dikarenakan semakin besar BHmax maka bahan magnet tersebut akan sangat susah untuk diberi perlakuan demagnetisasi.

2.4.1 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 *demagnetitation*, 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°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.

Tabel 2.1 *Temperature Curie* pada magnet permanen

Material	Temperature Curie (°C)
Alnico	850
SmCo	720
Ferrite	450
NdFeB	310

2.4.2 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 $\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$ dengan *energy product* sebesar 290 kJ/m^3 . Ditahun yang sama, *General Motor* di Amerika Serikat juga telah menyelesaikan riset mereka mengenai magnet *neodymium* yang dibuat dengan teknik yang sedikit berbeda dan menghasilkan magnet *neodymium* dengan *energy product* sebesar 420 kJ/m^3 . 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 [Hamidizadeh, 2016].

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* [Singh et al., 2014].

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 operasinya mulai dari M (dapat digunakan hingga 100°C) sampai EH (dapat digunakan hingga 200°C).

Terdapat beberapa *properties* utama yang digunakan untuk membandingkan antara magnet *neodymium* dengan magnet permanen lainnya seperti yang tertera pada Tabel 2.2. Pada Tabel 2.2 terdapat beberapa *properties* utama dari beberapa jenis magnet permanen [Hamidizadeh, 2016], yaitu:

❖ *Remenence*

Remenence digunakan untuk mengukur kekuatan medan magnet dari suatu material.

❖ *Coercivity*

Coercivity merupakan ketahanan suatu material untuk kehilangan sifat kemagnetannya (*demagnetitation*).

❖ *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

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

Berdasarkan Tabel 2.2 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 [Hamidizadeh, 2016].



Gambar 2.14 Magnet neodymium

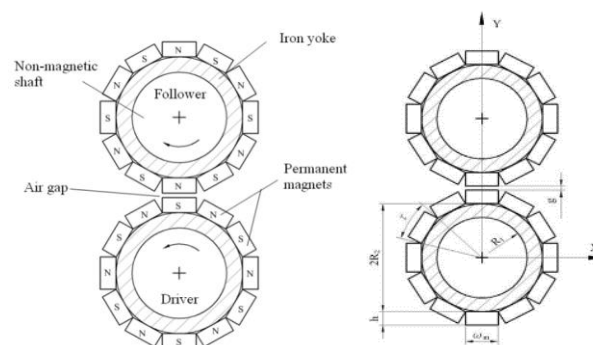
Magnet *neodymium* cenderung rentan terhadap korosi. Secara khusus, korosi sekecil apapun dapat menyebabkan kerusakan magnet. Masalah ini dibahas dalam banyak produk komersial dengan menyediakan lapisan pelindung. Pelapisan nikel atau dua pelapisan tembaga berlapis nikel digunakan sebagai metode standar, meskipun pelapisan dengan logam lainnya atau polimer dan lapisan pelindung pernis juga digunakan.

2.5 Penelitian Terdahulu

2.5.1 Metode Analitik dan Numerik *Radial External Magnetic Spur Gear*

Yi-Chang Wu dan Chih-Wen Wang melakukan penelitian pada tahun 2015 dengan judul “*Transmitted Torque Analysis of a Magnetic Gear Mechanism with Rectangular Magnets*”. Pada penelitian tersebut dianalisa bagaimana 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. Variasi jumlah *pole* dilakukan dengan volume magnet konstan, sehingga untuk menjaga volume magnet supaya konstan dipenelitian ini ketebalan gear semakin berkurang seiring bertambahnya jumlah *pole*. 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 analisis medan magnet dan torsi maksimum yang dapat disalurkan.

Magnetic spur gear dimodelkan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 dengan dimensi dan spesifikasi permanen magnet yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.3. Variasi jumlah pasang kutub magnet yang digunakan yaitu 5 sampai dengan 10 pasang kutub magnet.



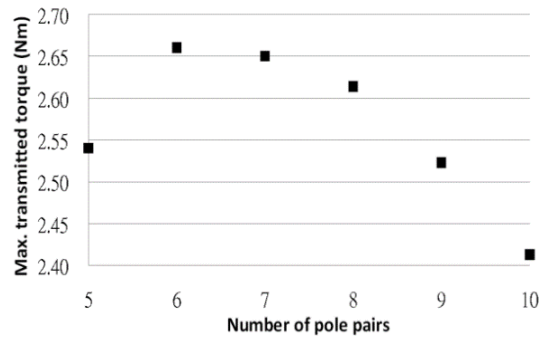
Gambar 2.15 *External magnetic gear* dengan magnet berbentuk persegi panjang

Tabel 2.3 Spesifikasi magnet dan dimensi *external magnetic gear*

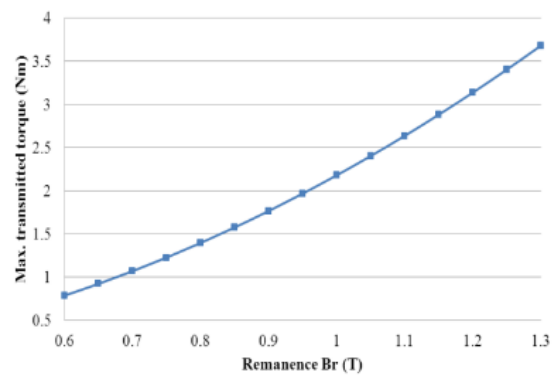
NdFeB (N-35) Magnet		
<i>Items</i>	<i>Symbol</i>	<i>Values</i>
<i>Remenence</i>	Br	1,15
<i>Relative permeability</i>	μ_r	1,09
<i>Magnet width (mm)</i>	w_m	10,70
<i>Magnet height (mm)</i>	h	5,00
<i>Number of pole pairs</i>	n	6
<i>Geometric dimensions of the gear set</i>		
<i>Items</i>	<i>Symbol</i>	<i>Values</i>
<i>Inner radius of the iron yoke (mm)</i>	R1	15,00
<i>Outer radius of the iron yoke (mm)</i>	R2	20,00
<i>Air gap length (mm)</i>	g	1,50
<i>Length of pole pitch (mm)</i>	τ	11,78
<i>Ratio of pole width to pole pitch</i>	α_e	0,91

Setelah dilakukan analisis 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. Pada gambar 2.16 (a) kurva menunjukkan peningkatan torsi yang dihasilkan kemudian terjadi penurunan torsi seiring bertambahnya jumlah *pole*. Hal tersebut dikarenakan kuat medan magnet merupakan fungsi yang meningkat secara perlahan terhadap bertambahnya jumlah *pole*, namun luas permukaan tiap kutub berkurang seiring bertambahnya jumlah *pole*. Oleh karena itu, kombinasi kedua efek tersebut menghasilkan puncak maksimum. Untuk hubungan antara jarak *air gap* terhadap

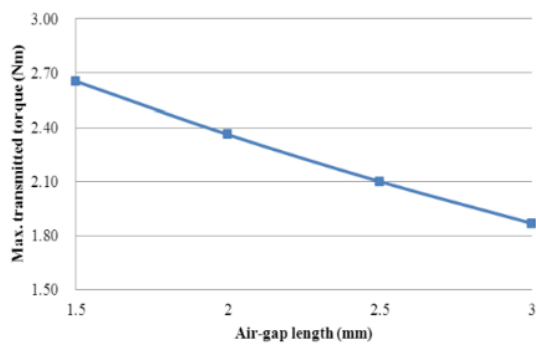
torsi maksimum yaitu menurun seiring bertambahnya jarak *air gap*, sedangkan hubungan antara *remanence* terhadap torsi maksimum yaitu naik seiring makin besarnya nilai dari *remanence* magnet permanen yang digunakan [Wu et al., 2015].



(a)



(b)



(c)

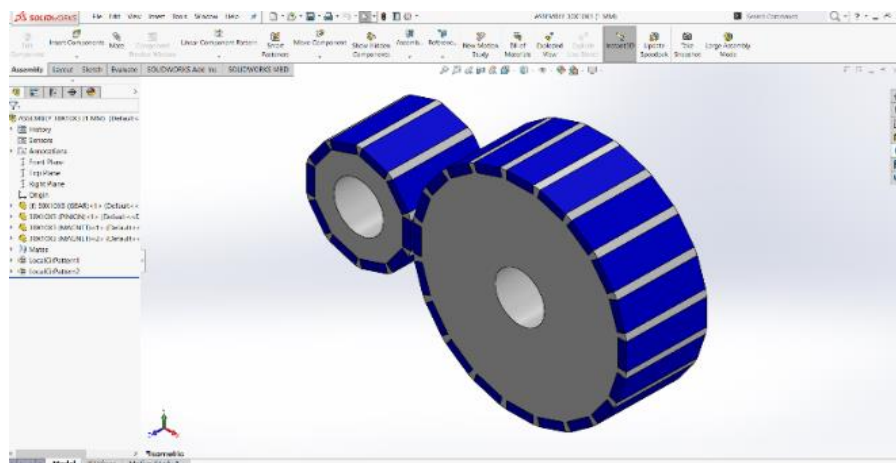
Gambar 2.16 (a) Hubungan antara torsi dengan jumlah pasangan magnet permanen (b) Hubungan antara torsi dengan remanence magnet (c) Hubungan antara torsi dengan jarak air gap

2.5.2 Metode Numerik dan Eksperimen *External Magnetic Spur Gear*

Pada tahun 2021, Gilang Samudra melakukan penelitian dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi Air Gap dan Jumlah Pole dengan Volume Magnet Konstan Terhadap Torsi yang Dihasilkan pada Radial External Magnetic Spur Gear”. Penelitian yang dilakukan oleh Saudara Gilang ini akan menjadi referensi utama pada penelitian yang dilakukan oleh penulis. Penelitian Saudara Gilang memiliki tujuan untuk mengetahui pengaruh variasi jumlah *pole* dan *air gap* dengan volume magnet konstan terhadap torsi yang dihasilkan melalui *finite element method* (FEM) dan uji eksperimen. Berikut ini merupakan pemodelan *magnetic gear* yang digunakan pada penelitian ini. *Magnetic gear* pada penelitian ini menggunakan variasi pasangan jumlah pole 4-10, variasi air gap 1,2 mm – 1,6 mm.

Tabel 2.4 Model magnetic gear yang digunakan

Dimensi <i>high speed</i> (HS) <i>gear</i>	Diameter (mm)	40
	Diameter lubang poros (mm)	18,5
	Tebal (mm)	30
Dimensi <i>low speed</i> (LS) <i>gear</i>	Diameter (mm)	80
	Diameter lubang poros (mm)	18,5
	Tebal (mm)	30
Jumlah <i>pole</i> (HS <i>gear</i> -LS <i>gear</i>)	4-8 <i>pole</i>	Magnet 30x10x7,5 mm
	6-12 <i>pole</i>	Magnet 30x10x5 mm
	10-20 <i>pole</i>	Magnet 30x10x3 mm
Jarak antar <i>gear</i> (<i>air gap</i>)	Variasi 1	0,6 mm
	Variasi 2	0,8 mm
	Variasi 3	1 mm



Gambar 2.17 Desain 3D *magnetic gear*

Setelah itu, ditentukan material magnet dan gear yang digunakan pada *magnetic gear* tersebut. Berikut ini adalah *material properties* dari magnet dan gear pada *magnetic gear*.

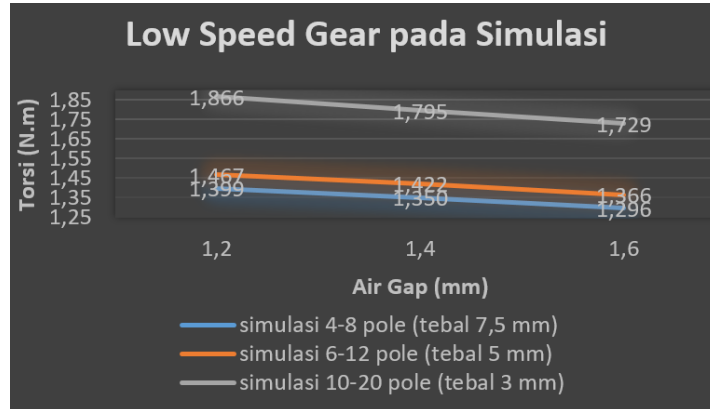
Tabel 2.5 *Material properties* magnet dan gear pada *magnetic gear*

<i>Properties NdFeb N35</i>	Nilai
<i>Remanence (T)</i>	1,15
<i>Relative permeability</i>	1,09977
<i>Mass Density (kg/m³)</i>	7400
<i>Currie Temperature (°C)</i>	310
<i>Properties PLA</i>	Nilai
<i>Density (g/cm³)</i>	1,3
Temperatur leleh (°C)	173
<i>Tensile Strenght (MPa)</i>	37
Elongasi	6%
<i>Flextural Modulus (GPa)</i>	4

Berikut ini merupakan hasil yang didapatkan dari metode yang telah digunakan pada penelitian ini untuk menganalisa bagaimana transmisi torsi yang dihasilkan dari pasangan *magnetic gear* yang telah dirancang:

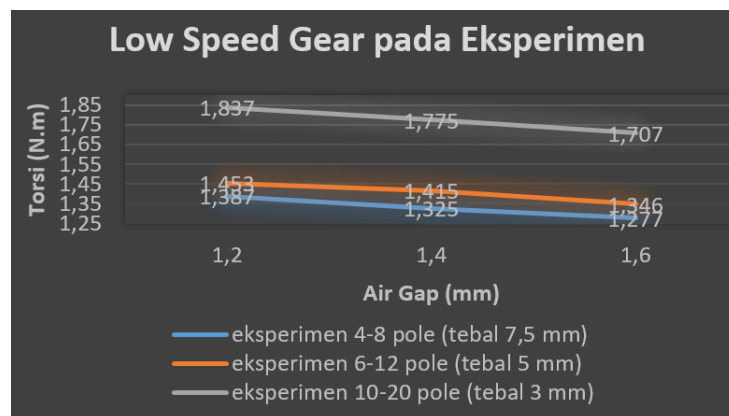
1. Hasil pertama adalah terkait nilai torsi yang dihasilkan dari rancangan *magnetic gear* melalui metode *finite element*. Nilai torsi yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan penambahan variasi jumlah *pole* magnet. Akan tetapi, nilai torsi tersebut akan menurun seiring dengan penambahan variasi *air gap* yang

digunakan. Nilai torsi terbesar yang dihasilkan adalah 1,86 Nm dengan jumlah pasangan *pole* 10, dan variasi *air gap* 1,2 mm.



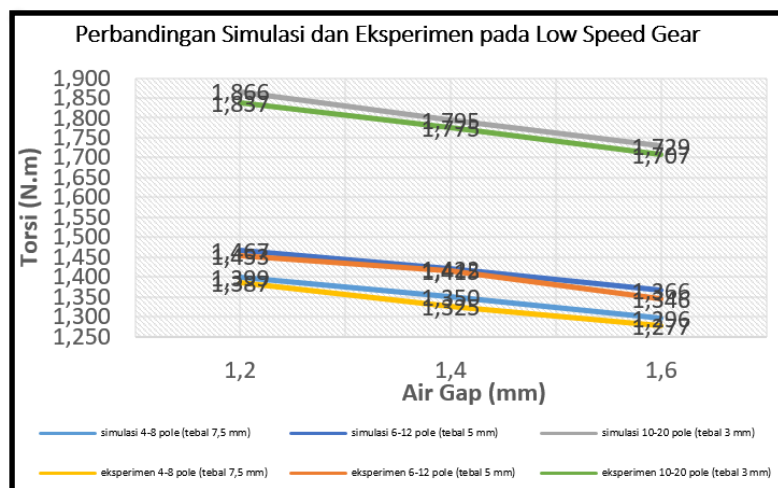
Gambar 2.18 Grafik torsi pada *magnetic gear* terhadap variasi jumlah *pole* dan *air gap* dengan metode *finite element*

2. Hasil berikutnya adalah terkait nilai torsi yang dihasilkan dari rancangan *magnetic gear* melalui uji eksperimen. Hasil uji eksperimen pada penelitian ini menunjukkan *trendline* yang identik dengan hasil menggunakan metode *finite element*. Nilai torsi yang dihasilkan akan meningkat seiring dengan penambahan variasi jumlah *pole* magnet. Akan tetapi, nilai torsi tersebut akan menurun seiring dengan penambahan variasi *air gap* yang digunakan. Nilai torsi terbesar yang dihasilkan adalah 1,837 Nm dengan jumlah pasangan *pole* 10, dan variasi *air gap* 1,2 mm.



Gambar 2.19 Grafik torsi pada *magnetic gear* terhadap variasi jumlah *pole* dan *air gap* dengan uji eksperimen

3. Setelah dilakukan analisis dari hasil *finite element* dan eksperimen, selanjutnya hasil dari keduanya dibandingkan untuk variasi jumlah *pole* dan *air gap* yang sama. Terlihat bahwa nilai torsi maksimum pada metode finite element sekitar 0,5-2% lebih besar dibandingkan nilai torsi maksimum pada metode eksperimen.



Gambar 2.20 Grafik perbandingan hasil *finite element* dan uji eksperimen

Tabel 2.6 Perbandingan hasil finite element dan uji eksperimen

Jumlah Pole	Air Gap (mm)	Torsi Simulasi (N.m)	Torsi Eksperimen (N.m)	Error (%)
4-8	1,2	1,399	1,387	0,858
4-8	1,4	1,350	1,325	1,852
4-8	1,6	1,296	1,277	1,466
6-12	1,2	1,467	1,453	0,954
6-12	1,4	1,422	1,415	0,492
6-12	1,6	1,366	1,346	1,464
10-20	1,2	1,866	1,837	1,616
10-20	1,4	1,795	1,775	1,114
10-20	1,6	1,729	1,707	1,272

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan dari metode *finite element* dan uji eksperimen dengan variasi *air gap*, didapatkan torsi terendah dihasilkan oleh *air gap* terbesar yaitu 1,6 mm. Sedangkan torsi tertinggi dihasilkan oleh *air gap* terkecil

yaitu 1,2 mm. Semakin mengecilnya *air gap* membuat torsi maksimum yang dapat disalurkan semakin meningkat. Hal tersebut disebabkan *flux density* pasangan *pole* yang saling berinteraksi akan meningkat. Hal ini dapat terjadi karena nilai magnetisasinya lebih besar.

Sementara itu, hasil lainnya dengan variasi jumlah *pole* menunjukkan bahwa saat jumlah *pole* semakin banyak, maka ketebalan *pole* berkurang. Hal ini diterapkan dengan tujuan mempertahankan volume magnet yang digunakan agar tetap sama. Nilai torsi yang dihasilkan menunjukkan bahwa walaupun ketebalan *pole* semakin berkurang, namun *magnetic gear* tetap menghasilkan nilai torsi yang semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *pole*. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa jumlah *pole* mempunyai pengaruh yang lebih signifikan terhadap kemampuan *magnetic gear* dibandingkan dengan ketebalan *pole*. Dimana jumlah *pole* ini berpengaruh terhadap besar torsi yang dapat ditransmisikan oleh *magnetic gear*.

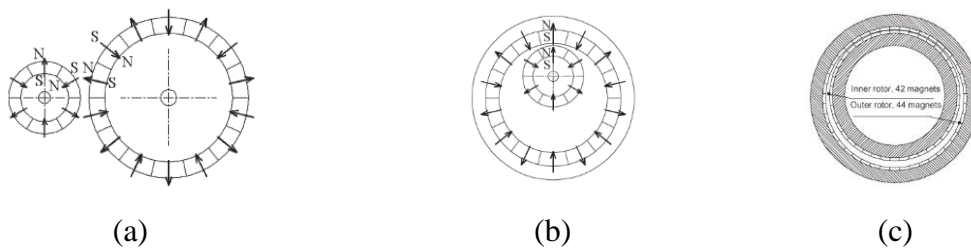
Torsi maksimum terjadi ketika posisi *magnetic gear* berada pada setengah sudut *pitch pole*. Jumlah *pole* yang semakin banyak membuat jarak antar *pole* pada sekeliling *gear* semakin dekat. Dimana dengan semakin dekatnya jarak antar *pole* ketika pasangan *magnetic gear* pada posisi setengah sudut *pitch pole* membuat permukaan *pole* yang saling mengalami interaksi semakin luas sehingga torsi maksimum yang mampu ditransmisikan *magnetic gear* semakin besar walaupun ketebalan dari *pole* semakin mengecil.

Selain itu, terlihat bahwa nilai torsi maksimum pada metode *finite element* sekitar 0,5-2% lebih besar dibandingkan nilai torsi maksimum dengan uji eksperimen. Terjadinya selisih antara nilai torsi pada *finite element* dan eksperimen dikarenakan ukuran antara magnet yang digunakan pada metode eksperimen sedikit lebih kecil dibandingkan ukuran magnet pada metode *finite element*, sehingga volume magnet yang digunakan pada metode eksperimen lebih kecil. Selain itu, hal tersebut juga dikarenakan setiap sudut magnet pada uji eksperimen berbentuk *fillet*, sementara pada *finite element* tidak berbentuk *fillet*. Hal tersebut mengakibatkan volume magnet tiap *pole* tidak sama antara metode *finite element* dan eksperimen [Gilang, 2021].

2.5.3 Metode Analitik, Numerik, dan Eksperimen *Cycloid Permanent Magnet Gear*

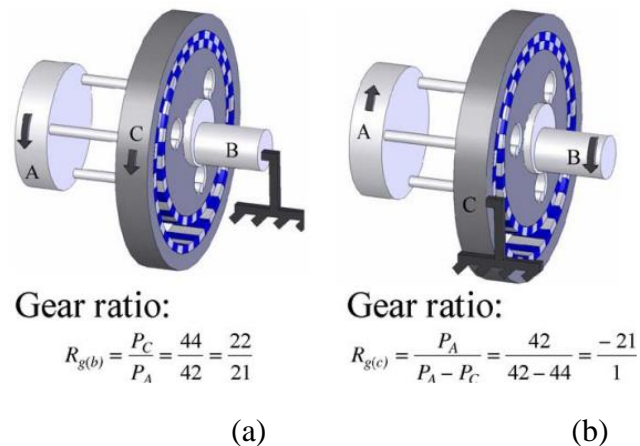
Penelitian berikutnya yang menjadi referensi penulis dalam penelitian ini adalah penelitian yang dilakukan oleh Jorgensen dkk. pada tahun 2008. Penelitian tersebut berjudul “*The Cycloid Permanent Magnetic Gear*”. Pada penelitian ini dilakukan perkembangan model dari pasangan *external magnetic spur gear* menjadi model *cycloid magnetic gear*. Pengembangan *model magnetic gear* ini dilatar belakangi oleh banyaknya magnet *inactive* pada pasangan *external magnetic gear*, dimana magnet *inactive* tersebut tidak dapat dimaksimalkan potensinya untuk berperan dalam menghasilkan *flux magnet* yang berpengaruh terhadap besar torsi yang bisa dihasilkan dari pasangan *magnetic gear*. Selain itu, pengembangan model magnet gear ini juga dilatar belakangi oleh keinginan untuk meningkatkan *torque density* dari pasangan *magnetic gear* yang dibentuk.

