

TUGAS AKHIR - TM 141585

**PENGARUH JUMLAH MAGNET DAN AIR GAP
TERHADAP TORSI DAN EFISIENSI 120°
ANGULAR MAGNETIC BEVEL GEAR
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

HAFIZ YOGASTYAWAN
NRP 02111440000117

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

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



TUGAS AKHIR - TM 141585

**PENGARUH JUMLAH MAGNET DAN *AIR GAP*
TERHADAP TORSI DAN EFISIENSI 120°
ANGULAR MAGNETIC BEVEL GEAR
MENGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA**

**HAFIZ YOGASTYAWAN
NRP 02111440000117**

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

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



FINAL PROJECT - TM 141585

**THE EFFECT OF MAGNET NUMBER AND AIR
GAP AGAINST TORQUE AND EFFICIENCY OF
120° ANGULAR MAGNETIC BEVEL GEAR USING
FINITE ELEMENT METHOD**

**HAFIZ YOGASTYAWAN
NRP 02111440000117**

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

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

**PENGARUH JUMLAH MAGNET DAN AIR GAP
TERHADAP TORSI DAN EFISIENSI 120° ANGULAR
MAGNETIC BEVEL GEAR MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

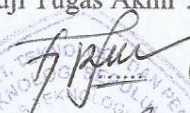
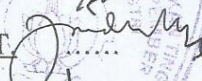
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

HAFIZ YOGASTYAWAN

NRP. 02111440000117

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Agus Sigit Pramono, DEA  (Pembimbing)
NIP. 196508101991021001
2. Achmad Syaifudin, S.T., M.Eng., Ph.D  (Penguji I)
NIP. 197909262005001001
3. Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T  (Penguji II)
NIP. 196807061999031004
4. Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T.  (Penguji III)
NIP. 198604012015041001

SURABAYA

JULI, 2018

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir yang saya kerjakan dapat terselesaikan dengan baik.

Laporan tugas akhir ini saya susun sesuai dengan bidang studi Desain dengan judul Pengaruh Jumlah Magnet dan *Air Gap* terhadap Torsi dan Efisiensi 120° *Angular Magnetic Bevel Gear* Menggunakan Metode Elemen Hingga. Tidak lupa saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Bambang Pramujati, M. Eng, Sc, Ph. D., selaku Kepala Departemen Teknik Mesin FTI ITS.
2. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA., selaku dosen pembimbing tugas akhir.
3. Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T., Achmad Syaifudin, S.T., M. Eng., Ph. D. dan Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T., selaku dosen penguji tugas akhir.
4. Suwarno, S.T., M. Sc., Ph. D., selaku Kasie Proposal dan Tugas Akhir
5. Dr. Ir. Budi Utomo Kukuh Widodo, ME., selaku dosen wali.
6. Kedua orang tua penulis serta adik tercinta yang senantiasa memberikan dukungan yang luar biasa selama umur hidup penulis.
7. Saudara Benedictus, Yohanes, Rahadian, Rifqi dan Norman yang selalu memberikan ruang dan waktu untuk menyelesaikan permasalahan yang dihadapi penulis.
8. Saudari Azizah Khairina Sarasetyo yang selalu memberikan motivasi dan dukungan dalam menjalani kehidupan perkuliahan dan pribadi.
9. Angkatan 2014 Teknik Mesin M57 serta segenap Syarekat Merah Rakyat Mesin (SMRM) yang telah menemani dan mendidik penulis.

10. Angkatan 2014 LBMM ITS Amblazz serta segenap keluarga besar LBMM ITS yang telah memberikan pelajaran hidup kepada penulis.
11. Mulyos *Squad* serta rekan-rekan KP yang terus memberikan dukungan yang sangat berarti bagi penulis.
12. Semua pihak yang telah membantu pengerjaan laporan tugas akhir.

Tugas akhir merupakan salah satu mata kuliah wajib yang harus ditempuh oleh mahasiswa Teknik Mesin FTI-ITS agar memenuhi syarat kelulusan. Kami menyadari laporan tugas akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu, saya mengharapkan kritik dan saran demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir yang saya buat dapat bermanfaat.

Surabaya, Juli 2018

Penyusun

**PENGARUH JUMLAH MAGNET DAN AIR GAP
TERHADAP TORSI DAN EFISIENSI 120° ANGULAR
MAGNETIC BEVEL GEAR MENGGUNAKAN
METODE ELEMEN HINGGA**

Nama Mahasiswa : Hafiz Yogastyawan
NRP : 02111440000117
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Desen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

ABSTRAK

Magnetic gear memiliki solusi atas permasalahan kegagalan pada roda gigi konvensional. Magnetic gear merupakan roda gigi yang menggunakan magnet permanen sebagai pengganti gigi-gigi sehingga tidak ada kontak yang terjadi pada pasangan roda gigi. Terdapat beberapa faktor yang menentukan baik tidaknya magnetic gear dalam mentransmisikan daya. Penelitian ini berfokus pada faktor jumlah magnet dan celah udara. Pada penelitian yang pernah dilakukan, tidak ada yang membahas mengenai bevel gear dengan sudut poros selain 90°. Selain itu, penelitian terdahulu tidak membandingkan roda gigi konvensional dengan magnetic gear. Pembahasan mengenai efisiensi pada magnetic gear masih kurang. Oleh karena itu, dilakukan penelitian mengenai 120° angular magnetic bevel gear. Penelitian ini dilakukan untuk merancang sebuah magnetic bevel gear dengan sudut poros sebesar 120° yang memiliki geometri mendekati roda gigi konvensional produk KHK Gear tipe SAM3-20120. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh faktor tersebut terhadap torsi dan efisiensi 120° angular magnetic bevel gear.

Analisa dilakukan dengan variabel jumlah magnet sebesar 4, 8 dan 16 buah dan celah udara sebesar 0,5; 1 dan 2 mm. Analisa meliputi pemodelan pada proses simulasi dan parameter yang diukur. Setelah dilakukan pemodelan pada software Autodesk

Inventor, desain angular magnetic bevel gear dimasukkan ke dalam software simulasi yaitu, Ansoft Maxwell 3D. Simulasi dilakukan menggunakan penyelesaian magnetostatic dengan meshing berbentuk tetrahedral. Setelah hasil analisa magnetostatic menyatakan hasil yang konvergen, dilanjutkan dengan simulasi transient. Pada simulasi tipe transient, source magnet berputar dengan kecepatan sudut 100 rpm. Hasil simulasi dinyatakan berhasil apabila telah sesuai dengan parameter yang telah ditentukan.

Dari hasil penelitian terlihat bahwa jumlah magnet memiliki pengaruh terhadap torsi yang dihasilkan magnetic gear. Jumlah magnet sebanyak 4 buah memiliki torsi terbesar yang dapat ditransmisikan. Celah udara sebesar 0,5 mm memiliki torsi terbesar yang dapat ditransmisikan. Konfigurasi jumlah magnet sebanyak 4 buah dan celah udara 0,5 mm mampu menghasilkan torsi sebesar 4,1705 Nm. Efisiensi terbaik terdapat pada jumlah magnet sebanyak 4 buah dan celah udara sebesar 2 mm. Rata-rata efisiensi jumlah magnet 4 buah sebesar 86,07% dan rata-rata efisiensi celah udara 0,5 mm sebesar 85,78%. Hal ini disebabkan oleh nilai flux density yang lebih besar, nilai flux density yang lebih stabil dan slip yang terjadi tidak sebesar variasi jumlah magnet dan celah udara lain.