Ide awal pengembangan model *magnetic gear* ini adalah dengan dibentuknya model *internal magnetic gear*. Dengan model *internal magnetic gear* ini akan didapatkan lebih banyak magnet yang saling berinteraksi, yaitu dari magnet yang terdapat pada *low speed gear* dan juga magnet yang terdapat pada *high speed gear*. Selain itu, dengan model *internal magnetic gear* hanya membutuhkan volume ruang untuk *gear box* yang lebih kecil daripada volume ruang yang dibutuhkan oleh *external magnetic gear*. Hal tersebut dikarenakan *high speed gear* berada di dalam *low speed gear*. Komparasi dari model *internal magnetic gear* dan juga *external magnetic gear* ditunjukkan pada Gambar 2.21.



Gambar 2.21 (a) *External magnetic gear* (b) *Internal magnetic gear* (c) *Internal magnetic gear* dengan interaksi antar magnet yang tinggi dan rasio gear yang rendah

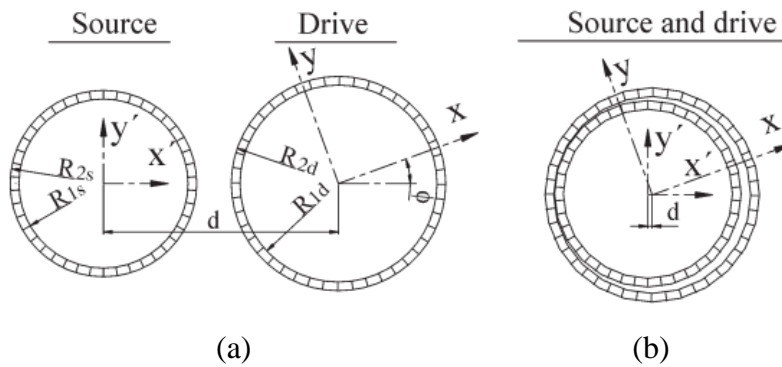
Model magnetic gear pada Gambar 2.21 (c) merupakan model *internal magnetic gear* yang melibatkan banyak magnet yang saling berinteraksi antara magnet yang berada pada *high speed gear* dan juga magnet yang berada pada *low speed gear*. Hal tersebut bisa didapatkan karena rasio diameter antara *high speed gear* dan *low speed gear* mendekati 1:1. Dengan banyaknya magnet yang saling berinteraksi ini akan mengakibatkan pasangan *magnetic gear* bisa menghasilkan torsi yang lebih besar. Namun konsekuensi dari model seperti ini adalah pasangan *magnetic gear* tersebut memiliki rasio putaran yang sangat kecil. Untuk mengatasi hal ini, maka lahirlah ide dengan memodifikasi model *internal magnetic gear* ini menjadi *cycloidal magnetic gear*. Dengan model *cycloidal magnetic gear* ini maka akan dihasilkan pasangan magnetic gear yang memiliki torsi yang lebih besar dari pada model *external magnetic gear* dan juga memiliki rasio putaran yang besar antara poros *input* dan *output*. Model *cycloidal magnetic gear* ini ditunjukkan pada Gambar 2.22.



Gambar 2.22 (a) *Internal magnetic gear* (b) *Cycloidal magnetic gear*

Dalam penelitian ini disebutkan bahwa nilai torsi yang dapat dihasilkan dari pasangan *cycloidal magnetic gear* hampir setara dengan torsi yang dihasilkan oleh pasangan *internal magnetic gear*. Hanya dilakukan konfersi berdasarkan rasio jumlah pasangan *pole* dari pemodelan analitis torsi *internal magnetic gear* untuk menjadi pemodelan analitis torsi *cycloidal magnetic gear*. Oleh karena itu, pemodelan yang dilakukan oleh Jorgensen dkk. ini menjadi salah satu referensi yang penulis ambil dalam melakukan pendekatan untuk pemodelan analitis dari pasangan *internal magnetic gear*.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Jorgensen ini disebutkan bahwa sebenarnya pemodelan analitis dalam menganalisa torsi dari pasangan *magnetic spur gear*, baik itu internal ataupun *external* sebenarnya dimulai dari persamaan umum. Selanjutnya Jorgensen dkk. menyebutkan bahwa perbedaan dalam pemodelan analitis tersebut terletak pada konfersi nilai jarak antara poros *high speed* dan *low speed gear* seperti pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 (a) Sistem koordinat *magnetic spur gear* (b) Sistem koordinat *cycloidal magnetic gear*

Selanjutnya dilakukan pemodelan analitis untuk merumuskan bagaimana medan magnet dan torsi yang dihasilkan dari pasangan magnet tersebut. Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa model *cycloidal magnetic gear* ini tetap merupakan salah satu jenis dari *model magnetic spur gear*. Sehingga persamaan yang digunakan untuk menganalisa *cycloidal magnetic gear* ini tetap merujuk kepada persamaan yang terdapat dalam analisa *magnetic spur gear* secara general. Berikut persamaan yang digunakan oleh Jorgensen dkk. dalam menganalisa medan magnet dan torsi dari pasangan *magnetic spur gear*.

A. Perumusan Medan Magnet

Besar medan magnet dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$B_r^{(2)}, (r', \phi', v) = \mu_0 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{2} i N_p r'^{-\left(\frac{1}{2} i N_p + 1\right)} \times U_i^{(2)}(v) \cos\left(\frac{1}{2} N_p i \phi'\right) \quad (2.10)$$

$$B_{\phi'}^{(2)}, (r', \phi', v) = \mu_0 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{2} i N_p r'^{-\left(\frac{1}{2} i N_p + 1\right)} \times U_i^{(2)}(v) \sin\left(\frac{1}{2} N_p i \phi'\right) \quad (2.11)$$

Berikut ini merupakan persamaan dari parameter-parameter yang digunakan dalam perumusan medan magnet tersebut:

$$U_i^{(2)}(v) = -2\mu_0 \frac{H_{ri}(v)}{L_i(v)} M_{ri} - 2\mu_0 \frac{H_{\phi i}(v)}{L_i(v)} M_{\phi i} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} H_{ri}(v) = & R_{2s}\mu_0(R_{2s}^{(N_p i)})^{\frac{3}{2}} N_p i + 2R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu \\ & - R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu_0 N_p i - 2\sqrt{R_{1s}^{(N_p i)}} \mu R_{1s} R_{2s}^{(N_p i)} N_p i \\ & - 2R_{2s}\mu \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} + 4\sqrt{R_{1s}^{(N_p i)}} R_{2s}^{(N_p i)} \mu_0 R_{1s} \\ & + R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu N_p i - 2R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu_0 \\ & - 2R_{2s}\mu_0 \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} + R_{2s}\mu \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} N_p i \end{aligned} \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} H_{\phi i}(v) = & -R_{2s}\mu_0(R_{2s}^{(N_p i)})^{\frac{3}{2}} N_p i - 4\sqrt{R_{1s}^{(N_p i)}} \mu R_{1s} R_{2s}^{(N_p i)} \\ & - R_{2s}\mu \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} N_p i + 2R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu \\ & - 92R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu_0 + R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu N_p i \\ & + 2\sqrt{R_{1s}^{(N_p i)}} R_{2s}^{(N_p i)} \mu_0 N_p i R_{1s} + 2R_{2s}\mu \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} \\ & + 2R_{2s}\mu_0 \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} - R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu_0 N_p i \end{aligned} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} L_i(v) = & \left[(-2 + N_p i) \left[(-2 + N_p i) \right. \right. \\ & \times \left[-2\mu\mu_0 R_{2s}^{(N_p i)} - 2\mu\mu_0 R_{1s}^{(N_p i)} - \mu^2 R_{2s}^{(N_p i)} + \mu^2 R_{1s}^{(N_p i)} \right. \\ & \left. \left. - \mu_0^2 R_{2s}^{(N_p i)} + \mu_0^2 R_{1s}^{(N_p i)} \right] \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} M_{ri} = & \frac{B_r}{\mu_0 \pi} \frac{2N_p}{1 - \left(\frac{1}{2} i N_p\right)^2} \\ & \times \left[\sin\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} i\right) - \frac{1}{2} i N_p \cos\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} i\right) \right] \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$M_{\phi i} = \frac{B_r}{\mu_0 \pi} \frac{2N_p}{1 - \left(\frac{1}{2}iN_p\right)^2} \times \left[\cos\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}i\right) - \frac{1}{2}iN_p \sin\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}i\right) \right] \quad (2.17)$$

B. Perumusan Torsi

Untuk nilai torsi yang dihasilkan dari pasangan *magnetic gear* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T(R_{2s}, R_{1s}, R_{2d}, R_{1d}, d) = T_r(\mathbf{v}) + T_{t1}(\mathbf{v}) + T_{t2}(\mathbf{v}) \quad (2.18)$$

$$T_r(\mathbf{v}) = \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right) L(R_{2d} - R_{1d})}{N_r} \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) r(q, \mathbf{v}) \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} & \times \left[\cos\left(\phi_{edge}(\phi, p)\right) B_x^{ext}(r(q), \phi_{edge}(\phi, p), \mathbf{v}) \right. \\ & \left. + \sin\left(\phi_{edge}(\phi, p)\right) B_y^{ext}(r(q), \phi_{edge}(\phi, p), \mathbf{v}) \right] \\ T_{t1}(\mathbf{v}) &= \frac{-M_s L R_{1d}^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}}\right)}{N_t} \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \\ & \times \left[\cos\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_x^{ext} \right. \\ & \times \left(R_{1d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi, \mathbf{v} \right) \\ & \left. + \sin\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_y^{ext} \right. \\ & \left. \times \left(R_{1d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi, \mathbf{v} \right) \right] \quad (2.20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{t2}(v) = & \frac{M_s L R_{2d}^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}} \right)}{N_t} \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \\
& \times \left[\cos \left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) B_x^{ext} \right. \\
& \times \left(R_{2d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi, v \right) \\
& + \sin \left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi \right) B_y^{ext} \\
& \left. \times \left(R_{2d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi, v \right) \right] \tag{2.21}
\end{aligned}$$

Dengan parameter-parameter yang digunakan dalam analisa torsi sebagai berikut:

$$\theta(q) = \frac{-\pi}{N_{pole}} + \frac{q}{N_t} \frac{2\pi}{N_{pole}} \tag{2.22}$$

$$r(q, v) = R_{1d} + \frac{q}{N_r} (R_{2d} - R_{1d}) \tag{2.23}$$

$$\phi_{edge}(p) = \phi + \frac{\pi}{N_{pole}} (1 + 2p) \tag{2.24}$$

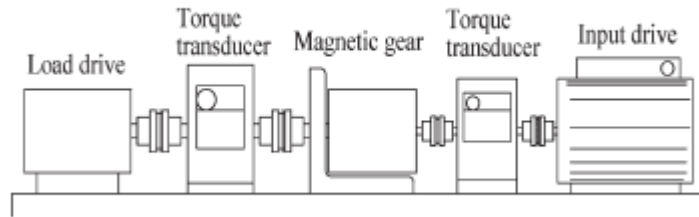
Berikut ini merupakan tabel nilai parameter yang digunakan pada penelitian Jorgensen dkk.

Tabel 2.7 Parameter yang digunakan pada penelitian Jorgensen

Symbol	Dimensions for analytical model		
	Description	Size	Units
T_{Cyc}	Cycloid gear torque Figure 3c.	43.91	Nm
T_{in}	Spur gear torque [2], Figure 3b.	46	Nm
R_{2s}	Outer radius, source magnets ^a	53.5	mm
R_{1s}	Inner radius, source magnets	48.5	mm
R_{2d}	Outer radius, drive magnets	61.5	mm
R_{1d}	Inner radius, drive magnets	56.5	mm
D	Distance between center points	2.5	mm
\mathbf{V}	Vector containing opt. variables		-
L	Length/height of the magnets	26	mm
B_r	Remanence flux	1.21	T
$H_c = M_s$	Coercivity	915000	A/m
I	Harmonic parameter, max value.	4	-
$N_r = N_t$	Torque integration parameter	10	-
μ_0	Permeability for air regions	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	Tm/A
$\mu = B_r/H_c$	Permeability, magnets	$13.22 \cdot 10^{-7}$	Tm/A
$\mu_r = \mu/\mu_0$	Relative permeability, magnets	1.0523	-
$N_p = P_A$	Number of source pole magnets	42	-
$N_{pole} = P_C$	Number of drive pole magnets	44	-
ϕ	Max. torque calculation angle	4.09	Deg.

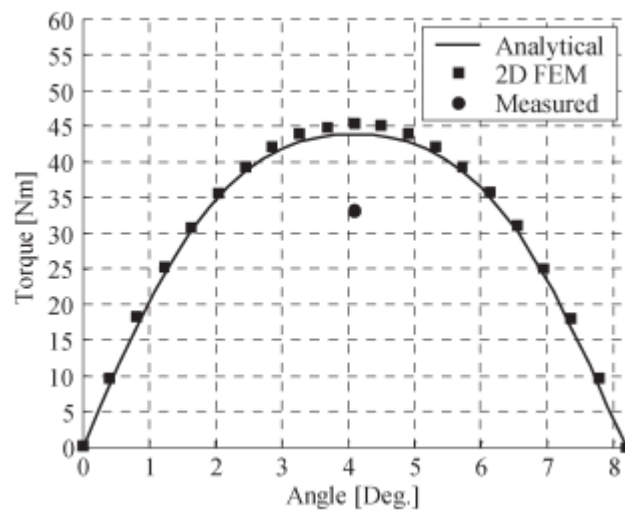
a. The index s and b are used for source and drive magnets. (Figure 4)

Selain menganalisa dengan metode analitis, pada penelitian yang dilakukan oleh Jorgensen ini juga menggunakan metode numerik 2D dan juga metode eksperimen. Pada metode eksperimen dibuat pemodelan yang lebih sederhana dengan menggunakan magnet permanen berbentuk balok. Magnet permanen pada eksperimen ini memiliki bentuk yang berbeda dengan magnet yang ada pada analitis dan numerik. Magnet permanen pada metode analitis dan numerik memiliki bentuk berupa *ring* ataupun silinder. Pada Gambar 2.24 ditunjukkan skema eksperimen yang dilakukan pada penelitian ini.

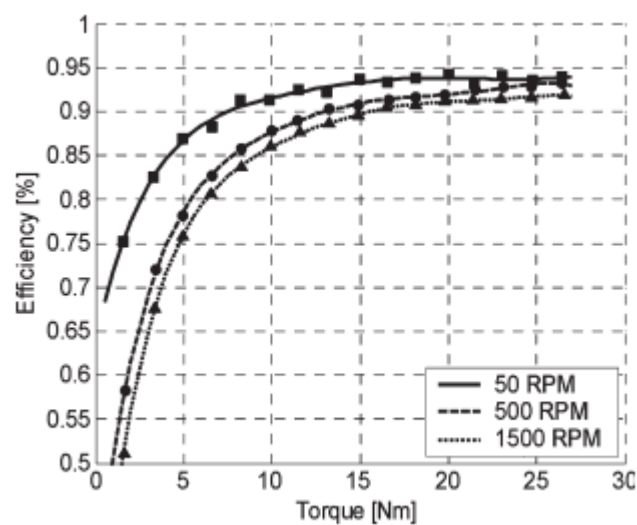


Gambar 2.24 Skema eksperimen *cycloidal magnetic gear*

Pada Gambar 2.25 dan Gambar 2.26 merupakan hasil analisa torsi dan efisiensi dari pasangan *cycloidal magnetic gear* yang dibentuk pada penelitian ini.



Gambar 2.25 Torsi *cycloidal magnetic gear*



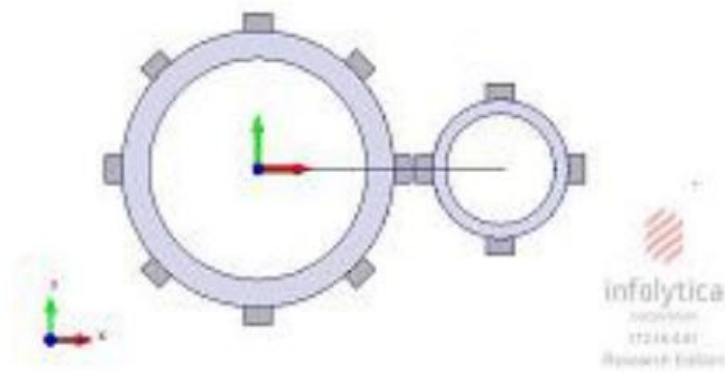
Gambar 2.26 Efisiensi *cycloidal magnetic gear*

Berdasarkan Gambar 2.25 dapat diketahui bahwa hasil torsi dari pemodelan analitis dan numerik memiliki hasil yang cenderung sama. Namun, hasil dari eksperimen menunjukkan nilai torsi yang lebih kecil apabila dibandingkan dengan metode analitis dan numerik. Hal ini dikarenakan pada pemodelan analitis dan numerik terdapat banyak batasan masalah, dan yang utama adalah pemodelan analitis dan numerik masih sebatas pemodelan 2D. Oleh karena itu, banyak batasan masalah yang diterapkan pada pemodelan analitis dan numerik. Berdasarkan hasil eksperimen didapatkan hasil torsi maksimum dari *cycloidal magnetic gear* sebesar 33 Nm, dan *torque density* sebesar 141,9 N.m/L. Nilai *torque density* dari pasangan *cycloid magnetic gear* ini diklaim 40% lebih besar dibandingkan dengan *planetary magnetic gear* yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya.

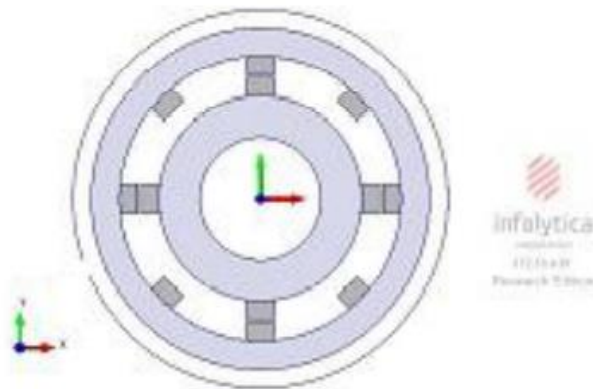
Sementara itu, berdasarkan Gambar 2.26 dapat diketahui bahwa efisiensi dari *cycloid magnetic gear* ini terbilang cukup baik. Efisiensi terbesar dapat dicapai dengan kecepatan putaran rendah, dan torsi yang tinggi. Pada penelitian Jorgensen ini efisiensi *cycloid magnetic gear* terbesar dicapai dengan putaran 50 rpm, yaitu menghasilkan efisiensi sebesar 94% [Jorgensen et al., 2008].

2.5.4 Analisa Torsi pada Berbagai Jenis *Magnetic Spur Gear*

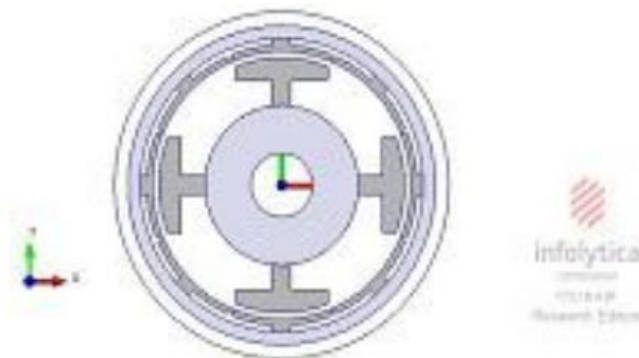
Penelitian selanjutnya yang menjadi referensi penulis dalam melakukan penelitian ini adalah penelitian yang dilakukan oleh Murunganandam dkk. dengan judul "*Torque Analysis of Magnetic Spur Gear with Different Configuratio*s". Pada penelitian ini dilakukan analisa komparasi performa dari 3 jenis *magnetic gear* yang berbeda-beda. Dalam komparasi performa tersebut digunakan parameter torsi yang dihasilkan dari 3 jenis *magnetic spur gear* yang berbeda-beda ini. Model *magnetic spur gear* yang digunakan pada penelitian ini adalah *external magnetic spur gear*, *coaxial magnetic spur gear* dengan magnet berbentuk balok, dan juga *coaxial magnetic spur gear* dengan magnet berbentuk ring ataupun silinder. Selain itu, pada penelitian ini juga divariasikan 2 jenis magnet permanen yang digunakan pada *magnetic spur gear*, dan juga 3 variasi *air gap* antara *high speed gear* dan *low speed gear*. Magnet yang digunakan adalah magnet dengan jenis Sm2Co17 dan juga NdFeB. Pada Gambar 2.27 ditunjukkan model dari *magnetic spur gear* yang digunakan pada penelitian ini.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.27 (a) *External magnetic spur gear* (b) *Coaxial magnetic spur gear* dengan magnet berbentuk balok (c) *Coaxial magnetic spur gear* dengan magnet berbentuk ring

Pada penelitian ini digunakan metode analitis dan juga numerik untuk menganalisa torsi yang dihasilkan oleh setiap pasangan *magnetic spur gear*. Berikut

ini merupakan pemodelan analitis untuk menghitung torsi secara umum dari pasangan *magnetic spur gear* yang digunakan pada penelitian ini:

$$T(\theta) = -\frac{\partial W(\theta)}{\partial(\theta)} \quad (2.25)$$

Dimana :

$W(\theta)$ = Energi magnetik

$$W(\theta) = \frac{1}{2\mu_0} \oint_V B^2 dV \quad (2.26)$$

Dimana :

μ_0 = Permeabilitas vakum

V = Volume *air gap*

B = *Magnetic flux density* pada *air gap*

Sementara itu, diferensial volume dari *air gap* ditunjukkan dengan persamaan di bawah ini:

$$\Delta v = L_s l_{g1} \left(2r_{g1} \pi \frac{d\delta}{2\pi} \right) = L_s l_{g1} r_{g1} d\delta \quad (2.27)$$

Maka persamaan energi magnetik menjadi :

$$W(\theta) = \frac{L_s l_{g1} r_{g1}}{2\mu_0} \oint_V B^2 d\delta \quad (2.28)$$

Dimana :