Kata kunci: Celah udara, Efisiensi, *Flux density*, Jumlah Magnet, Magnetic gear.

THE EFFECT OF MAGNET NUMBER AND AIR GAP AGAINST TORQUE AND EFFICIENCY OF 120° ANGULAR MAGNETIC BEVEL GEAR USING FINITE ELEMENT METHOD

Student Name : Hafiz Yogastyawan
NRP : 02111440000117
Department : Mechanical Engineering
Advisor : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

ABSTRACT

Magnetic gear is one of interesting topic to solve mechanical gear's failure problem. Magnetic gear uses permanent magnets to replace gear's teeth because there is no contact between primary and secondary gear. There are some factors that influence magnetic gear performance. This research is focus on number of magnet and air gap factors. Researchs that had been done didn't compare magnetic gear to mechanical gear. Then, discussions about efficiency of magnetic gear are lack. So, this research will be done by designing a magnetic bevel gear with 120° shaft angle to know how those factors influence torque and efficiency.

The analysis is done by two variables those are number of magnet and air gap. Variation used in number of magnet are 4, 8 and 16 pieces, then variation used in air gap are 0.5, 1 and 2 mm. The analysis consist of modelling in simulation and measuring parameter. After making models using Autodesk Inventor, the next step is inputting the models to Ansoft Maxwell 3D software. Simulation is done using magnetostatic solution using tetrahydral meshing. After magntostatic simulation finished that is indicated by convergency of meshing, the next step is simulating using

transient solution. In this solution, the source magnet is moving at 100 rpm. The simulation is done when the parameter is measured.

From this research, the number of magnet influence torque transmitted by magnetic gear. Using 4 pieces of magnets give the largest torque transmitted. Using 0.5 mm of air gap give the largest torque transmitted. Combination of 4 pieces magnets with 0.5 mm air gap can transmit 4.1705 Nm. The best efficiency can be achieved on 4 pieces of magnets and 2 mm air gap. The average efficiency of 4 pieces magnets is 86.07% and the average efficiency of 2 mm air gap is 85.78%. It is caused by higher flux density value, more stable flux density value and less slip happens than other combination of variations.

Keyword: Air gap, Efficiency, Flux density, Magnetic gear, Flux density.

DAFTAR ISI

Halaman Judul

Halaman Pengesahan

Abstrak..... i

Abstract.....iii

Kata Pengantar..... v

Daftar Isivii

Daftar Gambar xi

Daftar Tabel..... xv

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 3

1.3 Tujuan Penelitian..... 3

1.4 Batasan Masalah..... 3

1.5 Manfaat Penelitian..... 3

BAB II DASAR TEORI

2.1 Roda Gigi 5

2.1.1 *Bevel Gear*..... 6

2.2 *Magnetic Gear* 7

2.2.1 Dasar Perhitungan *Magnetic Gear* 8

2.2.2 Perhitungan Torsi 12

2.2.3 Perhitungan *Drive Magnet Surface Current Density* . 16

2.2.4 Perhitungan *External Flux Density Field*..... 17

2.2.5 Perhitungan Magnetisasi Paralel 17

2.3 Magnet	18
2.3.1 Karakteristik dan Sifat Material Magnet Permanen ...	18
2.3.2 Demagnetisasi	20
2.4 Tinjauan <i>Software</i> Simulasi.....	21
2.4.1 <i>Finite Element Method</i>	21
2.4.2 Permasalahan <i>Magnetostatic</i>	22
2.5 Tinjauan Pustaka.....	25

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
3.1.1 Observasi	31
3.1.2 Perumusan Masalah.....	32
3.1.3 Studi Literatur	32
3.1.4 Penentuan Data Awal	32
3.1.5 Pemodelan 3D <i>Angular Magnetic Bevel Gear</i>	34
3.1.6 Validasi Simulasi	38
3.1.7 Simulasi FEM (<i>Magnetostatic Solution</i>)	39
3.1.8 Simulasi FEM (<i>Transient Solution</i>)	39
3.1.9 Pengambilan dan Pengolahan Data	40
3.1.10 Analisa Data dan Pembahasan.....	40
3.1.11 Kesimpulan Penelitian	40
3.2 Diagram Alir Simulasi.....	40
3.2.1 Input Model 3 Dimensi.....	44
3.2.2 <i>Assign Material</i>	45
3.2.3 Atur <i>Region</i>	47

3.2.4 <i>Assign Boundary & Excitation</i>	48
3.2.5 <i>Assign Meshing Operation</i>	48
3.2.6 <i>Assign Parameter dan Analysis Setup</i>	49
3.2.7 <i>Validation Check & Analyze All</i>	52
3.2.8 <i>Transient Solution Type</i>	53
3.2.9 <i>Assign Motion</i>	53
3.2.10 <i>Post-processing</i>	54
3.2.11 Pengambilan dan Pengolahan Data	55

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis <i>Flux Density</i> Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i>	57
4.1.1 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> dengan Variasi Jumlah Magnet 4 Buah	58
4.1.2 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> dengan Variasi Jumlah Magnet 8 Buah	64
4.1.3 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> dengan Variasi Jumlah Magnet 16 Buah	71
4.2 Analisis Torsi Hasil Simulasi <i>Transient</i>	77
4.2.1 Hasil Simulasi <i>Transient</i> dengan Variasi Jumlah Magnet 4 Buah	78
4.2.2 Hasil Simulasi <i>Transient</i> dengan Variasi Jumlah Magnet 8 Buah	81
4.2.3 Hasil Simulasi <i>Transient</i> dengan Variasi Jumlah Magnet 16 Buah	85
4.3 Analisis Pengaruh Jumlah Magnet dan Celah Udara terhadap Torsi	88

4.4 Perbandingan <i>Angular Magnetic Bevel Gear</i> dengan <i>Mechanical Angular Miter Gear</i>	93
--	----

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan.....	99
5.2 Saran	100
Daftar Pustaka	ci

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Jenis Roda Gigi.....	5
Gambar 2.2 <i>Bevel Gear</i>	6
Gambar 2.3 Straight-Sided Bevel Gear	7
Gambar 2.4 <i>Magnetic Gear</i> dan Diagram Torsi.....	8
Gambar 2.5 <i>Magnetic Gear</i> dan Diagram Torsi.....	9
Gambar 2.6 Total Outer Gear Volume	12
Gambar 2.7 Ilustrasi Perhitungan Torsi.....	13
Gambar 2.8 Ilustrasi Perbandingan Ukuran Magnet	18
Gambar 2.9 Hysterisis Loop.....	19
Gambar 2.10 Kurva Demagnetisasi.....	21
Gambar 2.11 Antarmuka <i>Software</i> Ansys Maxwell 3D untuk Komputasi dan Visualisasi.....	22
Gambar 2.12 Hasil Simulasi dengan Variasi $N_p = 16$, $N_L = 4$ dan Celah Udara 0.5 mm	25
Gambar 2.13 Hasil Simulasi Yi-Chang Wu	27
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	29
Gambar 3.2 Spesifikasi SAM3-20120.....	33
Gambar 3.3 <i>Sketch</i> 2 Dimensi	34
Gambar 3.4 Model 3D.....	36
Gambar 3.5 Hasil Validasi Simulasi	38
Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi.....	40
Gambar 3.7 Hasil <i>Input</i> dan <i>Assembly</i> 3D <i>Model</i>	45
Gambar 3.8 Material Properties	46
Gambar 3.9 Pembuatan <i>Region</i>	48