L_s = Panjang aksial dari *air gap*

l_{g1} = Lebar *air gap* antara *low speed gear* dan *stator pole pieces*

r_{g1} = rata-rata radius *air gap*

Setelah itu bisa didapatkan nilai torsi pada rotor *low speed* dan rotor *high speed* :

$$T_1(\theta) = -\frac{\partial \left[\frac{L_s l_{g1} r_{g1}}{2\mu_0} \oint_V B^2 d\delta \right]}{\partial(\theta)} \quad (2.29)$$

$$T_2(\theta) = -\frac{\partial \left[\frac{L_s l_{g2} r_{g2}}{2\mu_0} \oint_V B^2 d\delta \right]}{\partial(\theta)} \quad (2.30)$$

Dimana :

$T_1(\theta)$ = Torsi yang terdapat pada rotor *low speed*

$T_2(\theta)$ = Torsi yang terdapat pada rotor *high speed*

l_{g1} = Lebar *air gap* antara *high speed gear* dan stator *pole pieces*

r_{g2} = rata-rata radius *air gap*

Dan berikut ini merupakan persamaan nilai torsi yang stabil pada *low speed gear* dan *high speed gear* :

$$T_{LOW} = T_1(\theta) \sin \left[\frac{N_s \beta_0 - p_2 \gamma_0 - p_1 \alpha_0}{p_2} \right] \quad (2.31)$$

$$T_{HIGH} = T_2(\theta) \sin \left[\frac{N_s \beta_0 - p_2 \gamma_0 - p_1 \alpha_0}{p_1} \right] \quad (2.32)$$

Dimana :

p_1 = jumlah pasangan *pole magnet* pada *high speed gear*

p_2 = jumlah pasangan *pole magnet* pada *low speed gear*

β_0 = Inisial *phase angle* dari ring stator

α_0 = Inisial *phase angle* dari *high speed gear*

γ_0 = Inisial *phase angle* dari *low speed gear*

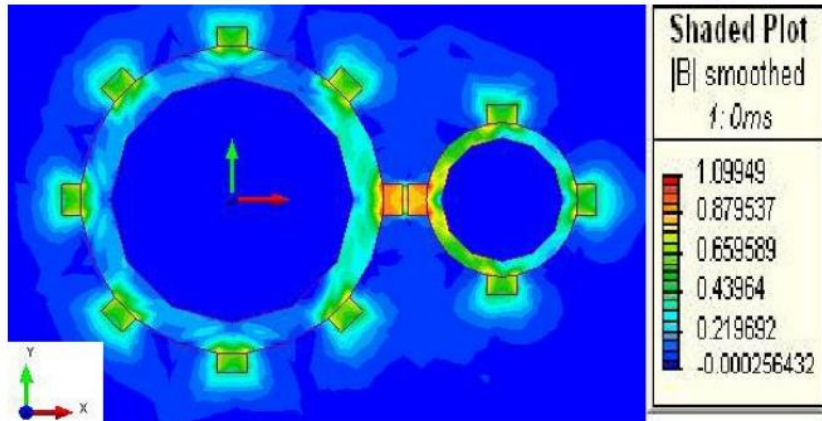
$N_s = p_1 + p_2$

Pada penelitian ini digunakan parameter sebagai berikut:

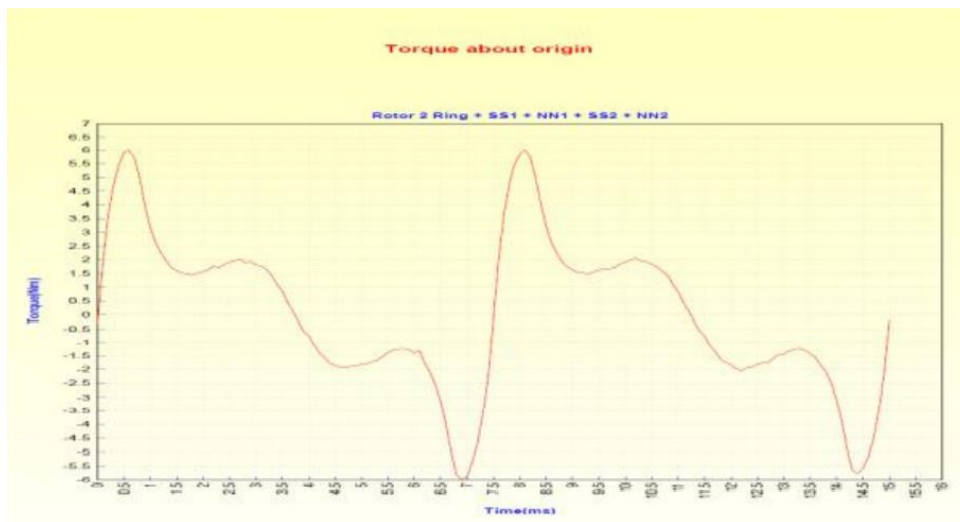
Tabel 2.8 Parameter magnetic spur gear pada penelitian Muruganandam

Description	Units	Spur Gear	Inner type spur Gear	Salient pole type spur Gear
No of low speed rotor poles	-	8	8	8
Outer radius of low speed rotor	mm	28	30	25
Inner radius of low speed rotor	mm	20	21.75	21
No of high speed rotor poles	-	4	4	4
Outer radius of high speed rotor	mm	15.5	10	20
Inner radius of high speed rotor	mm	10	12.5	12.5
Length of the magnetic material	mm	100	100	100
Air gap length	mm	1	1	1
Permanent Magnet material	-	NdFeB & Sm ₂ CO ₁₇		
Permeability of air region (μ_0)	Tm/A	$4\pi \times 10^{-7}$		
Relative permeability of magnets $\mu_r = \mu / \mu_0$	-	1.0523		
Max torque	N.m	6	22.5	30

Hasil metode numerik berupa *flux density* dan juga besar torsi pada setiap model magnetic spur gear, ditunjukkan pada Gambar 2.28 hingga Gambar 2.30.



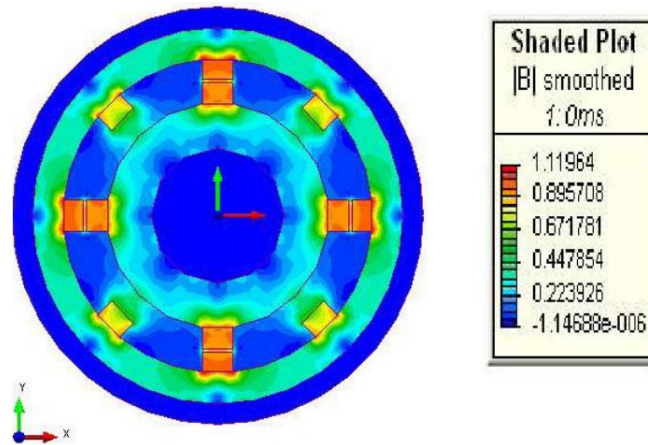
(a)



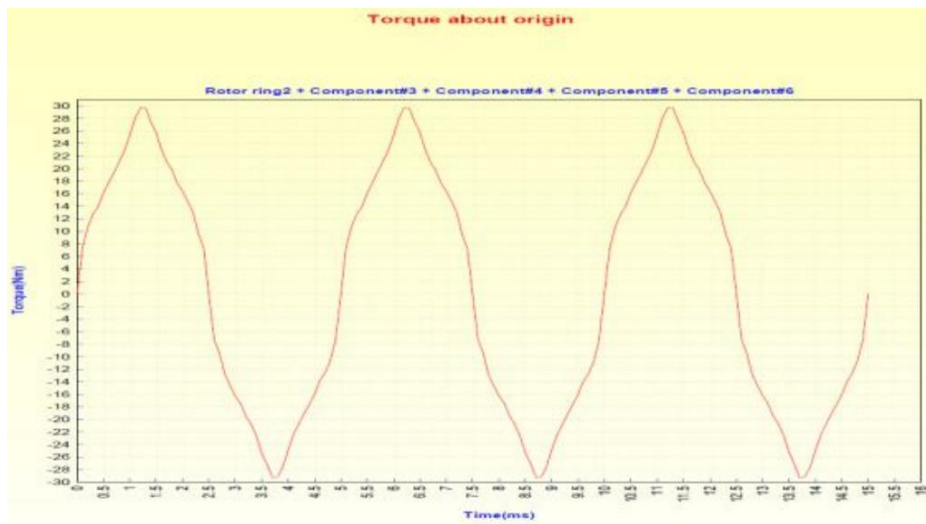
(b)

Gambar 2.28 Analisa numerik pada *external magnetic spur gear* (a) *Flux density*

(b) Torsi

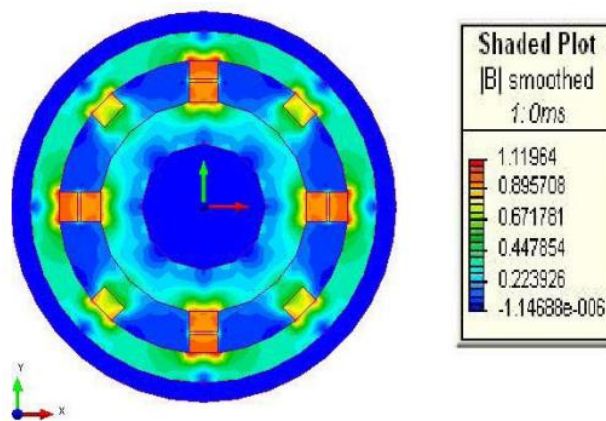


(a)

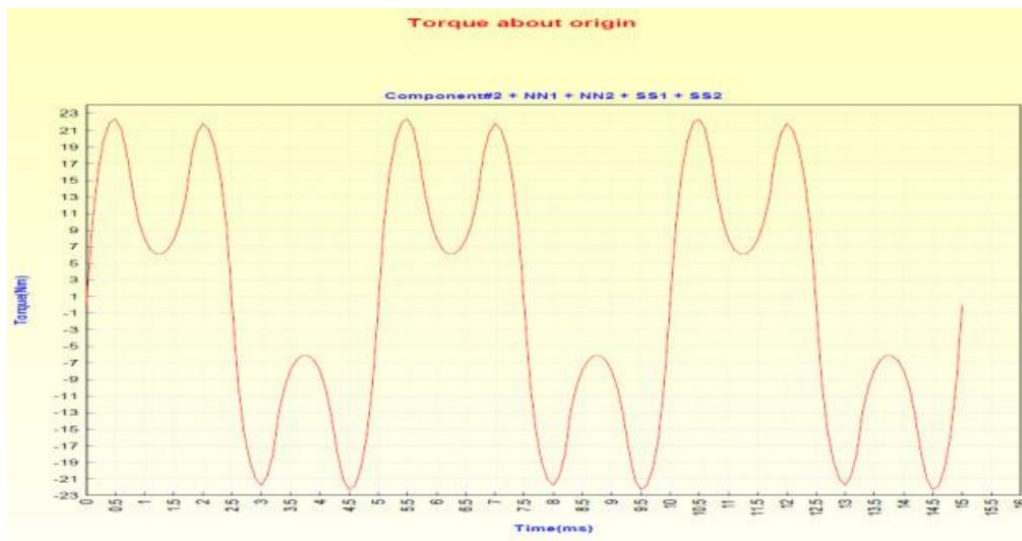


(b)

Gambar 2.29 Analisa numerik pada *coaxial magnetic spur gear* dengan magnet berbentuk balok (a) *Flux density* (b) Torsi



(a)



(b)

Gambar 2.30 Analisa numerik pada *coaxial magnetic spur gear* dengan magnet berbentuk ring (a) *Flux density* (b) Torsi

Tabel 2.9 Ringkasan komparasi nilai torsi maksimum dari 3 jenis *magnetic spur gear*

Types of Magnetic Gear	Sm2Co17			NdFeB		
	1mm	2mm	3mm	1mm	2mm	3mm
Air gap distance						
Torque in Spur Gear (Nm)	5.3	4.3	3.2	6	4.8	3.9
Torque in Inner type spur Gear (Nm)	21.7	20.1	17.9	22.5	20.5	18.7
Torque in Salient pole type spur Gear (Nm)	28.8	25.7	24.2	30.0	26.9	25.3

Berdasarkan analisa numerik yang dilakukan pada penelitian ini didapatkan bahwa model internal *magnetic spur gear* menghasilkan nilai torsi yang lebih besar apabila dibandingkan dengan model *external magnetic spur gear*. Hal tersebut dikarenakan pada model internal jumlah magnet yang saling berinteraksi lebih banyak apabila dibandingkan dengan model *external*. Selain itu, didapatkan hasil dari pengaruh variasi air gap yang menunjukkan bahwa semakin meningkatnya *air gap* antara *high speed* dan *low speed gear* akan menyebabkan nilai torsi semakin turun, dan juga penggunaan jenis magnet permanen NdFeB menghasilkan torsi yang lebih besar dibandingkan dengan penggunaan magnet permanen jenis Sm2Co17 [Muruganandam et al., 2012].

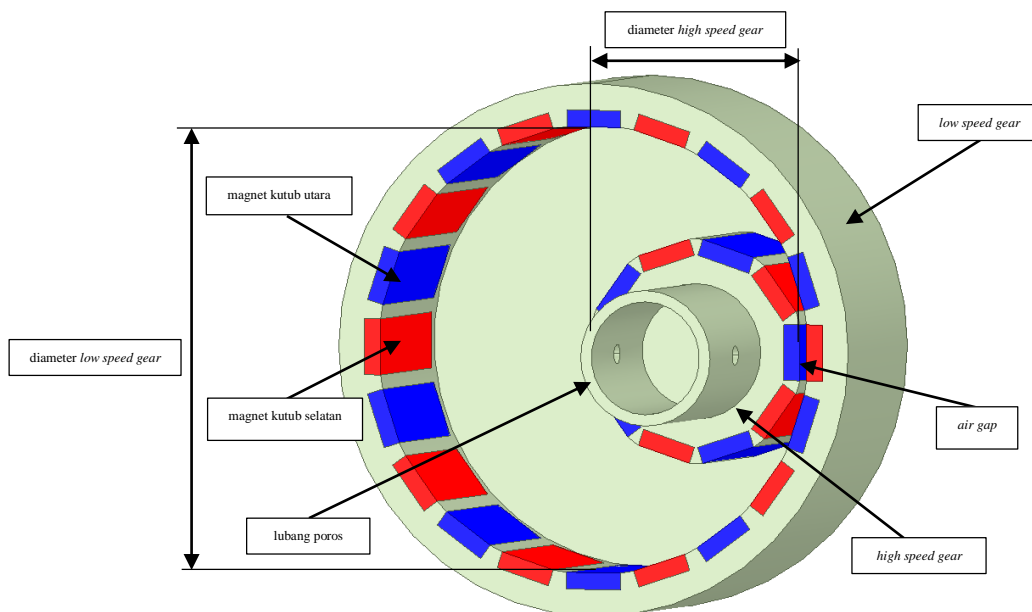
BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai rancangan metode numerik dan eksperimen untuk menganalisa kemampuan *radial internal magnetic spur gear* dalam mentransmisikan torsi.

3.1 Metode Numerik

3.1.1 Pre-Processing

Tahap awal dari metode numerik ini adalah perancangan model 3D *radial internal magnetic spur gear*. Pemodelan 3D *radial internal magnetic spur gear* dilakukan menggunakan *software* SolidWorks. Berikut model *radial internal magnetic spur gear* yang digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.1 3D Model Magnetic Gear

Gambar 3.1 merupakan model 3D *radial internal magnetic spur gear*. Terdapat beberapa bagian utama pada model tersebut, diantaranya adalah *high speed* (HS) gear, *low speed* (LS) gear, magnet permanen, dan juga *air gap* yang ditentukan sesuai rancangan penelitian. Bagian-bagian yang telah dibuat tersebut digabungkan menjadi rangkaian *radial internal magnetic spur gear* melalui mode *assembly* pada *software* Solidworks. Pada proses *assembly* ini nantinya dilakukan

penganturan variasi *air gap* antara LS dan HS, yakni sebesar 1,2 mm; 1,4 mm; dan 1,6 mm. Untuk detail dimensi dari model 3D yang digunakan pada penelitian ini terdapat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Detail Model *Magnetic Gear*

Dimensi <i>high speed</i> (HS) gear	Diameter (mm)	40
	Diameter lubang poros (mm)	18,5
	Tebal (mm)	30
Dimensi <i>low speed</i> (LS) gear	Diameter (mm)	80
	Diameter lubang poros (mm)	18,5
	Tebal (mm)	30
Jumlah <i>pole</i> (HS gear-LS gear)	4-8 <i>pole</i>	Magnet 30x10x7,5 mm
	6-12 <i>pole</i>	Magnet 30x10x5 mm
	10-20 <i>pole</i>	Magnet 30x10x3 mm
Jarak antar gear (<i>air gap</i>)	Variasi 1	0,6 mm
	Variasi 2	0,8 mm
	Variasi 3	1 mm

Setelah melakukan pemodelan *magnetic gear*, maka tahap selanjutnya adalah menentukan jenis material yang digunakan. Material yang perlu ditentukan adalah material untuk *gear blank magnetic gear* dan juga magnet permanen yang digunakan. Pada penelitian ini digunakan material PLA 3D *print* untuk bagian *gear blank*, dan digunakan magnet permanen *neodymium* dengan *grade* N35 sebagai

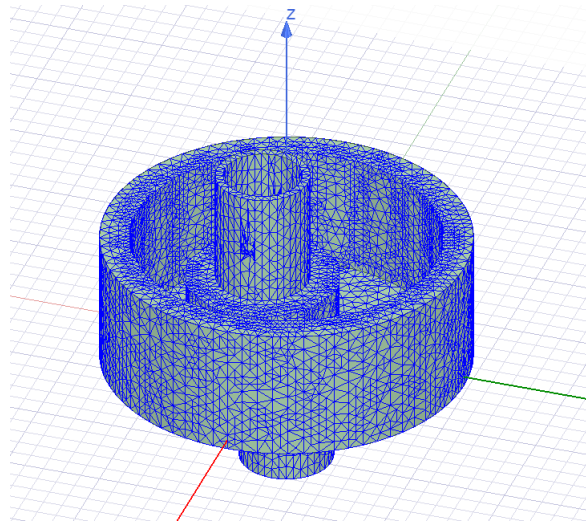
magnet yang akan mengisi *gear blank* tersebut. Untuk material properties dari PLA dan juga magnet permanen neodymium N35 dapat dilihat pada Tabel 3.2

Tabel 3.2 *Material Properties*

Properties NdFeb N35	Nilai
<i>Remanence (T)</i>	1,15
<i>Relative permeability</i>	1,09977
<i>Mass Density (kg/m³)</i>	7400
<i>Currie Temperature (°C)</i>	310
Properties PLA	Nilai
<i>Density (g/cm³)</i>	1,3
Temperatur leleh (°C)	173
<i>Tensile Strenght (MPa)</i>	37
Elongasi	6%
<i>Flextural Modulus (GPa)</i>	4

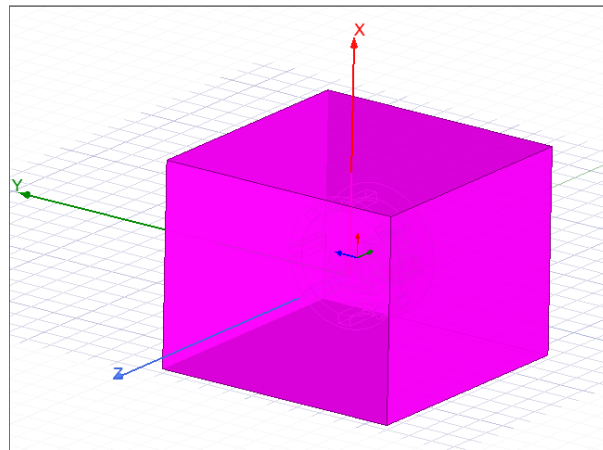
3.1.1 Processing

Proses selanjutnya adalah proses diskritisasi ataupun proses *meshing* dari hasil model 3D *magnetic gear* yang telah dibuat sebelumnya. Proses *meshing* pada penelitian ini menggunakan elemen 3D berbentuk *tetrahedral*. Dalam proses diskritisasi ini perlu dilakukan proses konvergensi untuk mengetahui pengaruh jumlah elemen terhadap hasil numerik yang didapatkan, dan juga untuk menentukan jumlah elemen yang dibutuhkan agar mendapatkan hasil numerik yang konvergen. Skema *auto refinement mesh* digunakan dalam penelitian ini. Dengan skema tersebut elemen yang ada akan mendapatkan perbaikan otomatis dari sistem numerik dengan batasan-batasann yang telah kita tentukan untuk mencapai hasil numerik yang konvergen berdasarkan jumlah elemen yang digunakan. Hasil diskritisasi atau *meshing* pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Hasil *mesh model 3D radial internal magnetic spur gear*

Tahapan *processing* dilanjutkan dengan membentuk *region* sebagai *boundary condition*. *Region* adalah daerah batas dari ruang operasi disekitar *radial internal magnetic spur gear* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. *Region* dibuat dengan cara membuat model 3D yang berbentuk balok bervolume udara diluar komponen *magnetic spur gear* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Hasil pembuatan *region* pada *radial internal magnetic spur gear*

Pada *region* tersebut nantinya juga didefinisikan bagian mana yang akan diberikan input gerakan dan bagian-bagian mana yang akan diamati parameter *output* nya. Pada penelitian ini diberikan input gerakan rotasi pada *high speed gear* sebesar 110 rpm. Sementara itu, *low speed gear* berada dalam keadaan statis.

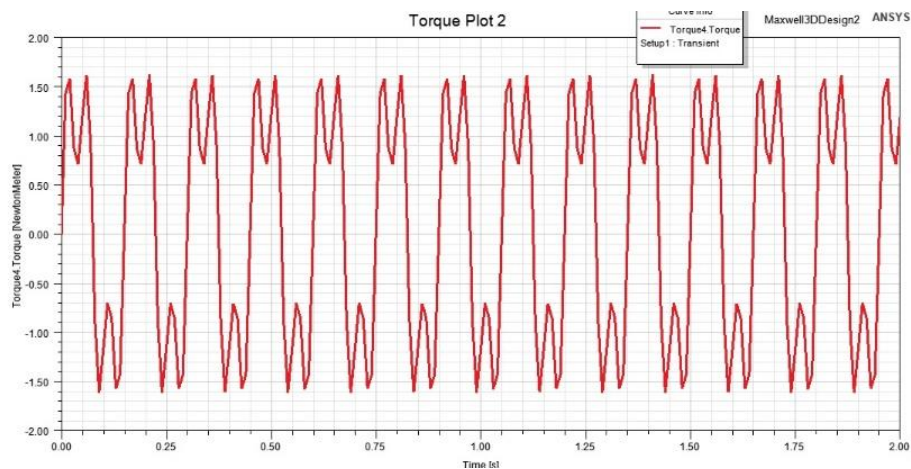
Pengamatan parameter torsi diberikan pada *low speed gear* untuk mengamati besar torsi *output* dari *magnetic gear* ini.