Gambar 3.10 Bentuk <i>Meshing</i>	49
Gambar 3.11 Pemilihan Solusi Simulasi	50
Gambar 3.12 Pengaturan Analisis	51
Gambar 3.13 Tahap <i>Validation Check</i>	52
Gambar 3.14 Tahap Iterasi Analisis <i>Magnetostatic</i>	53
Gambar 3.15 <i>Assign Motion</i>	54
Gambar 3.16 Nilai dan Arah Vektor <i>Flux Density</i>	55
Gambar 3.17 Grafik Torsi terhadap Waktu	55
Gambar 4.1 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 0,5 mm	58
Gambar 4.2 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 1 mm	60
Gambar 4.3 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 2 mm	62
Gambar 4.4 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 0,5 mm	65
Gambar 4.5 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 1 mm	67
Gambar 4.6 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 2 mm	69
Gambar 4.7 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 0,5 mm	71
Gambar 4.8 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 1 mm	73
Gambar 4.9 Hasil Simulasi <i>Magnetostatic</i> Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 2 mm	75

Gambar 4.10 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 0,5 mm	78
Gambar 4.11 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 1 mm	79
Gambar 4.12 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 2 mm	80
Gambar 4.13 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 0,5 mm	82
Gambar 4.14 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 1 mm	83
Gambar 4.15 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 2 mm	84
Gambar 4.16 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 0,5 mm	85
Gambar 4.17 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 1 mm	86
Gambar 4.18 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 2 mm	87
Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 0,5 mm	89
Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 1 mm	90
Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 2 mm	91

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Material Magnet Permanen	19
Tabel 2.2 Temperatur Curie Magnet Permanen	20
Tabel 3.1 Hasil Simulasi Penelitian Muruganandam	38
Tabel 3.2 Hasil Validasi Simulasi	39
Tabel 3.3 Spesifikasi Magnet Permanen dengan Variasi Jumlah Magnet	45
Tabel 4.1 Perhitungan Efisiensi 120° <i>Angular Magnetic Bevel</i> <i>Gear</i>	92
Tabel 4.2 Perbandingan SAM3-20120 <i>Standard</i> dengan <i>Down-</i> <i>Grade</i>	96

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Seperti kita ketahui bahwa kehidupan manusia tidak dapat lepas dari sektor perindustrian. Oleh karena itu, teknologi untuk menunjang kemajuan di dunia industri berkembang pesat. Salah satunya adalah kebutuhan untuk mentransmisikan daya dari penghasil daya ke alat yang membutuhkan daya. Hal ini cukup penting dalam dunia industri sebagai faktor yang menentukan kinerja industri tersebut.

Dalam ilmu elemen mesin, daya dapat ditransmisikan melalui beberapa alat seperti *gear*, *belt* dan *chain*. Roda gigi atau *gear* memiliki keuntungan yang tidak dimiliki *chain* dan *belt* antara lain, *reliability* yang lebih tinggi, kemampuan menerima beban yang lebih tinggi, efisiensi yang lebih baik, kemampuan meneruskan daya dan putaran yang lebih besar dan kemampuan untuk melakukan transmisi daya dengan perbedaan sudut poros tertentu. Transmisi daya pada roda gigi terjadi akibat kontak dan gesekan antara dua buah roda gigi yang kemudian diteruskan oleh porosnya. Selain menjadi keuntungan, hal tersebut juga dapat mengakibatkan kegagalan pada roda gigi. Dua buah gaya yang bekerja pada gigi-gigi yang saling bertautan menimbulkan tegangan, yaitu tegangan kontak dan tegangan *bending*. Tegangan tersebut dapat memicu kegagalan pada roda gigi. Secara umum kegagalan pada roda gigi adalah *wear*, *surface fatigue* dan *plastic wear* yang disebabkan oleh tegangan kontak sedangkan *breakage* adalah kegagalan yang disebabkan oleh tegangan *bending* (Wibowo, 2017). Oleh karena itu, penelitian untuk mengatasi kekurangan dari roda gigi banyak dilakukan.

Salah satu topik penelitian yang cukup banyak dilakukan adalah *magnetic gear*. *Magnetic gear* memiliki solusi atas permasalahan kegagalan pada roda gigi konvensional. Pada dasarnya, *magnetic gear* merupakan roda gigi yang menggunakan magnet permanen sebagai pengganti gigi-gigi sehingga tidak ada

kontak yang terjadi pada pasangan roda gigi. Transmisi daya terjadi dengan adanya gaya tarik menarik dan tolak menolak antar magnet pada *magnetic gear*. Selain itu, terdapat kelebihan lain yaitu, perawatan yang lebih sedikit karena tidak adanya pelumasan, efisiensi yang mendekati *mechanical gear* dan proteksi dari beban berlebih.

Salah satu jenis roda gigi dengan kemampuan transmisi daya dengan sudut poros tertentu adalah *bevel gear*. Pada umumnya, *bevel gear* didesain untuk melakukan transmisi daya dengan sudut poros 90° . Tidak jarang industri membutuhkan transmisi daya dengan sudut poros lebih dari 90° . Dengan berbagai kelebihan dan kebutuhan industri, perlu dilakukan penelitian yang membuktikan bahwa *magnetic gear* mampu menggantikan roda gigi konvensional. Densitas torsi merupakan kunci keberhasilan *magnetic gear* untuk memiliki kemampuan yang sama atau bahkan lebih dari roda gigi konvensional. Densitas torsi berkaitan dengan jumlah magnet yang digunakan dan jarak antar kedua *magnetic gear*.

Jumlah penelitian mengenai *magnetic bevel gear* dengan sudut poros selain 90° dan penelitian yang membandingkan *magnetic gear* dengan *mechanical gear* tidak banyak. Penelitian yang membahas efisiensi pada *magnetic gear* juga tidak terlalu banyak. Oleh karena itu, dilakukan penelitian yang membahas tentang *angular magnetic bevel gear*. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui performa *angular magnetic bevel gear* dengan sudut poros sebesar 120° kemudian dibandingkan dengan produk Kohara Gear Industry Co., Ltd. yaitu *angular miter gear* SAM3-20120. Penelitian dilakukan diawali dari perancangan *angular magnetic bevel gear* dengan dimensi mendekati *angular miter gear* SAM3-20120 menggunakan *software* Autodesk Inventor kemudian dilakukan analisa menggunakan metode elemen hingga (FEM) pada *software* Ansoft Maxwell 3D dengan variasi jumlah magnet dan celah udara. Analisis yang dilakukan akan menghasilkan pengaruh variasi yang telah ditentukan terhadap torsi dan efisiensi 120° *angular magnetic bevel gear*.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh jumlah magnet terhadap torsi yang ditransmisikan?
2. Bagaimana pengaruh celah udara terhadap torsi yang ditransmisikan?
3. Bagaimana efisiensi torsi yang ditransmisikan pada 120° *angular magnetic bevel gear*?

1.3. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat menjelaskan pengaruh jumlah magnet terhadap torsi yang ditransmisikan.
2. Dapat menjelaskan pengaruh celah udara terhadap torsi yang ditransmisikan.
3. Dapat menjelaskan efisiensi torsi yang dapat ditransmisikan pada 120° *angular magnetic bevel gear*?

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Geometri desain sama dengan geometri produk.
2. Pengaruh perubahan temperatur tidak dimodelkan.
3. Magnet permanen diasumsikan menempel sempurna pada *hub gear*.
4. *Source magnet* berputar dengan kecepatan sudut 100 rpm pada penyelesaian *transient*.
5. Variasi jumlah magnet 4, 8 dan 16 buah.
6. Variasi celah udara 0,5; 1 dan 2 mm.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah menunjukkan potensi dari *angular magnetic bevel gear* untuk menggantikan *mechanical*

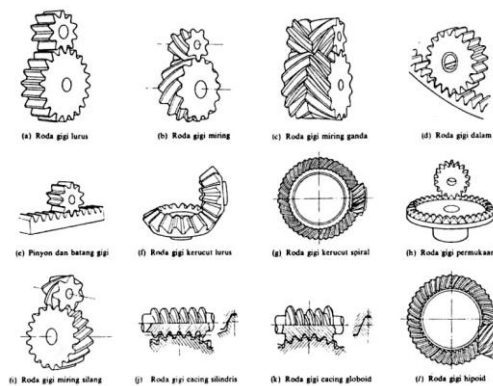
angular bevel gear dengan memperhatikan perancangannya agar menjadi solusi dari permasalahan transmisi daya pada dunia industri.

BAB II DASAR TEORI

Pada bab ini dipaparkan landasan teori yang dijadikan acuan penelitian. Adapun dasar teori dan tinjauan pustaka yang digunakan berdasarkan perancangan *magnetic bevel gear* dan analisa menggunakan metode *finite element*.

2.1. Roda Gigi

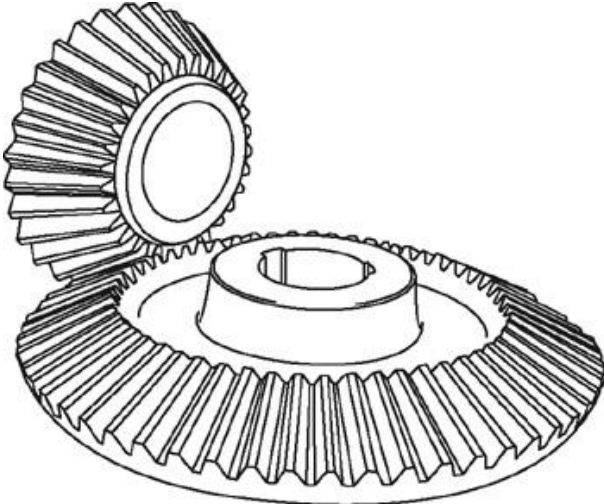
Roda gigi merupakan salah satu elemen mesin yang berfungsi untuk mentransmisikan putaran dan torsi (daya) melalui kontak permukaan antar dua buah gigi tanpa terjadi *slip*. Roda gigi dapat digunakan pada transmisi yang memerlukan rasio maupun tidak. Selain itu, *gear* dapat diaplikasikan ketika jarak antar poros terlalu dekat maupun memiliki perbedaan sudut tertentu sehingga tidak dapat menggunakan media transmisi lain seperti *chain* dan *belt*. Roda gigi terdiri atas berbagai jenis sesuai dengan kondisi dan tujuan penggunaannya seperti pada gambar 2.1 Jenis Roda Gigi.



Gambar 2.1 Jenis Roda Gigi

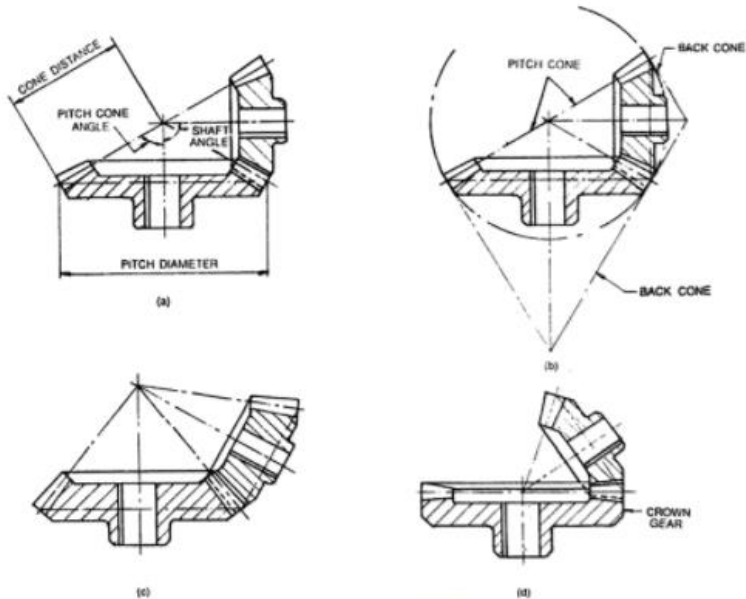
2.1.1. *Bevel Gear*

Bevel gear atau roda gigi payung bergigi lurus merupakan salah satu jenis dari roda gigi berpotongan (*intersecting shaft gear*) yang paling sederhana seperti pada gambar 2.2 *Bevel Gear*.



Gambar 2.2 *Bevel Gear*

Dasar bentuk roda gigi dari *bevel gear* kurang lebih sama dengan *spur gear*. Pada *bevel gear*, bentuk roda gigi semakin menuju puncak (*apex*) semakin mengerucut. Pengerucutan atau *tapering* bervariasi tergantung pada sudut yang dibentuk antara kedua poros. Besar sudut antara kedua poros umumnya adalah 90° namun tidak menutup kemungkinan sudutnya lebih besar atau lebih kecil dari 90° (Maitra, 2001). Gambar 2.3 adalah konfigurasi yang dimiliki oleh *straight-sided bevel gear*.



Gambar 2.3 *Straight-Sided Bevel Gear*

2.2. *Magnetic Gear*

Magnetic gear adalah sebuah terobosan dalam dunia *engineering*. Sama halnya dengan *mechanical gear*, *magnetic gear* adalah sebuah alat transmisi. *Magnetic gear* dapat mentransmisikan torsi rendah dan putaran tinggi menjadi torsi tinggi dan putaran rendah. *Magnetic gear* dapat mencapai efisiensi yang tinggi namun kemampuan untuk torsi tinggi susah dicapai apabila teknologi dan desain *magnetic gear* tidak dipertimbangkan dengan baik. Maka dari itu, *torque density* menjadi hal yang penting dalam pengembangan dan perancangan *magnetic gear*. Biaya dan jumlah magnet yang digunakan menjadi faktor penting yang berhubungan. Beberapa jurnal ilmiah yang membahas mengenai *magnetic gear* telah menemukan cara untuk menciptakan *magnetic gear* dengan *torque density* yang tinggi sehingga dapat diaplikasikan pada industri (Joergensen,2010).

Banyak keuntungan yang dapat diambil dari *magnetic gear* dibandingkan dengan jenis roda gigi konvensional seperti perawatan yang lebih sedikit, efisiensi yang lebih tinggi, isolasi kontak fisik antara poros *input* dan *output* seperti pada gambar 2.4 *Magnetic Gear*.