Pada tahap *processing* juga perlu untuk mengatur *setup* jalannya proses perhitungan numerik. *Setup analysis* merupakan langkah pengaturan untuk mendapatkan proses iterasi *mesh* yang mencapai konvergen. Pada penelitian ini digunakan metode *adaptive passes* dengan batasan sebanyak 15 dan persentase *error* sebesar 1%. Pada *analysis setup* ini juga ditentukan lama pengambilan data dan *timestep* pengambilan data. Lama pengambilan data yang digunakan pada penelitian ini adalah 2 detik dan *timestep* pengambilan data setiap 0,001 detik

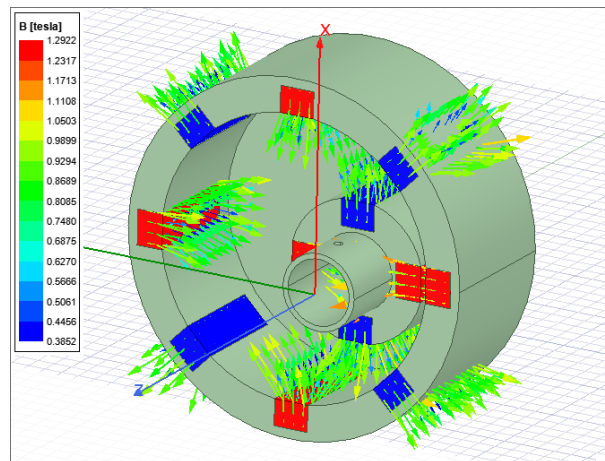
Langkah terakhir pada tahap *processing* ini adalah *iterate*, yakni proses perhitungan untuk mengetahui apakah pengaturan *mesh* yang ditentukan telah mencapai kriteria konvergen. Jika hasil analisis tidak mencapai kriteria untuk dianggap konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada *meshing* yang telah dibuat. Setelah semua tahapan *processing* ini dilakukan, maka selanjutnya dapat dilakukan analisis dengan menjalankan proses perhitungan numerik.

3.1.3 Post-Processing

Tahap *post-processing* merupakan tahap pengambilan data 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 internal magnetic spur gear* seperti pada Gambar 3.4.



(a)



(b)

Gambar 3.4 (a) Grafik torsi dari pasangan *magnetic gear* terhadap waktu; (b) vektor dan besar nilai dari flux density

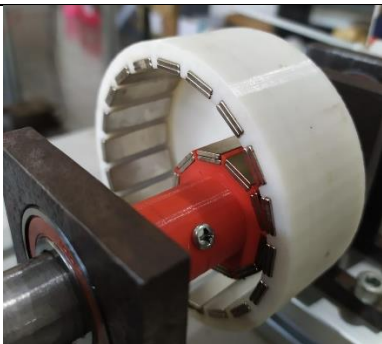
3.2 Metode Eksperimen




Pengujian eksperimen dilakukan menggunakan model *magnetic gear* dengan jumlah *pole* 10-20 dan variasi *air gap* sama seperti pengujian simulasi. Rangkaian peralatan eksperimen ini menggunakan *t-slot aluminium profile* sebagai landasan *magnetic gear* supaya variasi *air gap* dapat diatur lebih presisi.

3.2.1 Peralatan Eksperimen

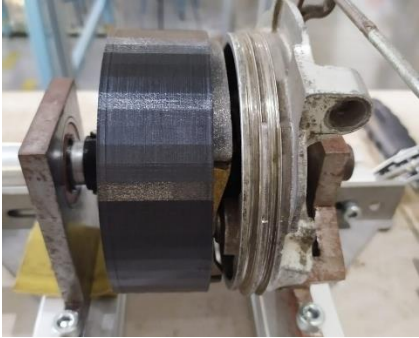
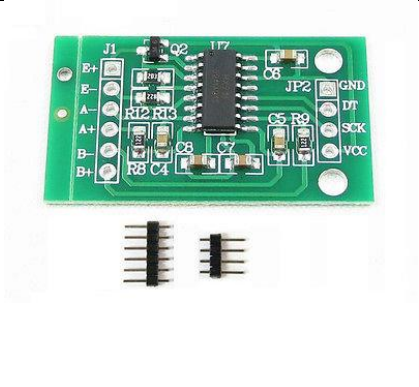
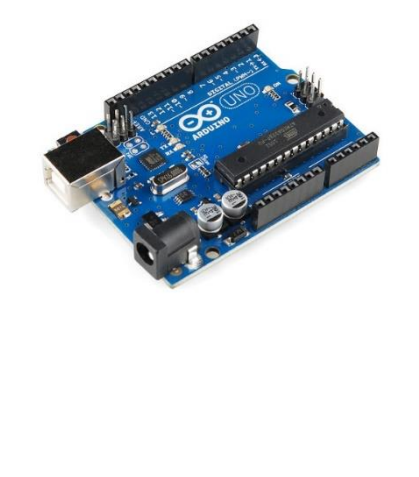
Adapun peralatan yang digunakan pada penelitian eksperimen ini terdapat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Peralatan Eksperimen

No.	Nama Alat	Gambar	Keterangan
1	<i>Radial internal magnetic spur gear prototype</i>		Bagian <i>gear blank</i> dibuat dengan proses 3D <i>printing</i> menggunakan material PLA, dan untuk magnet menggunakan jenis neodymium tipe N35 ukuran 30x10x3 mm untuk variasi

			jumlah <i>pole</i> 10-20. Pemasangan magnet permanen ke dala <i>gear blank</i> menggunakan lem super.
2	Motor DC		Merek motor : Toshiba DC Motor Putaran maksimum : 300 rpm Tegangan maksimum : 24 V DC Torsi : 70 kg.cm
3	<i>Tachometer</i>		Merek <i>tachometer</i> : Digilife <i>Range</i> Putaran : 1-99.999 rpm Tipe : <i>tachometer</i> laser
4	Torque Meter		Merek <i>torque meter</i> : Omega Tipe : TQ503-160 <i>Torque range</i> : 0-160 Nm <i>Connection type</i> : <i>Square connection</i> <i>Electrical output</i> : 2 mV/V <i>Bridge Resistance</i> : 350 Ω <i>Rated Speed Range</i> : 0-3000 rpm <i>Accuracy</i> : $\pm 0.2\%$ FS

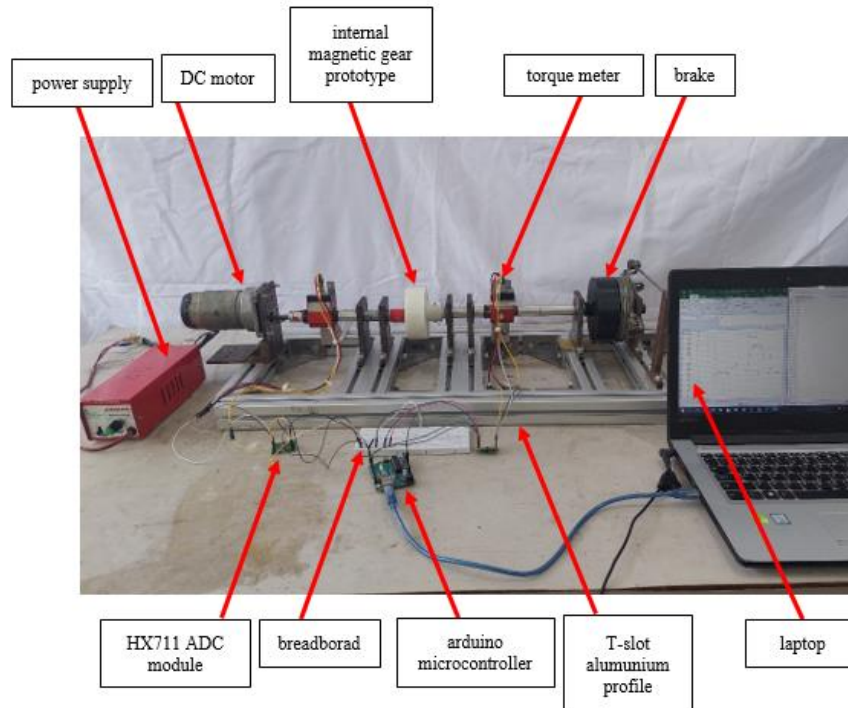
5	<i>Feeler Gauge</i>		<i>Feeler gauge</i> berfungsi sebagai alat ukur lebar <i>air gap</i> yang akan ditetapkan selama proses eksperimen.
6	<i>Bearing</i>		Bantalan <i>bearing</i> digunakan agar poros tidak mengalami fluktuasi saat berotasi. Tipe <i>bearing deep groove ball bearings – single row - sealed type - 6004 ZZ</i>
7	<i>Flexible Coupling</i>		Flexible coupling ini digunakan untuk menghubungkan poros pada motor DC dengan poros dari rangkaian <i>magnetic gear</i> .
8	Poros		Poros pada rangkaian eksperimen dibuat dari bahan alumunium. Poros akan menghubungkan antara <i>magnetic gear</i> dengan <i>torque meter</i> , motor, dan juga <i>brake</i> .
9	Konverter AC-DC		Konverter berguna sebagai <i>power supply</i> untuk mengubah arus AC ke DC dan mengatur tegangan yang masuk ke

			motor DC dengan besar tegangan 9 volt.
10	<i>Brake</i>		<i>Brake</i> berfungsi untuk memberikan pembebanan pada poros <i>output</i> . Penelitian ini menggunakan jenis <i>drum brake</i> .
11	HX711 ADC <i>Module</i>		Modul ini berguna untuk mengkonversi data analog dari <i>torque meter</i> menjadi data digital yang nantinya dapat dibaca melalui <i>microcontroller</i> .
12	Arduino Uno		Arduino microcontroller digunakan sebagai alat pembaca torsi dengan <i>input signal</i> dari modul ADC. Nantinya pembacaan torsi langsung menggunakan <i>display</i> PC ataupun laptop.

3.2.2 Rangkaian Peralatan Eksperimen

Eksperimen ini dilakukan dengan memasang *radial internal magnetic spur gear* pada poros *input* berupa *high speed* rotor dan poros *output* berupa *low speed* rotor yang kemudian pada poros *input* diberikan kecepatan putar tertentu. Selanjutnya diukur torsi dan kecepatan putar yang dihasilkan dari *rangkaian*

magnetic gear menggunakan *torquemeter* dan *tachometer*. Rangkaian peralatan eksperimen dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 3.5 Rangkaian Peralatan Eksperimen

3.2.3 Tahapan Eksperimen

Berikut ini merupakan tahapan pengambilan data yang dilakukan dalam proses eksperimen pada penelitian ini:

1. Melakukan proses kalibrasi *torque meter*.
2. Melakukan pemasangan rangkaian *radial internal magnetic spur gear*.
3. Melakukan penyesuaian *air gap* sesuai dengan variasi yang digunakan.
4. Poros *output* disambungkan dengan *drum brake*.
5. *Torque meter* dihubungkan dengan modul ADC dan *microcontroller* Arduino.
6. *Input coding* pada Arduino untuk menampilkan torsi pembacaan dari *torque meter*.
7. Tampilkan sidplay pembacaan Arduino dengan menggunakan laptop.
8. Motor DC dinyalakan bersamaan dengan koverter.

9. Besar tegangan yang masuk ke motor diatur pada konverter supaya putaran pada poros *input* sebesar 110 rpm.
10. Putaran pada poros *input* atau pada HS *gear* diperiksa kembali menggunakan *tachometer* apakah telah sesuai pada putaran 110 rpm atau belum, jika belum diatur kembali besar tegangan yang masuk ke motor hingga mencapai 110 rpm.
11. Pembebanan pada *brake* diberikan secara bertahap hingga *magnetic gear* mencapai torsi maksimum dan terjadi slip pada *magnetic gear*.
12. Besar torsi pada LS *gear* diukur dan dicatat melalui display pembacaan Arduino di laptop.

3.2.4 Desain Eksperimen

Setelah tahap *post-processing* metode numerik dan eksperimen selesai, maka akan didapatkan data torsi dari kedua metode tersebut, yang kemudian dikumpulkan untuk dilakukan analisis dan pembahasan. Data yang didapat nantinya dicatat dalam bentuk tabel seperti pada tabel 3.4 dan tabel 3.5.

Tabel 3.4 Lembar data hasil simulasi dengan variasi jumlah *pole* dan *air gap*

	Torsi (N.m)		
<i>Air gap</i> / <i>Pole</i>	4-8	6-12	10-20
1,2 mm			
1,4 mm			
1,6 mm			

Tabel 3.5 Lembar data hasil eksperimen dengan jumlah *pole* 10-20 dan variasi *air gap*

	Torsi (N.m)	
	Torsi Statis	Torsi Dinamis
<i>Air gap</i> / <i>Pole</i>		

1,2 mm		
1,4 mm		
1,6 mm		

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan menjelaskan dan menganalisis hasil penelitian untuk mengetahui torsi yang dapat ditransmisikan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* dengan rancangan metode numerik *finite element* dan eksperimen seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya.

4.1 Analisis Hasil Simulasi

Rancangan penelitian metode numerik *finite element* pada penelitian ini dilakukan dengan simulasi menggunakan *software* Ansys Maxwell Electromagnetic 3D. Rancangan penelitian dengan metode numerik *finite element* digunakan pada penelitian ini untuk membantu proses perhitungan secara analytical dengan persamaan yang sangat kompleks. Untuk perumusan torsi dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* sendiri sebenarnya bisa didekati dengan persamaan torsi untuk jenis *cycloidal magnetic gear*. Secara topologi, *cycloidal magnetic gear* ini identik dengan *internal magnetic gear*. Hanya saja *cycloidal magnetic gear* memiliki komponen dan pola gerakan yang lebih kompleks apabila dibandingkan dengan *internal magnetic gear*. Berikut ini adalah persamaan torsi dan medan magnet dari *cycloidal magnetic gear* yang bisa digunakan sebagai pendekatan untuk menganalisa torsi pada *internal magnetic gear*.

A. Perumusan medan magnet pada arah radial dan tangensial

Berikut ini merupakan perumusan medan magnet pada arah radial dan tangensial untuk *cycloidal magnetic gear*.

$$B_r^{(2)}, (r', \phi', v) = \mu_0 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{2} i N p r'^{-\left(\frac{1}{2} i N_p + 1\right)} \times U_i^{(2)}(v) \cos\left(\frac{1}{2} N_p i \phi'\right) \quad (4.1)$$

$$B_{\phi'}^{(2)}, (r', \phi', v) = \mu_0 \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{2} i N p r'^{-\left(\frac{1}{2} i N_p + 1\right)} \times U_i^{(2)}(v) \sin\left(\frac{1}{2} N_p i \phi'\right) \quad (4.2)$$

Berikut ini merupakan persamaan dari parameter-parameter yang digunakan dalam perumusan medan magnet tersebut:

$$U_i^{(2)}(v) = -2\mu_0 \frac{H_{ri}(v)}{L_i(v)} M_{ri} - 2\mu_0 \frac{H_{\phi i}(v)}{L_i(v)} M_{\phi i} \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} H_{ri}(v) &= R_{2s}\mu_0(R_{2s}^{(N_p i)})^{\frac{3}{2}} N_p i + 2R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu - \\ &R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu_0 N_p i - 2\sqrt{R_{1s}^{(N_p i)}} \mu R_{1s} R_{2s}^{(N_p i)} N_p i - \\ &2R_{2s}\mu \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} + 4\sqrt{R_{1s}^{(N_p i)}} R_{2s}^{(N_p i)} \mu_0 R_{1s} + R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu N_p i - \\ &2R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu_0 - 2R_{2s}\mu_0 \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} + \\ &R_{2s}\mu \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} N_p i \end{aligned}$$

(4.4)

$$\begin{aligned} H_{\phi i}(v) &= -R_{2s}\mu_0(R_{2s}^{(N_p i)})^{\frac{3}{2}} N_p i - 4\sqrt{R_{1s}^{(N_p i)}} \mu R_{1s} R_{2s}^{(N_p i)} - \\ &R_{2s}\mu \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} N_p i + 2R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu - 92R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu_0 + \\ &R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu N_p i + 2\sqrt{R_{1s}^{(N_p i)}} R_{2s}^{(N_p i)} \mu_0 N_p i R_{1s} + \\ &2R_{2s}\mu \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} + 2R_{2s}\mu_0 \left(R_{2s}^{(N_p i)}\right)^{\frac{3}{2}} - \\ &R_{1s}^{(N_p i)} \sqrt{R_{2s}^{(N_p i)}} R_{2s}\mu_0 N_p i \end{aligned} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} L_i(v) &= \left[(-2 + N_p i) \left[(-2 + N_p i) \times \left[-2\mu\mu_0 R_{2s}^{(N_p i)} - 2\mu\mu_0 R_{1s}^{(N_p i)} - \right. \right. \right. \\ &\mu^2 R_{2s}^{(N_p i)} + \mu^2 R_{1s}^{(N_p i)} - \mu_0^2 R_{2s}^{(N_p i)} + \\ &\left. \left. \left. \mu_0^2 R_{1s}^{(N_p i)} \right] \right] \right] \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$M_{ri} = \frac{B_r}{\mu_0 \pi} \frac{2N_p}{1 - (\frac{1}{2}iN_p)^2} \times \left[\sin\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}i\right) - \frac{1}{2}iN_p \cos\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}i\right) \right] \quad (4.7)$$

$$M_{\phi i} = \frac{B_r}{\mu_0 \pi} \frac{2N_p}{1 - (\frac{1}{2}iN_p)^2} \times \left[\cos\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}i\right) - \frac{1}{2}iN_p \sin\left(\frac{\pi}{N_p}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}i\right) \right] \quad (4.8)$$

B. Perumusan Torsi

Untuk nilai torsi yang dihasilkan dari pasangan *cycloidal magnetic gear* dapat dirumuskan sebagai torsi pada arah tangensial dan pada arah radial:

$$T(R_{2s}, R_{1s}, R_{2d}, R_{1d}, d) = T_r(v) + T_{t1}(v) + T_{t2}(v) \quad (4.9)$$

$$T_r(v) = \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right) L(R_{2d} - R_{1d})}{N_r} \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) r(q, v) \times \left[\cos\left(\phi_{edge}(\phi, p)\right) B_x^{ext}(r(q), \phi_{edge}(\phi, p), v) + \sin\left(\phi_{edge}(\phi, p)\right) B_y^{ext}(r(q), \phi_{edge}(\phi, p), v) \right] \quad (4.10)$$

$$T_{t1}(v) = \frac{-M_s L R_{1d}^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}}\right)}{N_t} \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \times \left[\cos\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_x^{ext} \times \left(R_{1d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi, v\right) + \sin\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_y^{ext} \times \left(R_{1d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi, v\right) \right] \quad (4.11)$$

$$T_{t2}(v) = \frac{M_s L R_{2d}^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}}\right)}{N_t} \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_p} (-1)^p S_r(q) \sin(\theta(q)) \times \left[\cos\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_x^{ext} \times \left(R_{2d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi, v\right) + \sin\left(\theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi\right) B_y^{ext} \times \left(R_{2d}, \theta(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \phi, v\right) \right] \quad (4.12)$$

Parameter-parameter yang digunakan dalam analisa torsi adalah sebagai berikut:

$$\theta(q) = \frac{-\pi}{N_{pole}} + \frac{q}{N_t} \frac{2\pi}{N_{pole}} \quad (4.13)$$

$$r(q, v) = R_{1d} + \frac{q}{N_r} (R_{2d} - R_{1d}) \quad (4.14)$$

$$\phi_{edge}(p) = \phi + \frac{\pi}{N_{pole}}(1 + 2p) \quad (4.15)$$

Berikut ini merupakan tabel nilai parameter yang digunakan pada penelitian Jorgensen dkk.

Tabel 4.1 Keterangan Parameter yang digunakan pada Penelitian Jorgensen

Symbol	Dimensions for analytical model		
	Description	Size	Units
T _{Cyc}	Cycloid gear torque Figure 3c.	43.91	Nm
T _{in}	Spur gear torque [2], Figure 3b.	46	Nm
R _{2s}	Outer radius, source magnets ^a	53.5	mm
R _{1s}	Inner radius, source magnets	48.5	mm
R _{2d}	Outer radius, drive magnets	61.5	mm
R _{1d}	Inner radius, drive magnets	56.5	mm
D	Distance between center points	2.5	mm
V	Vector containing opt. variables		-
L	Length/height of the magnets	26	mm
B _r	Remanence flux	1.21	T
H _c = M _s	Coercivity	915000	A/m
I	Harmonic parameter, max value.	4	-
N _r = N _t	Torque integration parameter	10	-
μ ₀	Permability for air regions	4·π·10 ⁻⁷	Tm/A
μ = B _r /H _c	Permability, magnets	13.22·10 ⁻⁷	Tm/A
μ _r = μ/μ ₀	Relative permability, magnets	1.0523	-
N _p = P _A	Number of source pole magnets	42	-
N _{pole} = P _C	Number of drive pole magnets	44	-
φ	Max. torque calculation angle	4.09	Deg.

a. The index s and b are used for source and drive magnets. (Figure 4)

Jorgensen menyebutkan bahwa persamaan torsi jenis *internal magnetic gear* dapat didekati dengan persamaan yang dibentuk untuk menganalisa torsi *cycloidal magnetic gear*. Pada persamaan 4.1 hingga 4.15 di atas merupakan susunan persamaan yang sangat kompleks dan terdiri dari banyak variabel yang terlibat. Untuk menyelesaikan persamaan tersebut dibutuhkan waktu yang cukup lama karena kompleksitas dari persamaannya. Oleh karena itu, dalam menganalisa torsi

dari *internal magnetic gear* pada penelitian ini digunakan metode numerik *finite element* dengan bantuan *software* ANSYS Maxwell untuk simulasi. Persamaan untuk menganalisa torsi *internal magnetic gear* di atas dapat didekati dengan metode numerik *finite element* yang nantinya dibantu oleh komputer untuk melakukan proses perhitungan. *Software* ANSYS Maxwell merupakan salah satu *software* simulasi numerik *finite element* yang menyediakan *user interface* yang mudah untuk digunakan dan dipahami dalam pemodelan elektromagnetik.