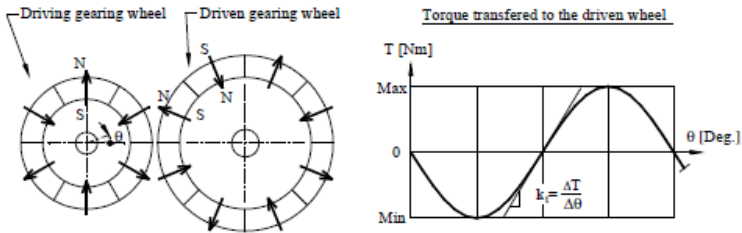


Gambar 2.4 *Magnetic Gear*

2.2.1. Dasar Perhitungan *Magnetic Gear*

Pada roda gigi konvensional, transmisi daya terjadi menggunakan kontak antar gigi dari *gear* yang menimbulkan efek aus ketika terjadi kontak antar gigi. Pada *magnetic gear*, tidak terjadi kontak sehingga tidak ada keausan. Transmisi daya terjadi melalui magnet permanen pada dua buah roda. Karena tidak adanya kontak langsung antar roda, terjadi efek *fictive torsion spring* antara kedua roda. Efek *fictive torsion spring* adalah fenomena ketika roda pertama diam maka roda kedua akan berputar dengan sudut yang kecil. Maka akan terjadi interaksi torsi tertentu antara kedua roda bergantung pada perpindahan sudut dari

roda kedua. Fenomena ini dapat dijelaskan pada gambar 2.5 *Magnetic Gear* dan Diagram Torsi dimana terdapat *magnetic gear* penggerak dan yang digerakkan.



Gambar 2.5 *Magnetic Gear* dan Diagram Torsi

Dapat dilihat dari gambar 2.5, *magnetic gear* memiliki batas torsi maksimal. Apabila torsi yang ditransmisikan lebih dari batasan tersebut, akan terjadi slip pada kedua *magnetic gear*. Oleh karena itu, pengoperasian *magnetic gear* harus berada di bawah batasan torsi tersebut. Hal ini juga terjadi pada *mechanical gear* yang biasa disebut *backlash* sedangkan pada *magnetic gear* akan terjadi *torsion spring* (k_t). Persamaan untuk *torsion spring* adalah sebagai berikut:

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

dimana k_t : *torsion spring* (Nm/rad)
 $\Delta\tau$: perubahan torsi (Nm)
 $\Delta\theta$: perubahan sudut (rad)

Gearing relationship atau rasio gigi (R_g) bergantung pada jumlah magnet (N_{pole1}) pada roda penggerak dan N_{pole2} pada roda yang digerakkan. Berikut adalah persamaan R_g :

$$R_g = \frac{N_{pole2}}{N_{pole1}} \quad (2.2)$$

dimana R_g : rasio gigi

N_{pole1} : jumlah magnet pada roda penggerak
 N_{pole2} : jumlah magnet pada roda yang digerakkan

Kedua pasang *source magnet* dan *drive magnet* harus memiliki luas sapuan yang sama sehingga didapatkan hubungan antara rasio *magnetic gear* dengan diameter *magnetic gear* seperti pada persamaan 2.3.

$$R_g = \frac{N_{pole2}}{N_{pole1}} = \frac{d_1}{d_2} \quad (2.3)$$

dimana R_g : rasio gigi
 d_1 : diameter *source magnet* (m)
 d_2 : diameter *drive magnet* (m)

Kebanyakan sistem *gear* memiliki rasio lebih besar dari satu dimana pada poros *input* memiliki putaran tinggi dan putaran rendah pada poros *output*. Pada *mechanical gear*, besar rasio ditentukan dari jumlah gigi pada *gear*.

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

$$\rho_A = \frac{T_{max}}{V_A} \quad (2.4)$$

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

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

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

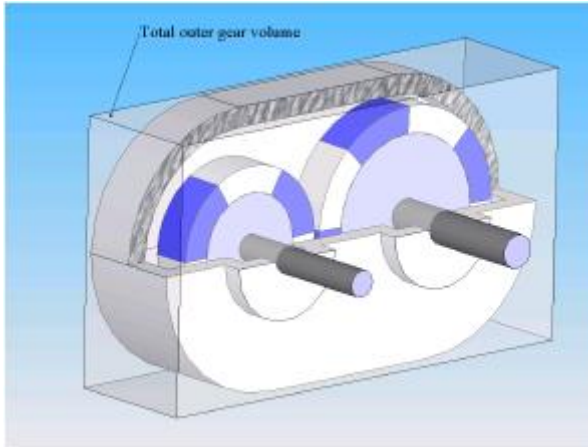
dimana ρ_T : *total torque density* (Nm/m³)
 T_{max} : torsi maksimal yang ditransmisikan (Nm)
 V_T : volume total (m³)

Sedangkan untuk *mechanical gear* menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\rho_T = \frac{T_{nom}}{V_T} \quad (2.6)$$

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

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



Gambar 2.6 *Total Outer Gear Volume*

Efisiensi untuk *mechanical* dan *magnetic gear* adalah sama. Efisiensi merupakan hubungan antara daya pada poros *output* dengan daya pada poros *input*. Persamaan efisiensi adalah sebagai berikut:

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

dimana η : efisiensi
 P_{out} : daya pada poros *output* (W)
 P_{in} : daya pada poros *input* (W)

2.2.2. Perhitungan Torsi

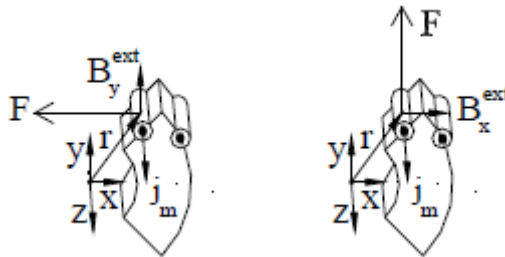
Untuk menentukan torsi pada *drive magnet*, hal pertama yang dilakukan adalah mengurai sistem menjadi distribusi yang seimbang antara *current densities* volume dan permukaan (J_m dan j_m). Persamaan torsi terdiri atas dua integral dimana V dan S secara berurutan adalah volume dan permukaan magnet.

$$\begin{aligned}
 T = \int_V r \times (J_m(r, \phi) \times B_{ext}) r dr d\phi dz \\
 + \int_S r \times (j_m \times B_{ext}) da
 \end{aligned}
 \quad (2.7)$$

dimana

T	: torsi (Nm)
r	: vector pada sumbu-r
J_m	: <i>volume current density</i> (A/m ³)
j_m	: <i>surface current density</i> (A/m ²)
B_{ext}	: <i>external flux density field</i> (Wb)

Karena $J_m = \nabla \times M = 0$, maka integral volume yang pertama menjadi nol dan yang tersisa hanya hasil integral permukaan. Semua *current density* pada permukaan harus dilalui oleh B_{ext} dari *source magnet* untuk menciptakan torsi pada *drive magnet*. Perkalian *cross* tersebut dapat diilustrasikan dengan sketsa isometrik pada gambar 2.7 Ilustrasi Perhitungan Torsi.