Dengan metode numerik *finite element* ini akan dilakukan simulasi untuk mendapatkan data berupa perubahan nilai torsi terhadap waktu, dan kemudian dapat diamati nilai torsi maksimum yang mampu ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Metode numerik dengan simulasi menggunakan *software* ANSYS Maxwell Electromagnetic ini dilakukan dengan rancangan pengamatan statis. Maksud dari pengamatan statis ini adalah input gerakan rotasi hanya diberikan kepada *high speed gear* sebagai *driver gear*. Sementara itu, *low speed gear* yang seharusnya sebagai *driven gear* ini ditetapkan untuk tidak berputar mengikuti putaran dari *high speed gear*. Sehingga pengamatan torsi yang didapatkan dari metode numerik ini adalah pengamatan torsi statis dari pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Input kecepatan pada *high speed gear* adalah kecepatan putar konstan yaitu sebesar 110 rpm. Dengan *high speed gear* yang berputar konstan dan *low speed gear* yang statis (tidak berputar) maka akan didapatkan skema pertemuan antara *pole* pada *high speed gear* dan juga *low speed gear* yang akan saling tarik menarik dan juga saling tolak menolak sesuai dengan skema pertemuan antara kutub yang sama dan juga pertemuan antara kutub yang berbeda dari pasangan magnet. Hal tersebut akan menyebabkan pembacaan parameter medan magnet dari metode numerik ini menjadi berfluktuasi antara nilai medan magnet yang positif dan juga nilai medan magnet yang negatif. Fluktuasi dari nilai medan magnet ini juga akan mengakibatkan pembacaan nilai dari parameter gaya dan torsi menjadi berfluktuasi antara nilai positif dan juga negatif.

Konsep penelitian metode numerik ini dirancang dengan menggunakan variasi jumlah *pole*, namun volume magnet total tetap konstan, serta menggunakan variasi *air gap*. Variasi jumlah *pole* yang digunakan yaitu 4-8 *pole*, 6-12 *pole*, dan 10-20 *pole*. Variasi *air gap* yang digunakan sebesar 1,2 mm, 1,4 mm, dan 1,6 mm. Hasil

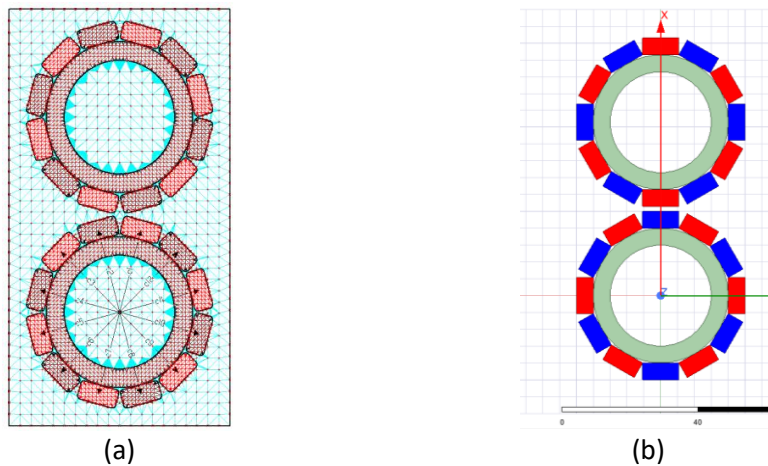
dari simulasi berupa data torsi dari pasangan *magnetic gear* yang kemudian akan dianalisa serta dibandingkan dengan torsi pada hasil eksperimen.

4.1.1 Verifikasi Pemodelan Simulasi dengan Penelitian Terdahulu

Sebelum dilakukan proses simulasi dari penelitian, perlu untuk dilakukan verifikasi rancangan simulasi yang telah disusun. Verifikasi rancangan simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menyusun rancangan simulasi yang telah ada pada penelitian terdahulu. Setelah itu dianalisa apakah rancangan simulasi yang telah disusun memiliki hasil yang identik dengan yang ada pada penelitian terdahulu. Pada penelitian ini dilakukan proses verifikasi rancangan simulasi dengan mengacu kepada beberapa penelitian terdahulu.

4.1.1.1 Verifikasi Penelitian *External Magnetic Gear* oleh Yi-Chang Wu

Verifikasi pertama yang digunakan adalah dengan mengacu pada penelitian tentang *external magnetic gear* yang dilakukan oleh Yi-Chang Wu pada tahun 2015. Berikut ini adalah pemodelan *finite element* 2D yang ada pada penelitian Yi-Chang Wu dan juga model verifikasi yang disusun pada penelitian ini.



Gambar 4.1 (a) Model Yi-Chang Wu; (b) Model Verifikasi pada Penelitian Ini

Verifikasi dari pemodelan tersebut dilakukan dengan menganalisa hasil torsi maksimum yang bisa didapat pada penelitian Yi-Chang Wu dan juga pada model verifikasi. Berikut ini merupakan hasil torsi maksimum dari penelitian Yi-Chang Wu dan model verifikasi.

Tabel 4.2 Torsi Maksimum Penelitian Yi-Chang Wu

Number of pole pairs	Analytical results	FEA results	Error (%)
5	2.54	2.81	-9.61
6	2.66	2.87	-7.32
7	2.65	2.76	-3.99
8	2.61	2.59	0.77
9	2.52	2.40	5.00
10	2.41	2.21	9.05

* Unit: Nm

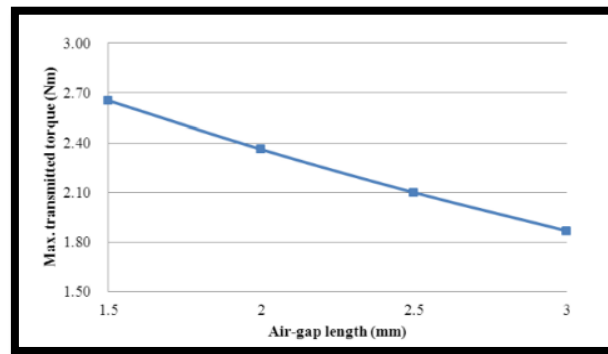
**Error=

$$(\text{Analytical results}-\text{FEA results})/\text{FEA results}*100\%$$

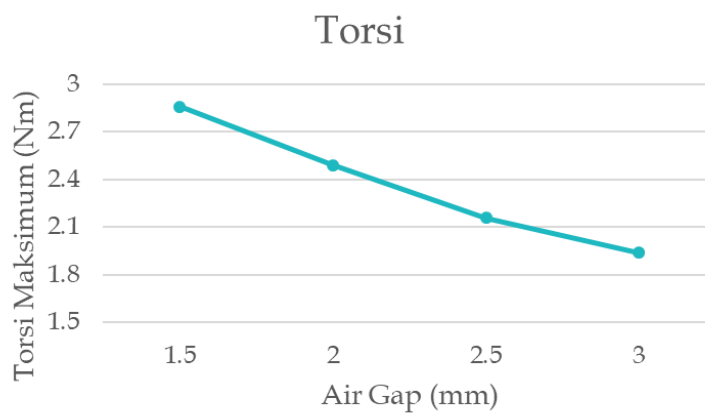
Tabel 4.3 Torsi Maksimum Model Verifikasi

Air Gap (mm)	Jumlah Pole Pairs	Torsi Maksimum (Nm)
1.5	6	2.86
2	6	2.49
2.5	6	2.16
3	6	1.94

Pada penelitian Yi-Chang Wu dengan jumlah pasangan *pole* 6 dan *air gap* 1,5 mm dihasilkan torsi maksimum sebesar 2,87 Nm. Sementara itu, pada model verifikasi dengan pasangan *pole* dan *air gap* yang sama didapatkan torsi maksimum sebesar 2,86 Nm. Perbedaan yang ada pada hasil model verifikasi dan model pada penelitian Yi-Chang Wu sebesar 0,35%. Selain itu, proses verifikasi juga dilakukan dengan menggunakan variasi *air gap* yang ada pada penelitian Yi-Chang Wu. Berikut hasil verifikasi torsi dengan variasi *air gap* yang digunakan.



Gambar 4.2 Pengaruh *air gap* terhadap torsi pada penelitian Yi-Chang Wu

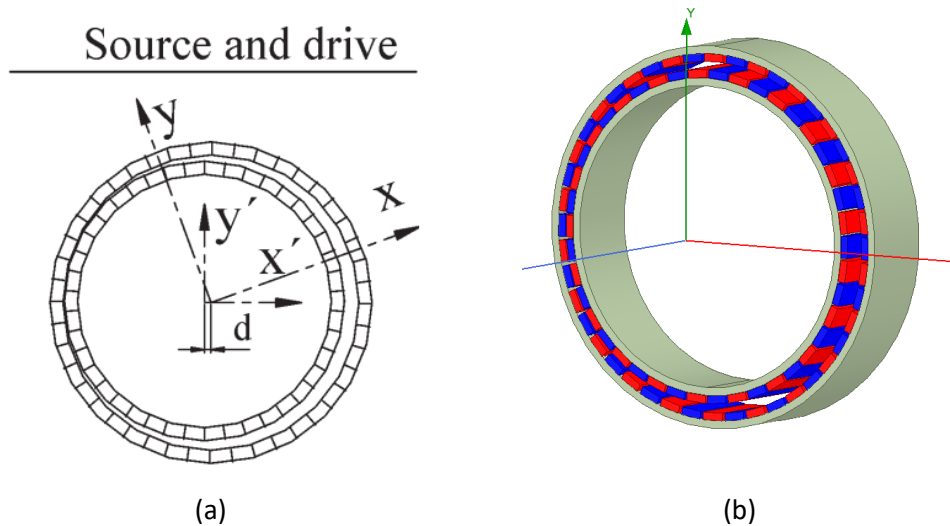


Gambar 4.3 Pengaruh *air gap* terhadap torsi pada model verifikasi

Berdasarkan pengamatan pengaruh *air gap* terhadap torsi didapatkan hasil yang identik dari model verifikasi dan juga penelitian Yi-Chang Wu. Pada Gambar 4.2 dan 4.3 dapat dilihat hasil *trendline* yang identik, dimana kedua *trendline* menunjukkan air gap yang semakin besar akan menyebabkan torsi maksimum semakin kecil. Secara kuantitatif dapat diketahui juga bahwa nilai torsi pada setiap variasi air gap memiliki hasil yang identik antara model verifikasi dan penelitian Yi-Chang Wu. Beberapa analisa hasil dari rancangan verifikasi dan penelitian Yi-Chang Wu menunjukkan hasil yang identik. Dengan hasil yang identik ini dapat diketahui bahwa rancangan simulasi verifikasi yang disusun telah sesuai dengan rancangan simulasi yang dilakukan pada penelitian Yi-Chang Wu.

4.1.1.2 Verifikasi dengan Penelitian *Cycloidal Magnetic Gear* oleh Jorgensen

Verifikasi berikutnya yang dilakukan adalah dengan mengacu pada penelitian tentang *cycloidal magnetic gear* yang dilakukan oleh Jorgensen pada tahun 2008. Berikut ini adalah pemodelan *finite element* 2D yang pada penelitian Jorgensen dan juga model verifikasi yang disusun pada penelitian ini.

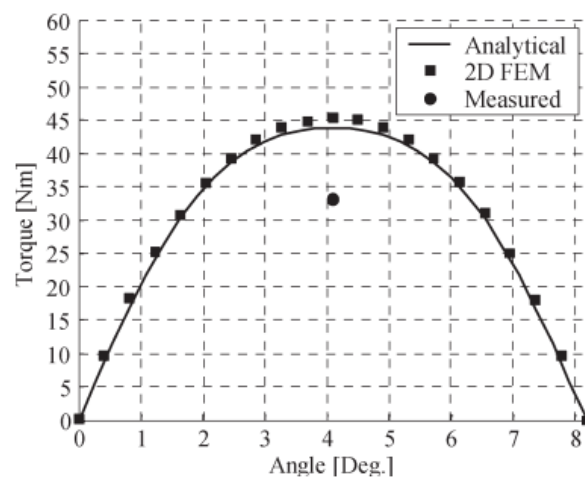


Gambar 4.4 (a) Model Jorgensen; (b) Model Verifikasi pada Penelitian Ini

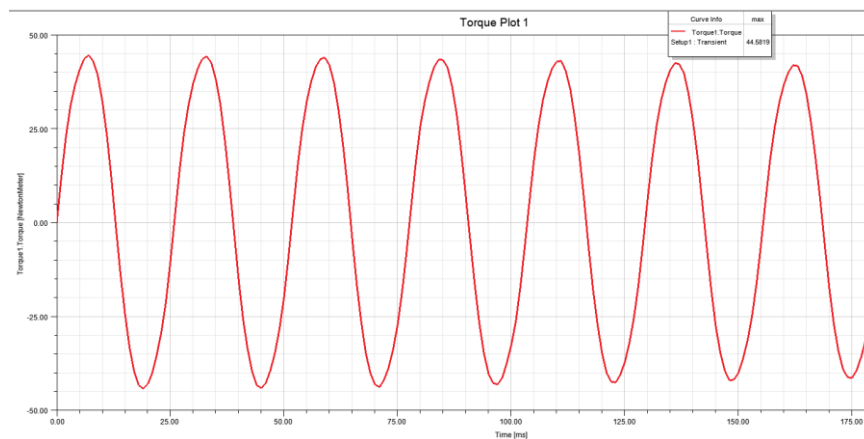
Verifikasi dari pemodelan tersebut dilakukan dengan menganalisa hasil torsi maksimum yang bisa didapat pada penelitian Jorgensen dan juga pada model verifikasi. Berikut ini merupakan hasil torsi maksimum dari penelitian Jorgensen dan model verifikasi.

Tabel 4.4 Hasil Torsi pada Penelitian Jorgensen

Symbol	Dimensions for analytical model		
	Description	Size	Units
T_{Cyc}	Cycloid gear torque Figure 3c.	43.91	Nm
T_{in}	Spur gear torque [2], Figure 3b.	46	Nm
R_{2s}	Outer radius, source magnets ^a	53.5	mm
R_{1s}	Inner radius, source magnets	48.5	mm
R_{2d}	Outer radius, drive magnets	61.5	mm
R_{1d}	Inner radius, drive magnets	56.5	mm
D	Distance between center points	2.5	mm
\mathbf{V}	Vector containing opt. variables		-
L	Length/height of the magnets	26	mm
B_r	Remanence flux	1.21	T
$H_c = M_s$	Coercivity	915000	A/m
I	Harmonic parameter, max value.	4	-
$N_r = N_t$	Torque integration parameter	10	-
μ_0	Permeability for air regions	$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$	Tm/A
$\mu = B_r/H_c$	Permeability, magnets	$13.22 \cdot 10^{-7}$	Tm/A
$\mu_r = \mu/\mu_0$	Relative permeability, magnets	1.0523	-
$N_p = P_A$	Number of source pole magnets	42	-
$N_{pole} = P_C$	Number of drive pole magnets	44	-
ϕ	Max. torque calculation angle	4.09	Deg.



Gambar 4.5 Perubahan Torsi Terhadap Waktu pada Model Jorgensen



Gambar 4.6 Perubahan Torsi Terhadap Waktu pada Model Verifikasi

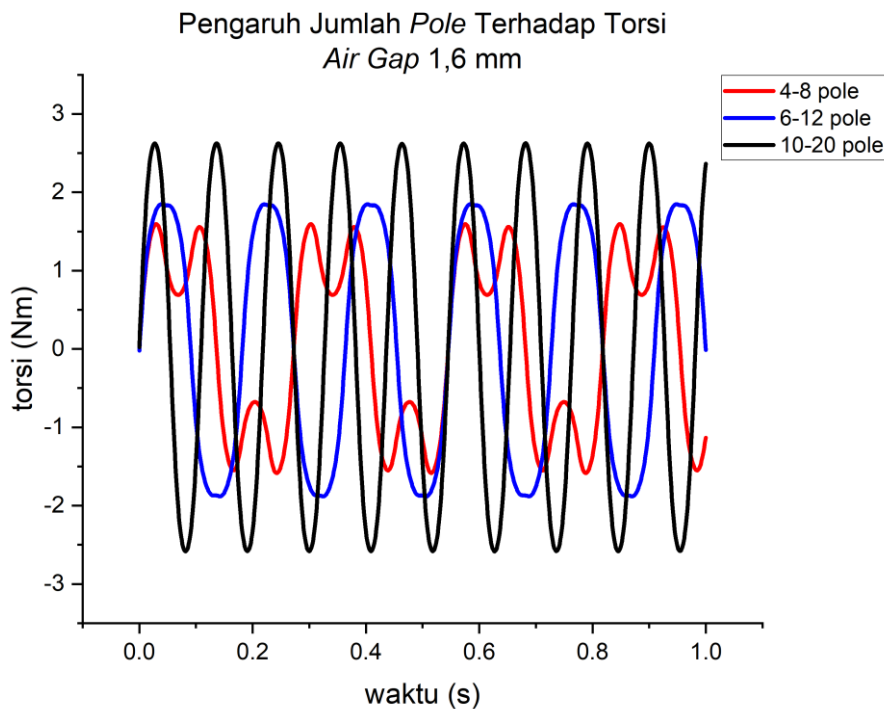
Analisa model *cycloidal gear* dengan *2D finite element* pada penelitian Jorgensen didapatkan hasil torsi maksimum sebesar 46 Nm. Sementara itu, pada model verifikasi dilakukan pemodelan *3D finite element* dan didapatkan torsi maksimum sebesar 44,5 Nm. Perbedaan yang ada dari hasil torsi pemodelan Jorgensen dan pemodelan verifikasi yaitu sebesar 3,26%. Perbedaan yang ada tidak begitu signifikan dan bisa dikatakan kedua hasil tersebut identik. Dengan hasil yang identik tersebut dapat dikatehui bahwa rancangan simulasi verifikasi yang disusun telah sesuai dengan rancangan simulasi yang dilakukan pada penelitian Jorgensen.

4.1.2 Analisis Pengaruh Jumlah *Pole* Terhadap Torsi *Radial Internal Magnetic Spur Gear*

Pada penelitian ini dilakukan analisa perbandingan hasil torsi dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* dengan jumlah *pole* yang berbeda. Pada penelitian ini digunakan volume total magnet yang tetap sama walaupun terdapat variasi jumlah *pole* berbeda. Sehingga ukuran magnet yang digunakan pada setiap variasi jumlah *pole* akan berbeda-beda untuk mempertahankan volume total magnet agar tetap sama. Perbedaan ukuran magnet yang digunakan ini terdapat pada sisi tebal magnet, sementara itu untuk sisi lebar magnet memiliki ukuran yang tetap sebesar 10 mm. Sisi tebal magnet ini nantinya akan searah dengan arah radial dari *magnetic gear*. Sementara itu sisi lebar magnet akan menjadi sisi untuk saling kontak antara magnet yang terdapat pada *high speed gear* dan juga magnet yang terdapat pada *low speed gear*. Hal tersebut akan membuat luas area kontak antar

magnet memiliki nilai yang tetap walaupun jumlah *pole* yang digunakan berbeda-beda.

Terdapat 3 variasi jumlah *pole* yang digunakan pada penelitian ini, yaitu variasi dengan jumlah 4-8 *pole*, 6-12 *pole*, dan 10-20 *pole*. Dengan variasi jumlah *pole* ini akan dapat diketahui bagaimana pengaruh jumlah *pole* terhadap nilai torsi yang mampu ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Pengamatan pengaruh jumlah *pole* ini dilakukan dengan menetapkan *air gap* yang sama antara *high speed gear* dan juga *low speed gear*. Hal ini bertujuan agar pengamatan nilai torsi tidak dipengaruhi oleh adanya perbedaan *air gap* antara *high speed gear* dan juga *low speed gear*. Berikut ini adalah nilai torsi dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* yang didapatkan dengan metode numerik dengan penggunaan jumlah *pole*.



Gambar 4.7 Pengaruh Jumlah *Pole* Terhadap Torsi dengan *Air Gap* 1,6 mm

Hasil simulasi untuk mengetahui pengaruh jumlah *pole* terhadap torsi dengan menetapkan *air gap* sebesar 1,6 mm ditunjukkan pada Gambar 4.7. Pada Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa dengan jumlah *pole* yang berbeda dan juga *air gap* yang sama maka akan didapatkan pengaruh terhadap nilai torsi yang mampu

ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Hal ini dapat terlihat dari nilai torsi maksimum yang dapat dihasilkan pada setiap pasangan *pole* yang berbeda, dan juga bagaimana kontinuitas torsi yang dihasilkan. Nilai torsi maksimum ini didapatkan dari nilai *peak* kurva perubahan torsi terhadap waktu yang terdapat pada Gambar 4.7. Dengan mengamati nilai torsi maksimum akan didapatkan bahwa seiring bertambahnya jumlah *pole* yang digunakan pada pasangan *radial internal magnetic spur gear* maka akan semakin besar nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan. Dengan jumlah pasangan *pole* 4-8 akan didapatkan nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan sebesar 1,6 Nm, jumlah pasangan *pole* 6-12 dapat mentransmisikan torsi maksimum sebesar 1,85 Nm, dan jumlah pasangan *pole* 10-20 dapat mentransmisikan torsi maksimum sebesar 2,6 Nm. Berdasarkan hasil perubahan torsi terhadap waktu yang terdapat pada Gambar 4.7 juga dapat diketahui bahwa dengan variasi jumlah *pole* yang semakin banyak, namun ketebalan *pole* yang semakin berkurang akan tetap membuat nilai maksimum torsi yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear* meningkat. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa jumlah *pole* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kemampuan pasangan *radial internal magnetic spur gear* dalam mentransmisikan torsi dibandingkan dengan ketebalan *pole*.

Selain nilai torsi maksimum yang mampu ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*, dapat pula diamati bagaimana kontinuitas nilai torsi yang dihasilkan. Dengan mengamati kontinuitas nilai torsi akan didapatkan bahwa semakin sedikit jumlah *pole* yang digunakan pada pasangan *radial internal magnetic spur gear* maka nilai torsi yang dapat ditransmisikan dari pasangan *radial internal magnetic gear* menjadi tidak kontinu, terutama pada saat pasangan *radial internal magnetic gear* mencapai nilai maksimum torsi yang dapat ditransmisikan. Hal tersebut dapat diamati pada kurva perubahan torsi terhadap waktu dari pasangan *radial internal magnetic gear* dengan jumlah *pole* 4-8. Pada saat pasangan *radial internal magnetic gear* ini mencapai nilai maksimum torsi yang dapat ditransmisikan, maka akan terjadi fase penurunan sesaat untuk nilai torsi maksimum tersebut. Hal tersebut akan mengakibatkan berkurangnya kekuatan pasangan *radial internal magnetic gear* dalam mentransmisikan torsi, dan akan

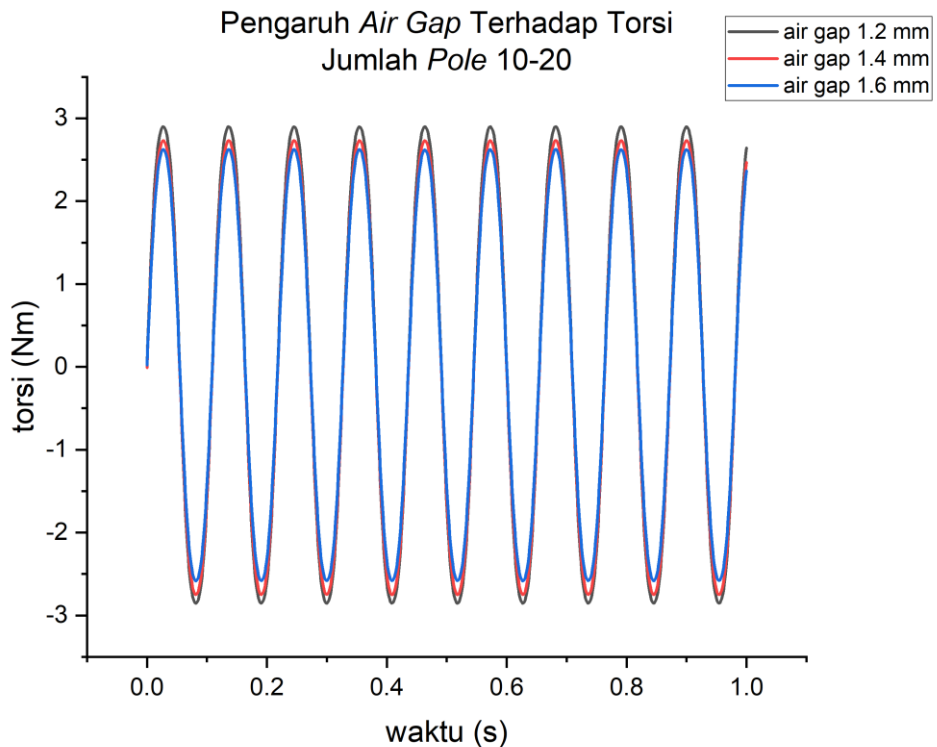
menimbulkan *loss* dari pasangan *pole* yang ada apabila torsi *load* yang diberikan nantinya melebihi nilai torsi maksimum yang telah mengalami penurunan tersebut. Berbeda dengan kontinuitas nilai torsi pada pasangan *radial internal magnetic gear* dengan jumlah pasangan *pole* 6-12, dan juga 10-20. Apabila kita mengamati kontinuitas nilai torsi dengan jumlah pasangan *pole* 6-12, dan juga 10-20 maka tidak terdapat fase penurunan sesaat untuk nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa pengamatan nilai torsi dengan metode numerik simulasi ini adalah pengamatan nilai torsi secara statis, dimana yang berputar secara konstan adalah *high speed gear*, sementara itu *low speed gear* tidak ikut berputar. Hal tersebut akan menyebabkan nilai torsi yang dihasilkan menjadi berfluktuasi antara nilai torsi positif dan juga nilai torsi negatif karena skema pertemuan kutub magnet yang saling bergantian antara pertemuan kutub yang sama dan juga kutub yang berbeda dari *high speed gear* dan juga *low speed gear*.

Pengamatan perubahan nilai torsi terhadap waktu dari pasangan *radial internal magnetic gear* ini sesuai dengan penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa pasangan *magnetic gear* akan mencapai nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan pada saat *magnetic gear* mencapai putaran sejauh setengah dari sudut *pitch pole*. Sebagai contoh adalah apabila kita mengamati nilai torsi maksimum dari pasangan *radial internal magnetic gear* dengan pasangan jumlah *pole* 10-20. Dengan jumlah *pole* sebanyak 10 pada *high speed gear*, maka *magnetic gear* akan memiliki sudut *pitch pole* sebesar 36° . Apabila kecepatan input adalah konstan sebesar 110 rpm, maka torsi maksimum yang dapat ditransmisikan dari pasangan *radial internal magnetic gear* ini akan terjadi setiap 18° , 54° , 90° , dan begitu seterusnya dengan interval 36° . Dengan kecepatan putar konstan 110 rpm, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencapai 18° adalah 0,027 detik. Oleh karena itu, pasangan *radial internal magnetic gear* akan mencapai nilai torsi maksimum pada waktu 0,027 detik, 0,081 detik, 0,135 detik, dan begitu seterusnya dengan interval 0,054 detik.

4.1.3 Analisis Pengaruh Air Gap Terhadap Torsi Radial Internal Magnetic Spur Gear

Selanjutnya pada penelitian ini dilakukan analisa perbandingan hasil torsi dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* dengan menggunakan *air gap* yang berbeda. Dalam mengamati pengaruh *air gap* terhadap torsi yang dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* juga digunakan metode numerik simulasi secara statis, yang berarti bahwa torsi yang dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* merupakan torsi statis seperti yang disebutkan sebelumnya. Terdapat 3 variasi *air gap* yang digunakan pada penelitian ini, yaitu variasi *air gap* sebesar 1,2 mm, 1,4 mm, dan juga 1,6 mm. Dengan variasi *air gap* ini akan dapat diketahui bagaimana pengaruh *air gap* terhadap nilai torsi yang mampu ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Berikut ini adalah nilai torsi dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* yang didapatkan dengan metode numerik dengan penggunaan *air gap* yang berbeda.



Gambar 4.8 Pengaruh *Air Gap* Terhadap Torsi dengan Pasangan Pole 10-20

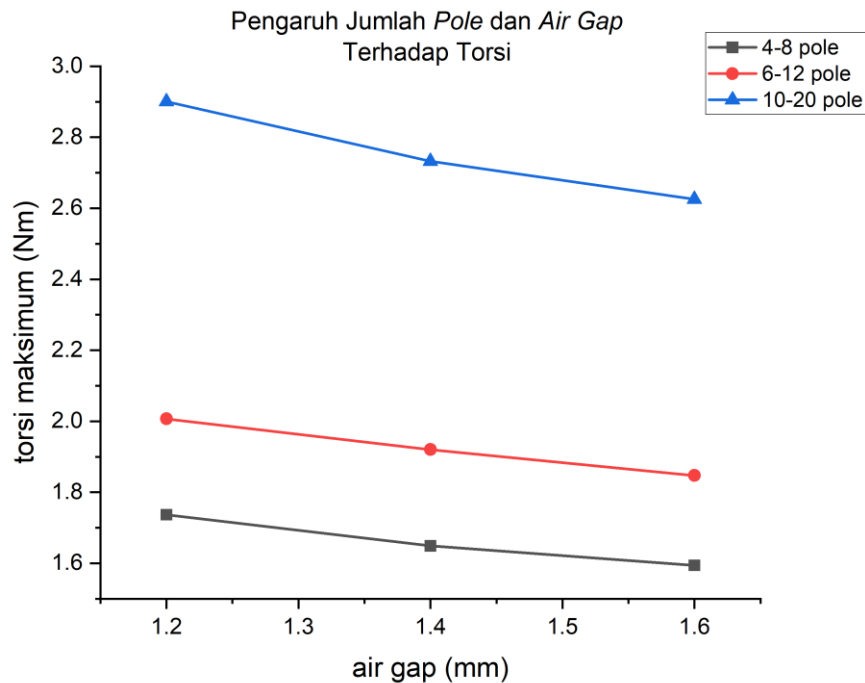
Hasil simulasi untuk mengetahui pengaruh *air gap* terhadap torsi dengan menetapkan pasangan *pole* 10-20 ditunjukkan pada Gambar 4.8. Pada Gambar 4.8 dapat diketahui bahwa dengan *air gap* yang berbeda dan juga jumlah *pole* yang sama maka akan didapatkan pengaruh terhadap nilai torsi yang mampu ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Beda halnya dengan pengamatan pengaruh jumlah *pole* terhadap torsi yang dihasilkan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear* yang dapat terlihat dari nilai maksimum torsi yang dapat ditransmisikan dan juga kontinuitas torsi yang dihasilkan, pada pengamatan pengaruh *air gap* terhadap torsi yang dihasilkan pasangan *radial internal magnetic spur gear* ini hanya dapat terlihat dari nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan. Nilai torsi maksimum ini didapatkan dari nilai *peak* kurva perubahan torsi terhadap waktu yang terdapat pada Gambar 4.8. Dengan mengamati nilai torsi maksimum akan didapatkan bahwa semakin kecil *air gap* yang terdapat diantara *high speed gear* dan *low speed gear* maka akan semakin besar nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan. Dengan *air gap* 1,6 mm akan didapatkan nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan sebesar 2,63 Nm, *air gap* 1,4 mm dapat mentransmisikan torsi maksimum sebesar 2,73 Nm, dan *air gap* 1,2 mm dapat mentransmisikan torsi maksimum sebesar 2,9 Nm.

Fluktuasi nilai torsi dari positif menjadi negatif ini juga disebabkan skema simulasi metode numerik yang statis. Skema simulasi metode numerik statis ini akan menyebabkan pertemuan kutub magnet antara *high speed gear* dan *low speed gear* akan menjadi berfluktuasi antara pertemuan kutub yang sama dan juga pertemuan kutub yang berbeda.

4.1.4 Analisis Pengaruh Jumlah *Pole* dan *Air Gap* Terhadap Torsi *Radial Internal Magnetic Spur Gear*

Berikut ini merupakan analisa gabungan dari pengaruh variasi jumlah *pole* dan besarnya *air gap* antara *high speed gear* dan *low speed gear* terhadap torsi yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Dalam menganalisa pengaruh kedua variabel ini terhadap nilai torsi yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear* hanya dapat dilihat dari nilai torsi maksimum yang dihasilkan dari setiap variasi. Berikut ini

merupakan perubahan nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear* akibat pengaruh dari perubahan jumlah *pole* yang digunakan dan juga besar *air gap* antara *high speed gear* dan *low speed gear* yang digunakan.



Gambar 4.9 Pengaruh Jumlah *Pole* dan *Air Gap* Terhadap Torsi Maksimum

Berdasarkan Gambar 4.9 dapat diketahui bahwa jumlah *pole* dan *air gap* yang digunakan mempengaruhi besar torsi yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Semakin banyak jumlah *pole* yang digunakan pada *radial internal magnetic spur gear* maka akan semakin meningkat pula kemampuan *radial internal magnetic spur gear* untuk mentransmisikan torsi. Hal tersebut dapat terlihat dari perubahan nilai maksimum torsi yang meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *pole* yang digunakan. Dengan interval penambahan 2 hingga 4 *pole* pada *high speed gear*, dan 4 hingga 8 *pole* pada *low speed gear*, maka akan didapatkan kenaikan nilai torsi statis maksimum sebesar 15,9% dan 43%. Namun, perlu diingat bahwa penambahan jumlah *pole* yang ditetapkan pada penelitian ini tidak mempengaruhi volume total magnet dan juga luas penampang magnet yang akan saling berinteraksi antara magnet pada *high speed gear* dan juga

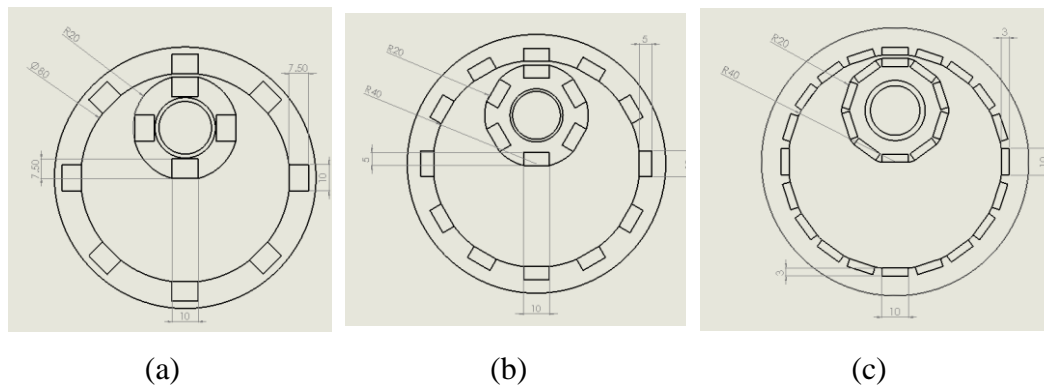
magnet pada *low speed gear*. Total volume magnet dan luas penampang magnet yang saling berinteraksi pada setiap variasi jumlah *pole* memiliki nilai yang tetap.

Selanjutnya dapat diketahui pula bahwa semakin kecil *air gap* yang terdapat diantara *high speed gear* dan *low speed gear* maka akan meningkatkan nilai maksimum torsi yang dapat ditransmisikan oleh *radial internal magnetic spur gear*. Hal ini disebabkan karena semakin kecilnya *air gap* pasangan magnet, maka akan semakin besar interaksi antara keduanya. Semakin besarnya interaksi pasangan magnet ini dapat terlihat dari *flux density* yang dihasilkan dari pasangan magnet yang saling berdekatan. Semakin kecil *air gap* pasangan magnet maka akan semakin semakin besar *flux density* yang dihasilkan. Dengan interval pengecilan *air gap* sebesar 0,2 mm, maka akan didapatkan kenaikan nilai torsi maksimum sebesar 3,8% hingga 5,3%. Berdasarkan tingkat kenaikan nilai torsi maksimum ini maka dapat diketahui bahwa penambahan jumlah *pole* dengan interval 2 hingga 4 *pole* pada *high speed gear* dan 4 hingga 8 *pole* pada *low speed gear* memiliki pengaruh yang lebih signifikan daripada pengecilan *air gap* dengan interval 0,2 mm. Penambahan jumlah *pole* akan meningkatkan nilai torsi maksimum berkisar 15,9% hingga 43%. Sementara itu, pengecilan *air gap* akan meningkatkan nilai torsi maksimum sebesar 3,8% hingga 5,3%. Dalam hal fabrikasi *magnetic gear* perlu untuk mempertimbangkan jumlah *pole* yang digunakan apabila ingin meningkatkan kemampuan transmisi torsi dari *magnetic gear*. Nilai torsi maksimum terbesar yang dapat dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* dengan metode numerik simulasi menggunakan *software ANSYS Maxwell* adalah sebesar 2,9 Nm. Nilai torsi maksimum ini didapatkan dengan jumlah pasangan *pole* 10-20 dan juga *air gap* 1,2 mm. Sementara itu, nilai torsi maksimum terkecil yang dapat dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* dengan metode numerik simulasi ini sebesar 1,6 Nm. Nilai torsi maksimum ini didapatkan dengan jumlah pasangan *pole* 4-8 dan juga *air gap* 1,6 mm.

4.2 Analisis Hasil Eksperimen

Metode berikutnya yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan menggunakan metode eksperimen. Rancangan metode eksperimen yang digunakan

pada penelitian ini adalah dengan melakukan uji eksperimen untuk variasi jumlah pasangan *pole* 10-20. Hal ini ditetapkan berdasarkan hasil simulasi yang menunjukkan bahwa variasi jumlah *pole* yang dapat mentransmisikan torsi maksimum paling besar adalah dengan pasangan jumlah *pole* 10-20. Pada skema penelitian ini digunakan pasangan *pole* maksimum 10-20 *pole*. Hal ini bertujuan untuk mempertahankan total volume magnet dan luas penampang magnet yang saling berpasangan agar tetap sama pada setiap variasi jumlah *pole*. Oleh karena itu, dengan rancangan diameter *high speed gear* 40 mm, dan diameter *low speed gear* sebesar 80 mm memiliki batasan penggunaan jumlah pasangan *pole* sebanyak 10-20 apabila menggunakan magnet dengan ukuran panjang 30 mm dan lebar 10 mm. Parameter ukuran magnet yang berbeda pada setiap variasi terletak pada ukuran tebal magnet. Berikut perbandingan model dari setiap variasi jumlah *pole* dengan mempertahankan volume total magnet dan luas permukaan kontak yang sama pada setiap variasinya.



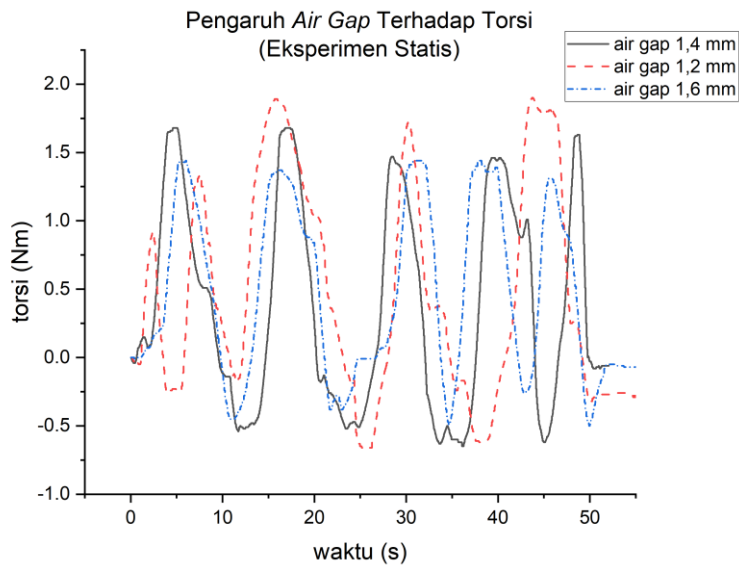
Gambar 4.10 Model setiap variasi jumlah *pole* (a) 4-8 *pole*; (b) 6-12 *pole*; (c) 10-20 *pole*

Selanjutnya untuk variasi *air gap* yang digunakan pada metode eksperimen ini tetap menggunakan 3 variasi yaitu *air gap* sebesar 1,2 mm, 1,4 mm, dan 1,6 mm. Tujuan dilaksanakan metode eksperimen ini adalah untuk mengetahui bagaimana performa *radial internal magnetic spur gear* yang dibentuk pada penelitian ini dalam mentransmisikan torsi secara aktual dengan variasi yang telah ditetapkan. Pengamatan nilai torsi yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear* secara aktual ini nantinya akan dibandingkan dengan hasil dari metode numerik, dimana skema simulasi pada metode numerik terbatas pada performa secara statis.

Dengan metode eksperimen ini juga nantinya dapat diketahui bagaimana performa dari *radial internal magnetic spur gear* dalam skema statis dan dinamis untuk mentransmisikan torsi. Dengan skema statis dan dinamis ini akan didapatkan performa *radial internal magnetic spur gear* dalam mentransmisikan torsi statis dan dinamis. Nilai torsi yang diamati pada eksperimen ini adalah torsi yang terdapat pada *shaft* yang terhubung dengan *low speed gear*. Torsi ini merupakan torsi *output* dari pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Dalam pelaksanaan metode eksperimen ini, peneliti menggunakan data pembacaan sensor dengan bantuan *microcontroller* Arduino. Dengan pembacaan torsi melalui Arduino ini maka akan didapatkan skema pembacaan torsi secara *real time*, dimana torsi tersebut merupakan torsi *output* dari pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Peneliti tidak menggunakan *display Omega DP-41S* untuk membaca hasil torsi dari sensor karena dengan *display* ini tidak dapat dilakukan penyimpanan dan pengamatan nilai torsi secara *real time*.

4.2.1 Analisis Pengaruh Air Gap Terhadap Torsi Statis

Metode eksperimen statis ini dilakukan tanpa menggunakan *input* motor sebagai penggerak. Eksperimen statis ini dilakukan dengan memberikan *input* torsi pada *shaft input* yang terhubung dengan *high speed gear*, dan juga menahan *shaft output* yang terhubung dengan *low speed gear* agar tidak ikut berputar. Skema eksperimen statis ini dilakukan dengan memutar *shaft input* secara perlahan dan menahan *shaft output* agar tidak ikut berputar. Putaran *shaft input* secara perlahan ini terus diberikan hingga terjadi *loss interaction* antar magnet yang terdapat pada *high speed gear* dan juga *low speed gear*. Selama putaran *input* diberikan secara perlahan, nilai torsi akan terbaca pada sensor yang selanjutnya mengirimkan sinyal pada *microcontroller* untuk menampilkan informasi berapa nilai torsi yang terbaca, dan selama putaran tersebut akan terbaca pula berapa nilai torsi maksimum yang dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Dengan skema seperti ini akan didapatkan nilai torsi statis yang dapat dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Berikut ini merupakan nilai torsi statis yang dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear*.

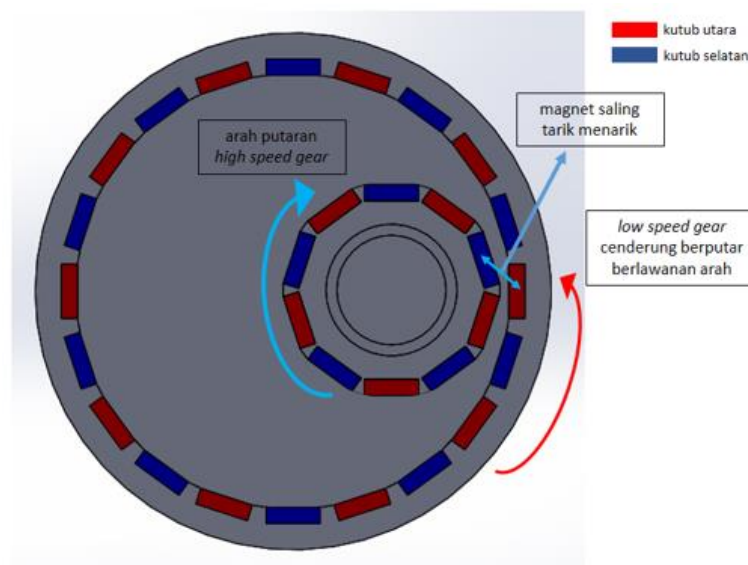


Gambar 4.11 Torsi Statis dengan Jumlah *Pole* 10-20 dan Variasi *Air Gap*

Gambar 4.11 menunjukkan bagaimana pembacaan torsi statis yang dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa dengan *air gap* yang berbeda dan juga jumlah *pole* yang sama maka akan didapatkan pengaruh terhadap nilai torsi statis yang mampu ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Nilai torsi statis maksimum ini didapatkan dari nilai *peak* kurva perubahan torsi terhadap waktu yang terdapat pada Gambar 4.11. Dengan mengamati nilai torsi statis maksimum akan didapatkan bahwa semakin kecil *air gap* yang terdapat antara *high speed gear* dan *low speed gear* maka akan semakin besar nilai torsi statis maksimum yang dapat ditransmisikan. Dengan *air gap* 1,6 mm akan didapatkan nilai torsi statis maksimum yang dapat ditransmisikan sebesar 1,43 Nm, *air gap* 1,4 mm dapat mentransmisikan torsi maksimum sebesar 1,6 Nm, dan *air gap* 1,2 mm dapat mentransmisikan torsi maksimum sebesar 1,8 Nm. Dengan interval pengecilan *air gap* sebesar 0,2 mm didapatkan kenaikan nilai maksimum torsi statis sebesar 11,8% hingga 12,5%. Kenaikan nilai maksimum torsi statis dari eksperimen akibat pengaruh pengecilan *air gap* dengan interval 0,2 mm ini lebih besar daripada kenaikan nilai maksimum torsi dari hasil simulasi.