Gambar 2.7 Ilustrasi Perhitungan Torsi

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.2.3. **Perhitungan Drive Magnet Surface Current Density**

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

$$j_m(p, r, \Phi, \theta) = M_s \sin(\theta) \hat{z}, r=R_2$$

$$j_m(p, r, \Phi, \theta) = -M_s \cos(\theta) \hat{z}, r=R_1$$

$$\Phi - \frac{\pi}{N_{pole}}(1 + 2p) \leq \theta \leq \Phi - \frac{\pi}{N_{pole}}(1 + 2p) \quad (2.12)$$

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

2.2.4. Perhitungan *External Flux Density Field*

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

$$B_x^{\text{ext}}(r, \Phi) = B_{r'}^{\text{ext}}(r'(r, \Phi), \Phi'(r, \Phi) \cos(\Phi'(r, \Phi))) - B_{\Phi'}^{\text{ext}}(r'(r, \Phi), \Phi'(r, \Phi) \sin(\Phi'(r, \Phi))) \quad (2.13)$$

$$B_y^{\text{ext}}(r, \Phi) = B_{r'}^{\text{ext}}(r'(r, \Phi), \Phi'(r, \Phi) \cos(\Phi'(r, \Phi))) - B_{\Phi'}^{\text{ext}}(r'(r, \Phi), \Phi'(r, \Phi) \sin(\Phi'(r, \Phi))) \quad (2.14)$$

dimana

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

2.2.5. Perhitungan Magnetisasi Paralel

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

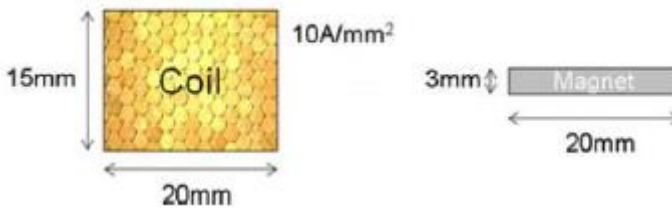
$$M_s(r, \phi) = M_r \cdot \hat{r} + M_\phi \cdot \hat{\phi} \quad (2.15)$$

dimana M_r : magnetisasi arah radial (A/m)

M_ϕ : magnetisasi arah tangensial (A/m)

2.3. Magnet

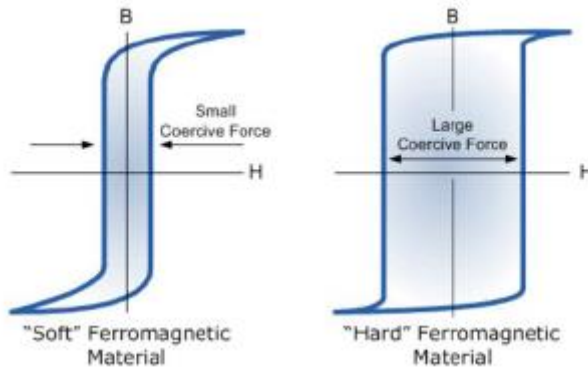
Magnet adalah sebuah benda yang mampu menarik benda disekitarnya karena memiliki sifat kemagnetan. Kemagnetan sendiri adalah suatu fenomena fisik yang timbul dari medan magnet. Sifat dari suatu magnet dapat ditentukan dari medan magnet, induksi magnet dan lain sebagainya. Magnet memiliki beberapa jenis 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. Hal ini diilustrasikan pada gambar 2.8 Ilustrasi Perbandingan Ukuran Magnet dan Kumparan.



Gambar 2.8 Ilustrasi Perbandingan Ukuran Magnet dan Kumparan

2.3.1. Karakteristik dan Sifat Material Magnet Permanen

Untuk menghasilkan medan magnet yang kuat dengan ukuran yang kecil, maka material yang tepat untuk magnet permanen adalah material ferromagnetik. Material ferromagnetik tersedia dengan berbagai karakteristik. Pada umumnya, material ferromagnetik dibagi menjadi dua kategori utama berdasarkan karakteristik histeresisnya yaitu, *soft magnetic materials* dan *hard magnetic materials*. Perbedaan antara keduanya ada di nilai *coercitivity*, hal ini dapat dijelaskan oleh gambar 2.9 *Hysteresis Loop*.



Gambar 2.9 *Hysteresis Loop*

Dari gambar 2.9, *hard magnetic materials* memiliki nilai *coercivity* yang lebih besar. Disebut *hard magnetic material* karena sifat kemagnetannya susah untuk dibuat maupun dihilangkan. Terdapat dua kelompok *hard magnetic materials* yaitu, magnet konvensional dan *rare earth*. Dari tabel 2.1 Karakteristik Material Magnet Permanen, magnet konvensional seperti Alnico dan Ferrite memiliki produk energi maksimum sebesar $2\text{--}80 \text{ kJ/m}^3$. Sedangkan produk energi untuk magnet *rare earth* lebih besar dari 80 kJ/m^3 . Alasan utama keunggulan *rare earth* adalah nilai *magnetocrystalline anisotropy* yang tinggi seperti NdFeB dan SmCo.

Tabel 2.1 Karakteristik Material Magnet Permanen

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

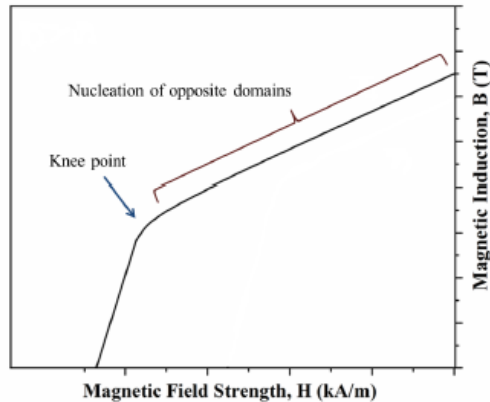
2.3.2. Demagnetisasi

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

Tabel 2.2 Temperatur Curie Magnet Permanen

No.	Material	Temperatur Curie ($^{\circ}\text{C}$)
1	Alnico	850
2	SmCo	720
3	NdFeB	310
4	Ferrite	450

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



Gambar 2.10 Kurva Demagnetisasi

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

2.4. Tinjauan Software Simulasi

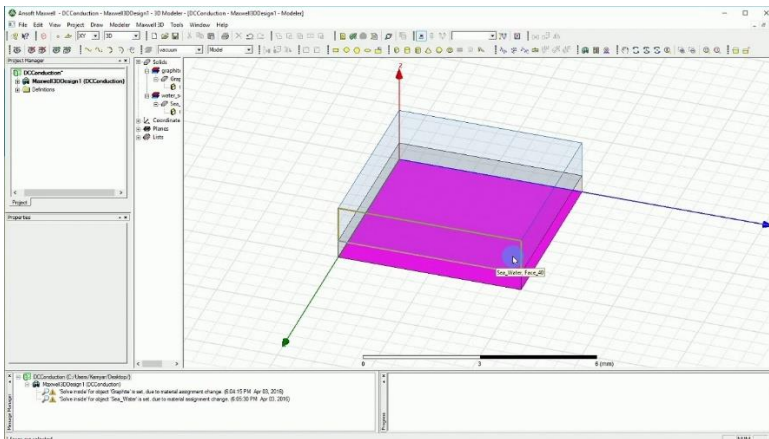
2.4.1. *Finite Element Method*

Metode elemen hingga atau *finite element method* merupakan suatu pendekatan numerik dimana bidang telaah dibagi menjadi banyak daerah geometri sederhana yaitu segitiga atau tetrahedral dan masing-masing daerah mempergunakan persamaan secara khusus. Perhitungan--hingga ratusan persamaan--ini dikerjakan oleh *software* simulator secara simultan. Pengembangan dan penerapan metode ini mula-mula disarankan untuk menganalisis permasalahan struktur pada tahun 1960 dan dikenalkan pada komputasi *electromagnetic* pada tahun 1970.

Permasalahan *magnetostatic* adalah permasalahan magnetisme yang tidak berubah menurut waktu (*time-invariant*). Medan magnet seperti ini dihasilkan dari sumber arus konstan atau

magnet permanen. Permasalahan *magnetostatic* pada penelitian ini dapat diselesaikan menggunakan *software* komputasi *finite element method*.