Pada pembacaan torsi statis dengan metode eksperimen ini juga dapat terlihat adanya fluktuasi nilai torsi antara nilai torsi positif dan torsi negatif seperti pada

simulasi. Fluktuasi nilai torsi ini terjadi pada saat pasangan *pole* dengan kutub yang sama saling bertemu. Saat kutub yang sama saling bertemu akan menyebabkan gaya yang terjadi antar magnet menjadi tolak menolak. Saat *high speed gear* terus berputar pada arah yang sama dan *low speed gear* tetap ditahan dalam keadaan statis, maka pasangan *pole* dengan kutub yang sama akan bergantian menjadi pasangan *pole* dengan kutub yang berbeda. Pada saat transisi pergantian pasangan *pole* ini akan terdapat momen dimana *low speed gear* yang dalam keadaan statis mengalami kecenderungan untuk berputar berlawanan arah. Kecenderungan untuk berputar berlawanan arah ini terjadi akibat magnet pada *low speed gear* akan saling tarik menarik dengan magnet pada *high speed gear* setelah kutub yang sama tadi bertemu. Momen saat *low speed gear* cenderung untuk berputar berlawanan arah dapat terlihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Kecenderungan low speed gear berputar berlawanan arah

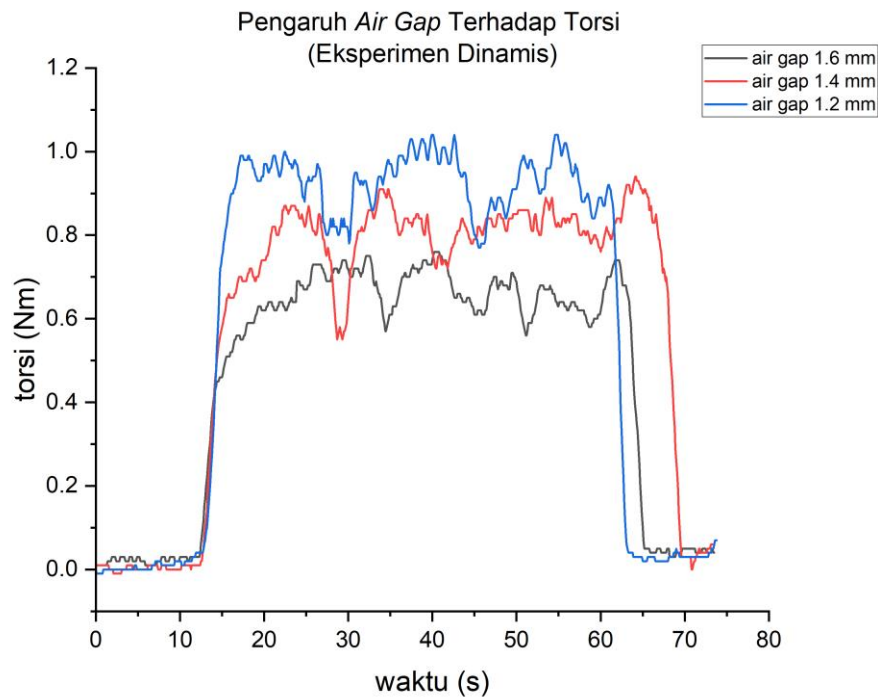
Setelah pasangan magnet dengan kutub yang sama saling bertemu, maka *low speed gear* akan mengalami kecenderungan untuk berputar berlawanan arah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.12. Kecenderungan *low speed gear* untuk berputar berlawanan arah ini akan menghasilkan torsi yang berlawanan arah dengan arah sebelumnya, dan pembacaan pada *torque meter* menjadi negatif. Namun, pada Gambar 4.11 dapat diketahui bahwa besar torsi berlawanan arah (torsi negatif) yang terjadi cenderung lebih kecil apabila dibandingkan dengan torsi yang searah dengan

arah putaran *high speed gear*. Hal ini terjadi dikarenakan terdapat toleransi yang cukup besar dari ukuran lubang pada *shaft* yang menghubungkan *prototype magnetic gear* dengan *torque meter* dan juga *brake*. Toleransi dari sambungan *shaft* ini mengakibatkan rangkaian *output magnetic gear* tidak berada dalam kondisi statis secara sempurna. Toleransi pada sambungan *shaft* ini memungkinkan *low speed gear* masih dapat berputar bebas walaupun *drum brake* telah diberikan *load* hingga tidak dapat berputar. Oleh karena itu, pada rangkaian eksperimen ini *low speed gear* masih dapat berputar berlawanan arah sesaat dan menyebabkan torsi yang dihasilkan saat kondisi berputar pada arah berlawanan tersebut tidaklah maksimal seperti saat berputar pada arah yang sama dengan arah putaran *high speed gear*.

Pada Gambar 4.11 juga dapat diketahui bahwa terdapat perbedaan frekuensi perubahan torsi terhadap waktu pada eksperimen statis dan simulasi. Perbedaan frekuensi dari pengamatan eksperimen statis dan simulasi ini dikarenakan input putaran *high speed gear* pada rangkaian eksperimen statis tidak menggunakan motor dengan kecepatan konstan 110 rpm. Skema eksperimen statis menggunakan input putaran dengan bantuan kunci torsi untuk memutar *high speed gear*. Putaran *high speed gear* pada pengamatan eksperimen statis diberikan secara perlahan. Hal ini bertujuan agar pengamatan torsi statis pada rangkaian bisa mencapai nilai maksimum dalam pembacaan *torque meter*. Apabila putaran yang diberikan terlalu cepat, maka transisi perubahan pasangan *pole* pada *magnetic gear* juga akan terjadi dengan cepat dan mengakibatkan pasangan *pole* tidak dapat mencapai momentum untuk menghasilkan torsi maksimum. Beda halnya dengan skema simulasi, dimana dalam skema simulasi akan tetap bisa melakukan perhitungan numerik nilai torsi secara detail tergantung pada *time step* yang kita tentukan. Sekalipun *high speed gear* diberikan input kecepatan tinggi, perhitungan pendekatan numerik pada simulasi tetap akan bisa dilakukan secara detail sesuai dengan *time step* yang ada, sehingga pembacaan torsi akan tetap detail hingga nilai torsi maksimum. Hal inilah yang menyebabkan perbedaan frekuensi dari pembacaan torsi statis dengan skema eksperimen dan numerik.

4.2.2 Analisis Pengaruh *Air Gap* Terhadap Torsi Dinamis

Metode eksperimen selanjutnya yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimen dengan melakukan pengamatan torsi dinamis saat rangkaian *radial internal magnetic spur gear* diberikan inputan putaran dan torsi dari motor dc. . Untuk mengamati torsi dinamis ini dilakukan dengan memberikan *input* putaran dengan kecepatan tertentu dan torsi pada *shaft input* yang terhubung dengan *high speed gear*. Kecepatan input dari motor ditetapkan sebesar 110 rpm konstan. Selanjutnya diberikan pembebanan pada *shaft output* yang terhubung dengan *low speed gear*. Pembebanan pada shaft output ini dilakukan dengan menggunakan mekanisme *braking system*. *Brake* yang terhubung dengan *shaft output* ini diberikan pembebanan berupa gesekan. Pembebanan yang diberikan pada *brake* ini ditambah secara perlahan hingga pasangan magnet yang berada pada *radial internal magnetic spur gear* mengalami *loss interaction*. Pembacaan torsi pada microcontroller akan menampilkan perubahan torsi yang terbaca pada *shaft output* seiring dengan penambahan pembebanan pada *brake* hingga terjadinya *loss interaction* dari pasangan magnet. Nilai maksimum torsi dinamis dan fenomena *loss interaction* secara aktual dari pasangan magnet akan diketahui melalui skema ini. Pengamatan torsi dinamis dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* juga menggunakan variasi *air gap* pada jumlah *pole* yang sama. Berikut ini merupakan nilai torsi dinamis yang dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* dengan variasi *air gap* yang telah ditetapkan.



Gambar 4.13 Torsi Dinamis dengan Jumlah *Pole* 10-20, Kecepatan *Input* Konstan 110 rpm, dan Variasi *Air Gap*

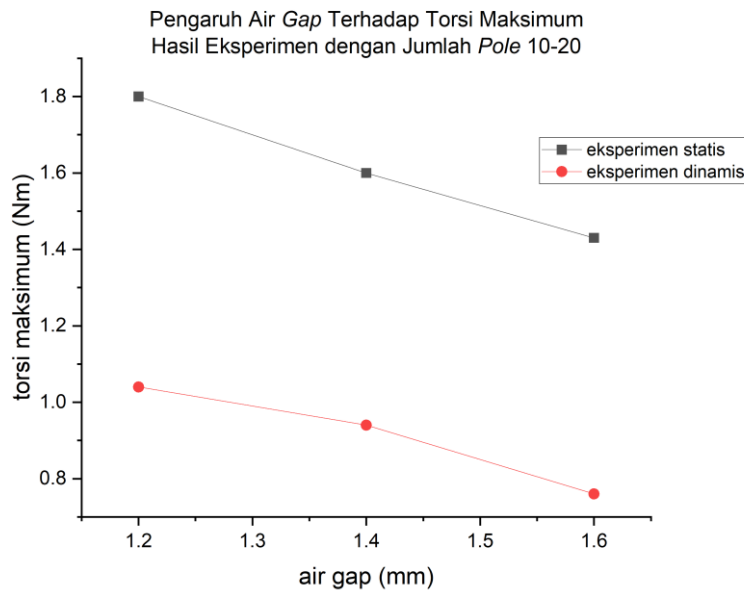
Gambar 4.13 menunjukkan bagaimana pembacaan torsi dinamis yang dihasilkan dari pasangan *radial internal magnetic spur gear* dengan kecepatan input pada *high speed gear* konstan sebesar 110 rpm. Pada gambar tersebut dapat diamati fenomena yang sama bahwa dengan *air gap* yang berbeda dan juga jumlah *pole* yang sama maka akan didapatkan pengaruh terhadap nilai torsi dinamis yang mampu ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Dengan mengamati nilai torsi dinamis maksimum ini akan didapatkan bahwa semakin kecil *air gap* yang terdapat antara *high speed gear* dan *low speed gear* maka akan semakin besar nilai torsi dinamis maksimum yang dapat ditransmisikan. Dengan *air gap* 1,6 mm akan didapatkan nilai torsi dinamis maksimum yang dapat ditransmisikan sebesar 0,76 Nm, *air gap* 1,4 mm dapat mentransmisikan torsi dinamis maksimum sebesar 0,94 Nm, dan *air gap* 1,2 mm dapat mentransmisikan torsi dinamis maksimum sebesar 1,04 Nm. Dengan interval pengecilan *air gap* sebesar 0,2 mm didapatkan kenaikan nilai maksimum torsi dinamis sebesar 10,6% hingga 23,7%. Kenaikan nilai maksimum torsi dinamis dari eksperimen akibat

pengaruh pengecilan *air gap* dengan interval 0,2 mm ini lebih besar daripada kenaikan nilai maksimum torsi statis dari hasil eksperimen.

Fenomena terjadinya *loss interaction* pasangan magnet yang terdapat pada *high speed gear* dan *low speed gear* dapat terlihat jelas pada Gambar 4.13. *Loss interaction* ini dapat diamati dengan adanya penurunan nilai torsi dinamis yang terbaca secara signifikan setelah mencapai nilai torsi maksimum. Seperti contoh *loss interaction* pasangan magnet dengan variasi *air gap* 1,2 mm terjadi pada detik ke 27 dan detik ke 44 pada Gambar 4.13. *Loss interaction* pasangan magnet pada *radial internal magnetic spur gear* sendiri menandakan bahwa torsi *load* yang diberikan pada *brake* telah melebihi kemampuan transmisi torsi dinamis *radial internal magnetic spur gear*, ataupun *radial internal magnetic spur gear* tidak mampu mentransmisikan torsi yang lebih besar lagi. Sehingga dapat dikatakan bahwa nilai torsi yang terbaca sesaat sebelum terjadinya *loss interaction* merupakan torsi dinamis maksimum yang dapat ditransmisikan oleh *radial internal magnetic spur gear*.

4.2.3 Analisis Torsi Statis dan Torsi Dinamis *Radial Internal Magnetic Spur Gear* dengan Eksperimen

Berikut ini merupakan analisa performa *radial internal magnetic spur gear* yang telah dirancang dengan meninjau kemampuan mentransmisikan torsi statis dan torsi dinamis. Analisa ini dapat dilakukan dengan meninjau nilai torsi statis dan torsi dinamis maksimum yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear* dengan variasi *air gap* yang telah ditetapkan. Berikut ini merupakan perubahan nilai torsi statis dan torsi dinamis maksimum yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear* akibat pengaruh dari *air gap* antara *high speed gear* dan *low speed gear* yang digunakan.



Gambar 4.14 Perbandingan Nilai Torsi Statis dan Torsi Dinamis Maksimum

Berdasarkan Gambar 4.14 dapat diketahui bahwa besar *air gap* pada *high speed gear* dan *low speed gear* berpengaruh terhadap performa *radial internal magnetic spur gear* dalam mentransmisikan torsi. Semakin kecil *air gap* maka akan semakin besar pula nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan, baik itu torsi statis maupun negatif. Kenaikan nilai torsi statis dari eksperimen akibat pengaruh pengecilan *air gap* sebesar 0,2 mm ini sebesar 11,8% hingga 12,5%. Sememtar itu, kenaikan nilai torsi dinamis akibat pengecilan *air gap* dengan interval 0,2 mm yaitu sebesar 10,6% hingga 23,7%. Selain itu, berdasarkan Gambar 4.14 dapat diketahui pula bahwa kemampuan pasangan *radial internal magnetic spur gear* dalam pengamatan torsi statis dan torsi dinamis berbeda signifikan. Perbedaan nilai maksimum torsi statis dan torsi dinamis dari hasil eksperimen ini berkisar antara 70% hingga 88%. Perbedaan tersebut timbul karena pengamatan torsi dinamis melibatkan banyak komponen bergerak, dimana komponen tersebut menjadi variabel yang berpengaruh terhadap kemampuan *radial internal magnetic spur gear* dalam mentransmisikan torsi dinamis. Beda halnya dengan pengamatan torsi statis yang tidak melibatkan pergerakan berupa putaran dari komponen-komponen yang ada sebagai satu kesatuan dengan *radial internal magnetic spur gear*. Adapun berikut merupakan beberapa faktor yang telah dianalisa pada penelitian ini sebagai

penyebab adanya perbedaan dari pengamatan torsi statis maksimum dan torsi dinamis maksimum yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear*, diantaranya adalah:

1. Pada pengamatan torsi statis tidak melibatkan variabel-variabel dinamis yang dapat mempengaruhi besar torsi yang dapat ditransmisikan. Variabel dinamis yang dapat terlibat diantaranya adalah:
 - Momen inersia dari komponen yang berputar seperti momen inersia dari *radial internal magnetic spur gear* itu sendiri, momen inersia *shaft*, momen inersia *torque meter*
 - Adanya kekakuan *shaft* yang terhubung dengan pasangan *radial internal magnetic spur gear*
 - Gesekan pada *bearing*. Adapun jenis *bearing* yang digunakan pada rangkaian eksperimen adalah *ball bearing*. Gesekan yang terjadi pada *bearing* akan berpengaruh terhadap torsi dan daya yang dihasilkan dari mekanisme rangkaian yang berputar. Berikut ini merupakan besar koefisien gesek rata-rata pada setiap jenis *bearing*, dan perhitungan daya yang hilang akibat gesekan pada *bearing*.

Tabel 4.5 Koefisien Gesek pada *Bearing*

Jenis <i>Bearing</i>	<i>Starting</i>		<i>Running</i>	
	<i>Radial</i>	<i>Thrust</i>	<i>Radial</i>	<i>Thrust</i>
<i>ball bearing</i>	0,0025	0,006	0,0015	0,004
<i>spherical roller bearing</i>	0,003	0,12	0,0018	0,008
<i>Cylindrical roller bearing</i>	0,002	-	0,0011	-

$$hp = \frac{\mu \times Fr \times d \times n}{126050}$$

hp = daya (hp)

μ = koefisien gesek

n = kecepatan rotasi (rpm)

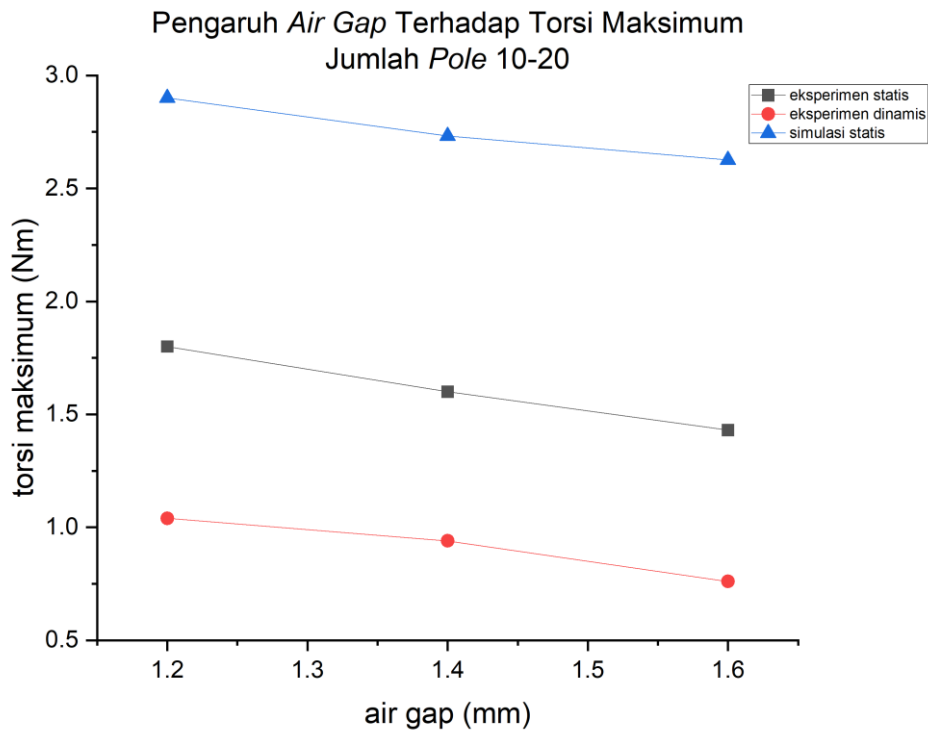
Fr = beban radial pada *bearing* (lb)

d = *bearing bore* (in)

2. Pada pengamatan torsi dinamis, *pole* yang ada akan ikut berputar sesuai dengan kecepatan putar *input*. Pergerakan rotasi dari *pole* yang akan selalu mengikuti kecepatan putaran *input* ini menjadi salah satu penyebab setiap pasangan *pole* yang ada pada *radial internal magnetic spur gear* tidak bisa memberikan gaya dan torsi hingga maksimum karena transisi *loss interaction* pada pasangan *pole* yang cepat. Berbeda halnya dengan pengamatan torsi statis dimana putaran *input* dilakukan secara perlahan, dan transisi *loss interaction* pada pasangan *pole* ini juga terjadi secara perlahan.
3. Adanya *delay* pembacaan *torque meter* yang menyebabkan pembacaan pada saat transisi *loss interaction* pada pasangan *pole* tidak bisa terbaca secara rinci karena terjadi dengan cepat mengikuti putaran input pada *high speed gear*.

4.3 Analisis Perbandingan Nilai Torsi pada Metode Simulasi dan Eksperimen

Setelah dilakukan analisis dengan menggunakan metode numerik *finite element* simulasi dan juga metode eksperimen, maka akan didapatkan nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *radial internal magnetic spur gear* sebagai indikator performa. Pada sub bab ini akan dibahas terkait hasil pengamatan nilai torsi maksimum yang didapatkan dengan metode numerik *finite element* dan juga metode eksperimen. Berikut ini merupakan gambar perbandingan pengamatan nilai torsi maksimum dengan menggunakan metode numerik *finite element* dan juga metode eksperimen dengan variasi *air gap* yang telah ditetapkan dan jumlah *pole* 10-20.



Gambar 4.15 Perbandingan Nilai Torsi Maksimum Metode Simulasi dan Eksperimen dengan variasi *Air Gap* dan Jumlah *Pole* 10-20

Berdasarkan Gambar 4.15 dapat diamati bahwa semua metode yang digunakan menunjukkan *air gap* yang ada antara *high speed gear* dan *low speed gear* berpengaruh terhadap performa pasangan *radial internal magnetic spur gear*. Semakin kecil *air gap* yang digunakan maka akan semakin besar torsi yang dapat ditransmisikan. Selain itu, pada Gambar 4.15 ditunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara nilai torsi maksimum yang didapatkan dengan metode numerik *finite element* dan juga metode eksperimen. Perbedaan terkait pengamatan torsi statis dan torsi dinamis pada rangkaian eksperimen telah dibahas pada sub bab sebelumnya. Pada sub bab ini akan lebih dibahas terkait perbedaan antara hasil simulasi *finite element* dengan skema pengamatan torsi statis dan hasil pengamatan torsi statis dengan metode eksperimen.