Software komputasi *finite element method* dalam bidang *magnetostatic* yang cukup handal dan memadai menurut hasil pencarian adalah Ansys Maxwell 3D, *software* ini memiliki antarmuka yang mudah dipahami dan mampu menyajikan data dengan sangat baik. *Software* alternatif lainnya antara lain: (a) MagNet dari Infolytica, (b) FEMM, (c) SEMFEM dari Python, (d) FLUX dari Magsoft, (e) JMAG dari JMAG Group, (f) COMSOL Multiphysic dari COMSOL, (g) Opera dari Vector Fields. Berikut ini adalah tampilan *software* Ansys Maxwell 3D yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2.11 Antarmuka *Software* Ansys Maxwell 3D untuk Komputasi dan Visualisasi

2.4.2 Permasalahan *Magnetostatic*

Dimulai dari persamaan Maxwell dan diasumsikan bahwa muatannya tetap atau bergerak sebagai arus tetap J , persamaan dipisahkan menjadi dua persamaan untuk medan magnet. Karena

bidang tidak bergantung terhadap waktu didapatkan persamaan *magnetostatic* sebagai berikut:

$$\nabla \times H = J \quad (2.16)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2.17)$$

dengan H = Intensitas medan magnet
 B = Kerapatan fluks magnet

Kedua persamaan di atas mengikuti hubungan antara intensitas medan magnet dengan kerapatan fluks magnet. Jika material magnet non-linier (misalnya: magnet AlNiCo) maka permeabilitas magnet (μ) merupakan fungsi dari B .

$$\mu = \frac{B}{H(B)} \quad (2.18)$$

Solver terus mencari bidang yang memenuhi persamaan (2.16)-(2.17) melalui pendekatan potensial vektor magnetik. Kerapatan fluks ditulis dalam bentuk potensial vektor, A , sebagai berikut:

$$B = \nabla \times A \quad (2.19)$$

Sekarang definisi dari B akan akan memenuhi persamaan (2.18). Kemudian persamaan (2.17) dapat ditulis sebagai berikut:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu(B)} \nabla \times A \right) = J \quad (2.20)$$

Untuk material isotropik linier dan diasumsikan Coulomb gauge ($\nabla \cdot A = 0$), persamaan (2.20) direduksi menjadi sebagai berikut:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = J \quad (2.21)$$

Solver mempertahankan bentuk dari persamaan (2.21) sehingga permasalahan magnetostatic dengan hubungan B-H non-linier dapat diselesaikan.

Penyelesaian metode elemen hingga umumnya menggunakan metode matriks. Setiap elemen memiliki persamaan yang akan digabungkan menjadi sebuah persamaan dari keseluruhan sistem. Persamaan tersebut digunakan untuk mendapatkan parameter yang ingin dicapai dari pemodelan sistem. Persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$\{F\} = [K] \cdot [A] - [P] + [Q] \quad (2.22)$$

dimana	F	: matriks gaya Lorentz
	K	: matriks kontribusi massa
	A	: matriks <i>magnetic vector potential</i>
	P	: matriks <i>non-null current density</i>
	Q	: matriks <i>non-homogeneous Neumann boundary</i>

Matriks P memiliki nilai ketika pada *source magnet* terdapat *current density*. Matriks Q memiliki nilai ketika terdapat batasan Neumann yang tidak homogen.

Dalam kasus 3D secara umum, A adalah vektor dengan tiga komponen. Namun, dalam kasus planar 2D dan asimetrik, dua dari tiga komponen tersebut bernilai nol, hanya menyisakan komponen pada arah "keluar dari halaman".

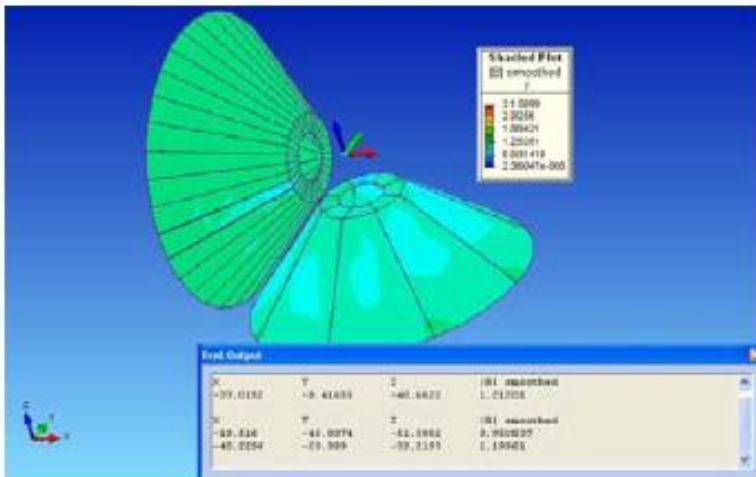
Keuntungan menggunakan formulasi potensial vektor adalah bahwa semua kondisi yang harus dipenuhi digabungkan menjadi satu persamaan tunggal. Jika A ditemukan, B dan H kemudian dapat disimpulkan dengan menurunkan A. Bentuk dari (2.19), persamaan diferensial parsial elips, muncul dalam studi berbagai jenis fenomena teknik. Ada sejumlah besar alat yang telah

dikembangkan selama bertahun-tahun untuk menyelesaikan masalah.

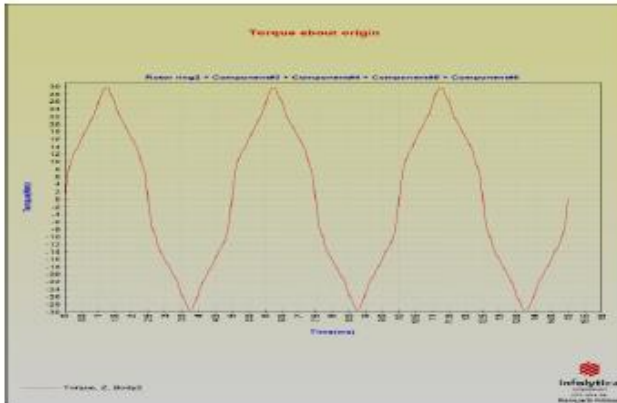
2.5. Tinjauan Pustaka

Terdapat beberapa penelitian yang dijadikan referensi dalam analisis ini antara lain:

G. Muruganandam, pada tahun 2013 melakukan penelitian yang bertujuan untuk menganalisa beban torsi yang dialami *magnetic bevel gear* dengan beberapa konfigurasi yang meliputi celah udara dan jumlah magnet dengan rasio dan dimensi yang tetap. Pada penelitian tersebut, dilakukan penyelesaian secara matematis dengan bantuan *software* MATLAB dan MagNet.



(a)

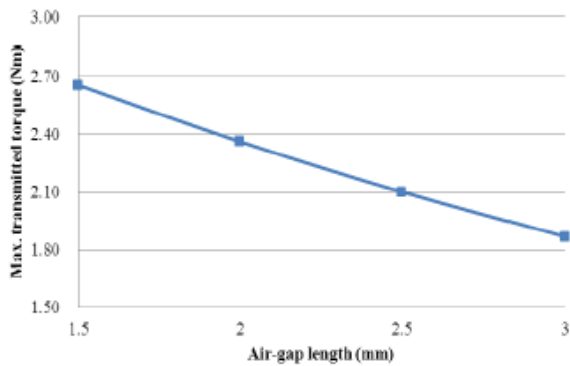


(b)

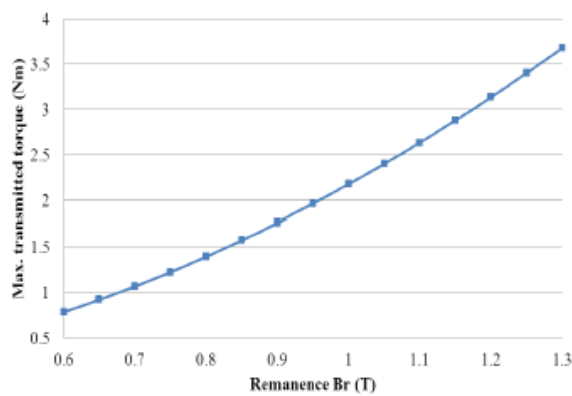
Gambar 2.12 Hasil Simulasi dengan Variasi $N_p = 16$, $N_L = 4$ dan Celah Udara 0,5 mm **(a)** *Flux Density* **(b)** Grafik Torsi terhadap Waktu

Gambar 2.12 Hasil Simulasi dengan Variasi $N_p = 16$, $N_L = 4$ dan Celah Udara 0,5 mm menunjukkan bahwa *magnetic gear* mampu mentransmisikan daya sesuai dengan desain yang telah dibuat yaitu sebesar 29 Nm dan *flux density* sebesar 1.26 T namun masih mengalami masalah dengan terjadinya slip pada saat torsi yang disalurkan mendekati dan lebih dari perkiraan desain.