Pada Gambar 4.15 dapat diketahui bahwa nilai torsi statis dari metode numerik *finite element* dan metode eksperimen memiliki perbedaan yang sangat signifikan. Perbedaan yang terdapat pada nilai maksimum torsi statis hasil dari simulasi dan eksperimen yaitu berkisar antara 61% hingga 83%. Terdapat beberapa faktor yang

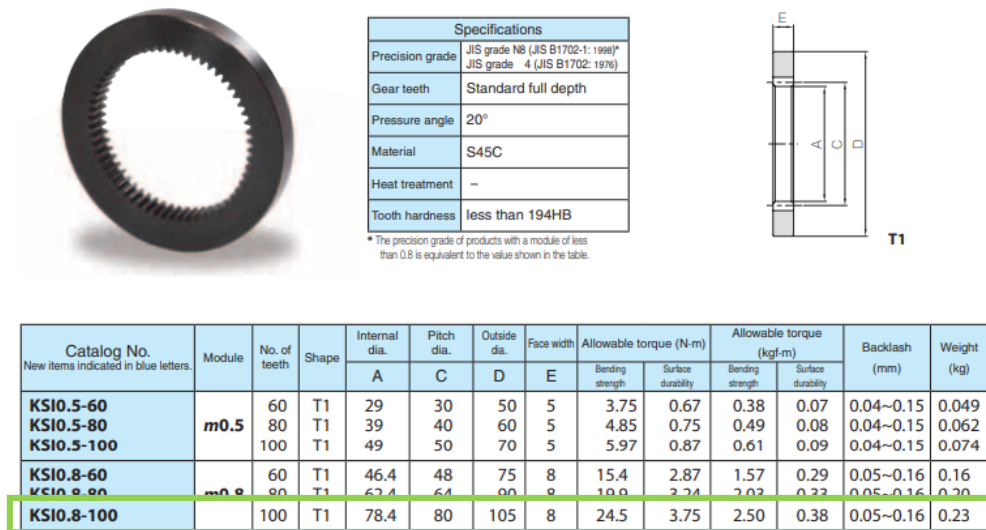
telah dianalisa pada penelitian ini sebagai penyebab adanya perbedaan nilai torsi statis maksimum dari hasil simulasi dan eksperimen. Hal tersebut juga menjadi batasan yang ada pada penelitian ini. Beberapa faktor yang ada diantaranya adalah:

1. Input nilai kekuatan magnet permanen pada metode numerik *finite element* berdasarkan pada pendekatan *material properties* magnet neodmium dengan *grade* N35 secara *general*. Pada kondisi ideal seharusnya input kekuatan magnet pada metode numerik *finite element* berdasarkan pengukuran dengan *Gauss Meter* untuk mengukur kuat magnet yang digunakan pada rangkaian eksperimen. Pada penelitian ini terbatas pada keberadaan alat ukur *Gauss Meter* tersebut. Sehingga kekuatan magnet pada input metode numerik *finite element* berdasarkan pada *material properties* secara *general*.
2. Pemodelan arah dan kekuatan medan magnet pada metode numerik *finite element* yang dianggap *uniform* pada semua sisi.
3. Toleransi geometri *radial internal magnetic spur gear* hasil *assembly* yang cukup besar. Besarnya toleransi geometri *magnetic gear* pada rangkaian eksperimen ini akan menyebabkan *air gap* yang ada menjadi tidak konstan pada setiap pasangan *pole*.

4.4 Analisis Perbandingan Kemampuan *Internal Magnetic Gear* pada Penelitian dengan *Internal Mechanical Gear*

Kemampuan *radial internal magnetic spur gear* telah dianalisa pada penelitian ini. Pengamatan torsi statis *internal magnetic gear* pada penelitian memiliki nilai yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan pengamatan torsi dinamis. Beberapa analisa telah disebutkan pada sub bab sebelumnya. Kemampuan model *internal magnetic gear* pada penelitian ini dapat mencapai torsi statis sebesar 2,9 Nm dengan hasil simulasi numerik, dan juga 1,8 Nm dengan hasil eksperimen statis. Apabila nilai torsi yang diberikan melebihi nilai maksimum tersebut, maka *magnetic gear* akan mengalami slip atau *loss interaction* dari pasangan magnet yang ada. Kemampuan model *internal magnetic gear* ini dalam mentransmisikan torsi masih cukup jauh apabila dikomparasikan dengan kemampuan *internal mechanical gear*.

Berdasarkan katalog produk “KHK” untuk *internal mechanical gear* maka dapat diketahui bagaimana perbandingan kemampuan *internal magnetic gear* pada model penelitian dan juga *internal mechanical gear* dengan ukuran yang identik dalam mentransmisikan torsi. Berikut ini merupakan katalog produk “KHK” untuk *internal mechanical gear*.

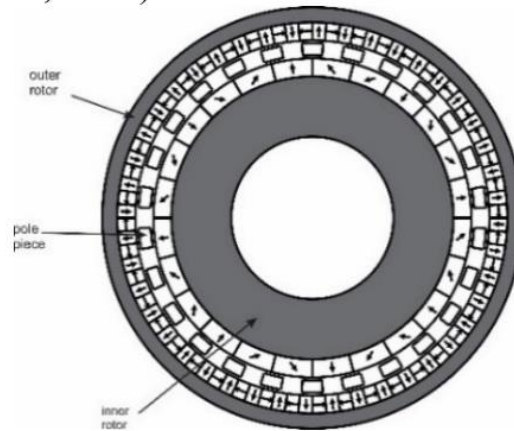


Gambar 4.16 Katalog Produk KHK *Internal Gear*

Dengan ukuran diameter *internal* 80 mm pada *magnetic gear* didapatkan kemampuan transmisi torsi sebesar 2,9 Nm. Sementara itu, dengan ukuran diameter 78,4 mm pada *internal mechanical gear* dapat diketahui *allowable torque* yang ada mencapai 24,5 Nm. *Mechanical gear* ini menggunakan material steel S45C dengan jumlah gigi sebanyak 100. Sementara itu, *magnetic gear* menggunakan magnet permanen *neodymium* dengan grade N35. Berdasarkan komparasi tersebut dapat diketahui bahwa kemampuan *internal magnetic gear* pada model memiliki kemampuan yang cukup jauh apabila dibandingkan dengan kemampuan *internal mechanical gear*.

Perlu adanya inovasi untuk meningkatkan kemampuan *magnetic gear* dalam mentransmisikan torsi. Inovasi yang telah dikembangkan adalah menyusun *magnetic gear* agar memiliki *flux density* yang lebih besar lagi dari yang sudah ada. Untuk mencapai ini, telah banyak topologi baru yang dikembangkan dari model *internal magnetic gear* sederhana seperti yang ada pada penelitian ini. Beberapa model yang ada diantaranya adalah:

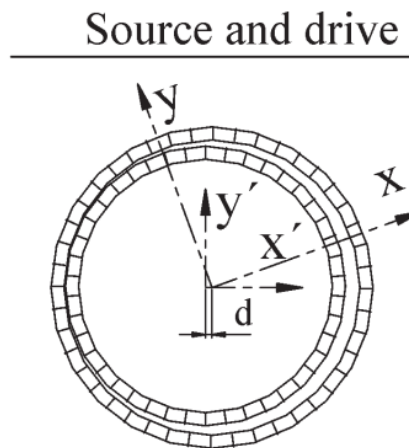
1. Coaxial Magnetic Gear



Gambar 4.17 Coaxial Magnetic Gear

Model *coaxial magnetic gear* menggunakan tambahan *pole piece* sebagai penghubung antara *high speed gear* dan *low speed gear*. Dengan adanya *pole piece* dari bahan ferromagnetik ini dapat membuat semua magnet yang ada pada *magnetic gear* menjadi magnet yang saling berinteraksi, tanpa ada magnet pasif. Dengan begitu, *flux density* yang ada akan semakin besar dan menjadikan kemampuan transmisi torsi dari *magnetic gear* semakin meningkat.

2. Cycloidal Magnetic Gear



Gambar 4.18 Cycloidal Magnetic Gear

Model *cycloidal magnetic gear* ini juga merupakan perkembangan dari model internal magnetic gear sederhana seperti yang ada pada penelitian ini. Tujuan dari model cycloidal magnetic gear ini juga untuk memperbanyak magnet yang saling berinteraksi, sehingga semakin sedikit magnet pasif. Model cycloidal magnetic gear

ini sebenarnya merupakan model *internal magnetic gear* yang memiliki rasio sangat kecil, yaitu mendekati 1:1. Hal ini dikarenakan rasio ukuran *gear* dan jumlah magnet yang mendekati rasio 1:1 antara *high speed* dan juga *low speed gear*. Oleh karena itu, digunakan rangkaian gerakan rotasi cycloidal pada model ini. Dengan begitu dapat dicapai interaksi magnet yang ada sangatlah besar, namun rasio putaran tidak terlalu kecil mendekati 1:1.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Hasil pengujian dengan metode numerik *finite element* pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa jumlah *pole* yang digunakan pada *radial internal magnetic spur gear* memiliki pengaruh terhadap nilai torsi statis yang dihasilkan oleh pasangan *magnetic gear* ini. Semakin banyak jumlah *pole* yang digunakan maka akan semakin besar nilai torsi maksimum yang dapat ditransmisikan oleh pasangan *magnetic gear* ini. Dengan interval penambahan 2 hingga 4 *pole* pada *high speed gear*, dan 4 hingga 8 *pole* pada *low speed gear*, maka akan didapatkan kenaikan nilai torsi statis maksimum sebesar 15,9% dan 43%. Dengan catatan bahwa volume total magnet dan luas area kontak antar magnet memiliki nilai yang tetap walaupun jumlah *pole* berbeda. Selain itu, dengan penggunaan jumlah *pole* yang semakin sedikit akan mempengaruhi kontinuitas dari nilai torsi yang dapat ditransmisikan oleh *radial internal magnetic spur gear* ini. Kontinuitas nilai torsi akan terganggu dengan menggunakan jumlah *pole* yang lebih sedikit.
2. Hasil pengujian terkait pengaruh variasi *air gap* pada penelitian ini dapat disimpulkan bahwa besar *air gap* yang ada antara *high speed gear* dan *low speed gear* memiliki pengaruh terhadap nilai torsi statis maupun dinamis yang dapat ditransmisikan oleh *radial internal magnetic spur gear*. Semakin kecil *air gap* yang ada maka akan semakin meningkat nilai torsi yang dapat ditransmisikan oleh *radial internal magnetic spur gear*. Hal tersebut dikarenakan *flux density* antar *pole* yang mengalami interaksi semakin besar ketika *air gap* semakin kecil. Dengan interval pengecilan *air gap* sebesar 0,2 mm, maka akan didapatkan kenaikan nilai torsi maksimum sebesar 3,8% hingga 5,3%.

3. Terdapat perbedaan yang cukup signifikan dari hasil pengamatan torsi statis dan torsi dinamis pada eksperimen. Perbedaan nilai maksimum torsi statis dan torsi dinamis dari hasil eksperimen ini berkisar antara 70% hingga 88%. Perbedaan hasil dari kedua metode ini berdasarkan kepada skema pengujian yang berbeda yaitu pengujian yang bersifat statis dan dinamis. Pengujian dinamis banyak melibatkan variabel dari komponen benda berputar yang mempengaruhi transmisi torsi dari pasangan *radial internal magnetic gear ini*. Variabel tersebut seperti momen inersia dari komponen yang berputar, adanya hambatan gesek pada *bearing*, adanya *delay* pembacaan nilai torsi dari sensor. Sementara itu, terdapat pula perbedaan yang signifikan dari hasil pengamatan torsi statis pada eksperimen dan simulasi. Perbedaan yang terdapat pada nilai maksimum torsi statis hasil dari simulasi dan eksperimen yaitu berkisar antara 61% hingga 83%. Terdapat beberapa penyebab terkait hal tersebut, di antaranya adalah pada metode numerik *finite element* terdapat beberapa pendekatan untuk memodelkan kekuatan magnet berdasarkan *material properties general*. Hal tersebut dikarenakan adanya batasan alat ukur kekuatan magnet *Gauss Meter* yang tidak terdapat pada penelitian ini. Sehingga tidak diketahui kuat medan magnet yang ada secara aktual. Sedangkan pada rangkaian eksperimen sendiri terdapat toleransi geometri yang cukup besar. Hal tersebut mengakibatkan tidak meratanya *air gap* yang ada pada setiap pasangan *pole*.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran guna mengembangkan penelitian selanjutnya mengenai analisa performa *magnetic gear* ini. Berikut adalah beberapa saran untuk penelitian kedepannya:

1. Perlu diperhatikan toleransi geometri yang dibentuk untuk rangkain pengujian secara eksperimen.
2. Perlu diketahui kekuatan magnet permanen yang digunakan pada eksperimen secara aktual, sehingga input untuk metode numerik bisa langsung menggunakan nilai aktual tersebut.

3. Skema pengujian eksperimen perlu ditingkatkan menggunakan *brake* elektromagnetik sehingga mudah mengetahui torsi *load* yang diberikan.
4. Perlu memperhatikan kekuatan *gear blank* agar tidak terdeformasi akibat gaya tarik menarik magnet yang kuat, dan juga agar tetap *balance* saat berputar.

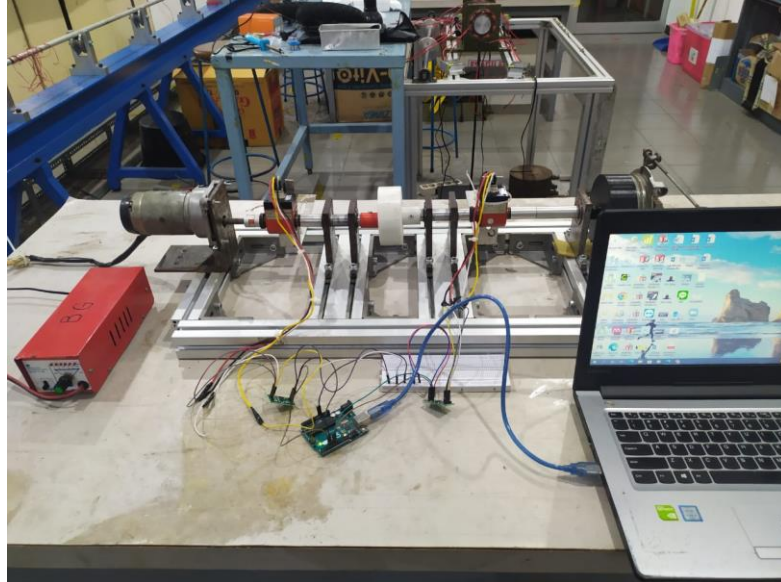
DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS Inc. 2010. *ANSYS Maxwell 3D User's Guide*. Canonsburg: ANSYS Incorporated.
- Deutschman, A., Michels, W., & Wilson, W. 1975. *Machine Design: Theory and Practice*. New York: Macmillan.
- Furlani, E. P. 2000. *Analytical Analysis of Magnetically Coupled Multipole Cylinders*. Issue.1. Journal of Physics D: Applied Physics. Vol. 33. pp. 28-33.
- Ghafara, A. 2020. *Analisis Torsi Pada Roda Gigi Magnetik Radial secara Simulasi dan Eksperimen*. Surabaya (ID): Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- 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.
- Hu, Chongqing. 2016. *Development of a Gear Vibration Indicator and its Application in Gear Wear Monitoring*. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol, 76-77. pp, 319-366.
- Jorgensen, F. T. 2010. *Design and Contruction of Permanent Magnetic Gears*. Department of Energy Technology, Aalborg University.
- Jorgensen, F. T., Andersen, T. O., & Rasmussen, P. O. 2008. *The Cycloid Permanent Magnetic Gear*. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44.
- Liguori, Aurelio. 2020. *Noise Reduction in Spur Gear Systems*. Entropy 2020, 22, 1306
- Mulyadi, R. 2011. *Penyusunan Program Excell untuk Perancangan Roda Gigi Lurus dan Roda gigi Miring Berdasarkan Metode Nieman [Skripsi]*. Padang (ID): Universitas Andalas.
- Muruganandam, G., Padma, D. S., & Selvakumar, P. 2012. *Torque Analysis of Magnetic Spur Gear with Different Configurations*. International Journal of Electrical Engineering, Volume 5.
- Purwatmo. 2018. *Studi Eksperimental Vibrasi Torsional dengan Variasi Putaran pada Roda Gigi Lurus*. Sumatra Utara: Universitas Sumatera Utara.
- 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.
- Raj, Y., Varghese, L., Nair, V., & Vincent, M. 2016. *Magnetic Gearing System*. International Journal for Innovative Research in Science & Technology, volume 2 (Issue 12).

- Samudra, G. 2021. *Analisis Pengaruh Air Gap dan Jumlah Pole dengan Volume Magnet Konstan Terhadap Torsi yang Dihasilkan pada Radial External Magnetic Spur Gear* [Skripsi]. Surabaya (ID): Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- 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).
- Tlali, P., Wang, R.-J., & Gerber, S. 2014. *Magnetic Gear Technologies: A Review*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Wu, Y.-C., & Wang, C.-W. 2015. *Transmitted Torque Analysis of a Magnetic Gear Mechanism with Rectangular Magnets*. Applied Mathematics & Information Sciences.
- Zhang, Huibo. 2018. *Vibration Characteristics Analysis of Planetary Gears with a Multi-Clearance Coupling in Space Mechanism*. Energies. 11(2687).

LAMPIRAN

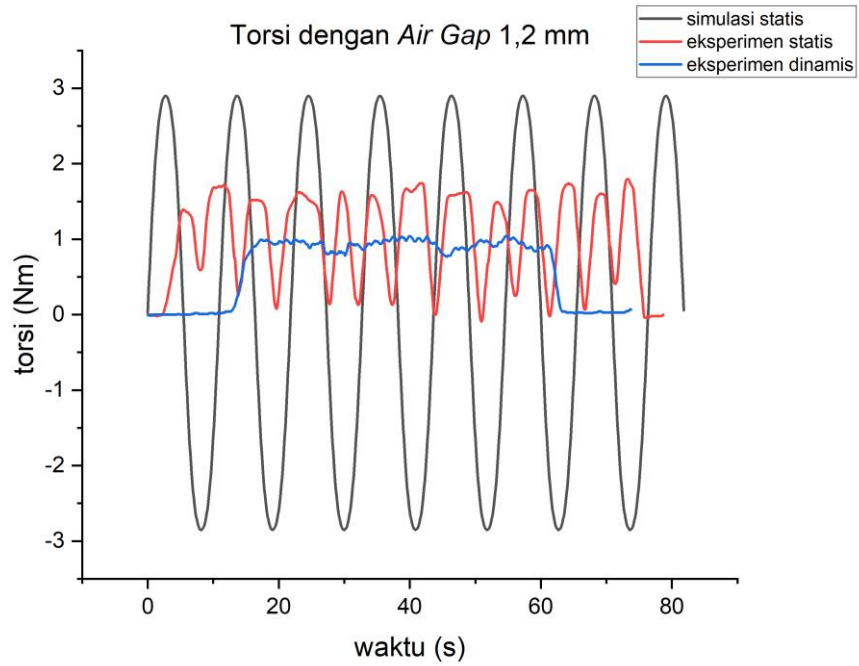
Instalasi rangkaian eksperimen



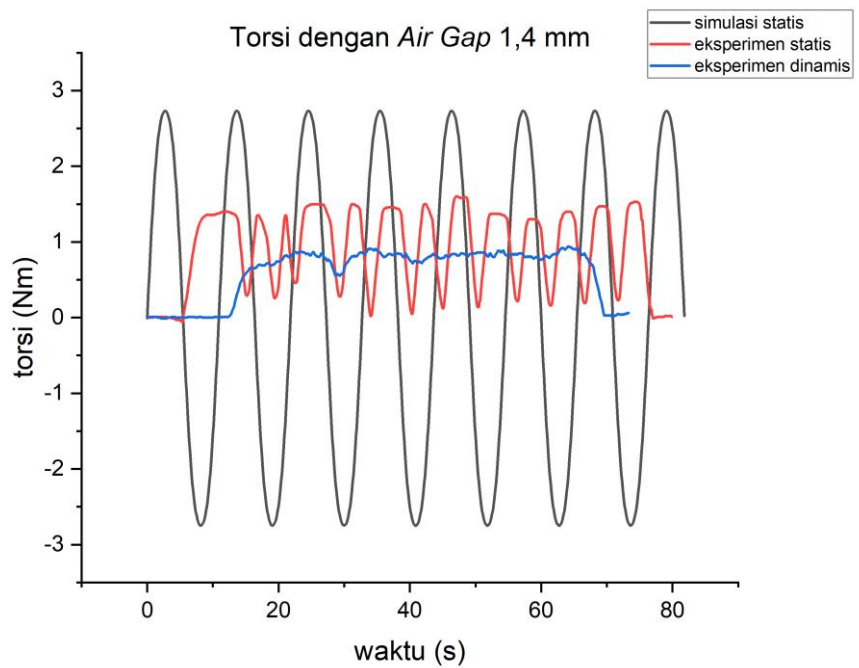
Instalasi kalibrasi *torque meter*



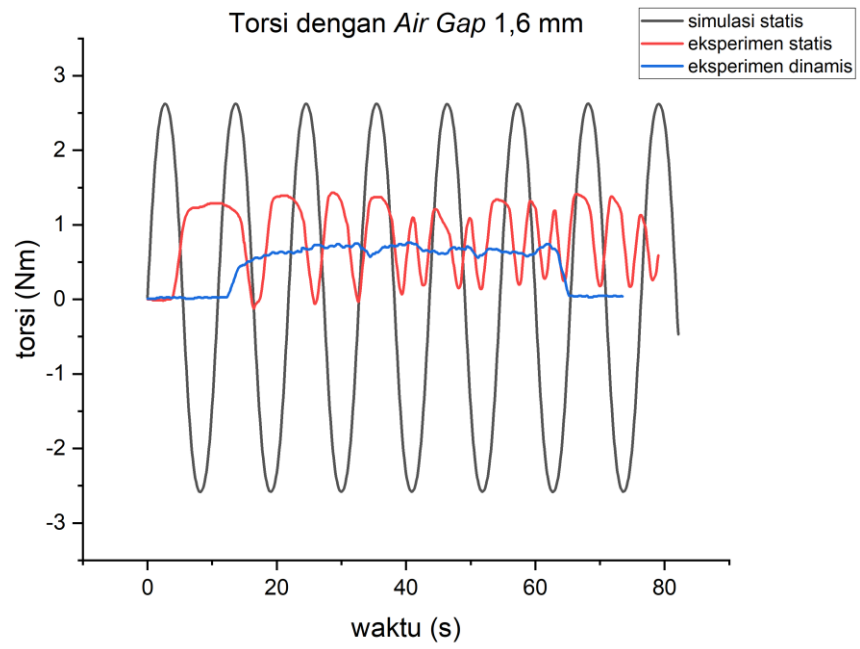
Pengamatan torsi dengan *air gap* 1,2 mm



Pengamatan torsi dengan *air gap* 1,4 mm



Pengamatan torsi dengan *air gap* 1,6 mm



BIODATA PENULIS



Kafi Hannan Al Hadi dilahirkan di Jember, 03 April 1998. Riwayat pendidikan penulis diawali di SD Al-Furqan Jember pada tahun 2004-2010. Setelah itu melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 2 Jember pada tahun 2010-2013. Kemudian melanjutkan ke SMA Negeri 1 Jember, pada tahun 2013–2016. Lalu penulis melanjutkan ke jenjang perkuliahan strata satu (S1) Departemen Teknik Mesin di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun organisasi selama perkuliahan. Dalam organisasi kemahasiswaan, penulis aktif menjadi staff Divisi Kewirausahaan Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) pada tahun 2017, dan pada tahun

2018 diamanahi menjadi Ketua Divisi Kewirausahaan Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) Departemen Teknik Mesin ITS. Penulis mempunyai motto hidup “*Selesaikan apa yang harus kita selesaikan*” yang membuat penulis lebih bersemangat untuk memotivasi diri sendiri menjadi kepribadian yang lebih baik lagi. Untuk semua informasi dan masukan kritik atau saran terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email kafi.hannan98@gmail.com.