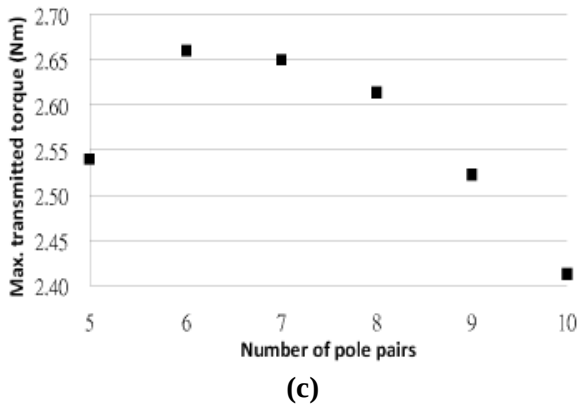
Yi-Chang Wu, pada tahun 2015 melakukan penelitian yang membahas tentang analisis pengaruh geometri dan parameter material terhadap torsi yang ditransmisikan oleh *magnetic spur gear*. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi menggunakan *software* Ansoft Maxwell.



(a)



(b)



Gambar 2.13 Hasil Simulasi Yi-Chang Wu (a) Grafik T vs Air Gap (b) Grafik T vs *Remanence* (c) Grafik T vs Jumlah Magnet

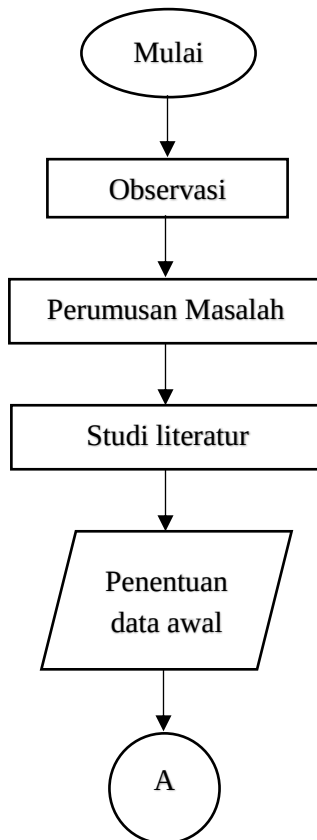
Gambar 2.13 Hasil Simulasi Yi-Chang Wu menunjukkan bahwa jumlah magnet, celah udara dan nilai *Remanence* dari magnet permanen memiliki pengaruh terhadap torsi yang ditransmisikan dengan *error* berada di bawah 10%. Hasil dari simulasi telah mendekati spesifikasi desain yang telah dibuat.

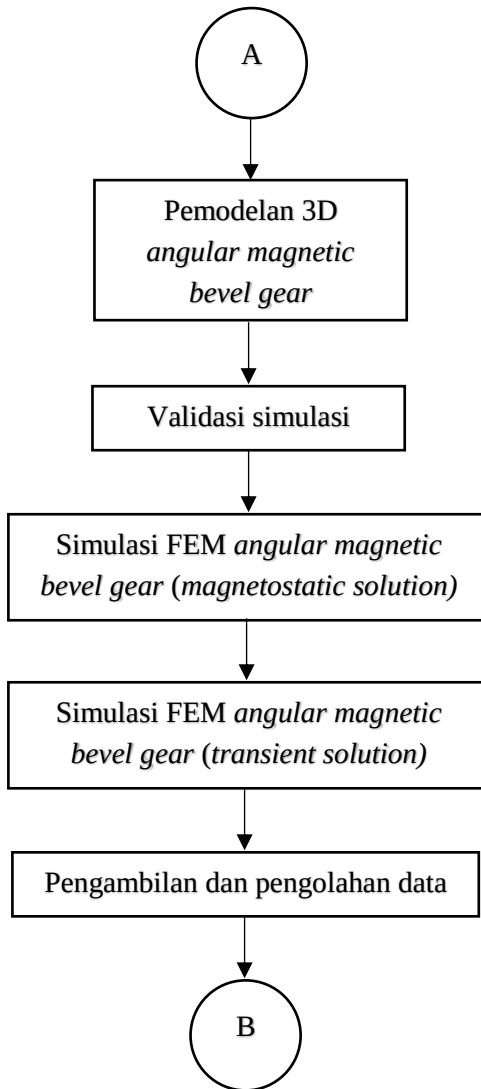
Dari tinjauan penelitian sebelumnya, belum pernah dilakukan penelitian tentang *bevel gear* dengan sudut poros lebih dari 90° dan dibandingkan dengan *mechanical gear*. Pada penelitian ini, akan dilakukan analisis pengaruh jumlah magnet dan celah udara terhadap karakteristik torsi yang ditransmisikan dengan batasan geometri yang mendekati dengan produk *mechanical gear* yang sudah ada. Dari penelitian ini, akan diketahui bagaimana konfigurasi yang tepat agar *angular magnetic bevel gear* dapat memiliki kemampuan menyerupai *mechanical bevel gear*.

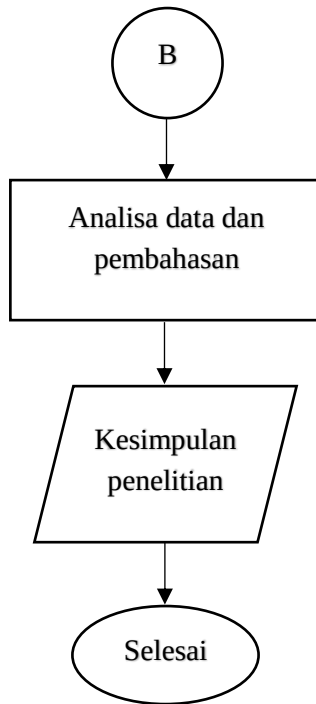
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian mengenai *angular magnetic bevel gear* memiliki beberapa tahapan yang dilakukan. Dalam bab ini, akan dijelaskan bagaimana melakukan tahapan-tahapan hingga penelitian ini selesai.

3.1. Diagram Alir Penelitian







Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan penelitian pada tugas akhir ini. Penjelasan mengenai tiap tahapan pada diagram alir adalah sebagai berikut:

3.1.1. Observasi

Observasi merupakan langkah pertama yang dilakukan dalam penelitian ini. Tujuan dilakukan observasi adalah menentukan ruang lingkup permasalahan yang akan dijadikan penelitian. Dalam hal ini, observasi dilakukan pada lingkup *angular magnetic bevel gear* dengan sudut poros 120° .

3.1.2. Perumusan Masalah

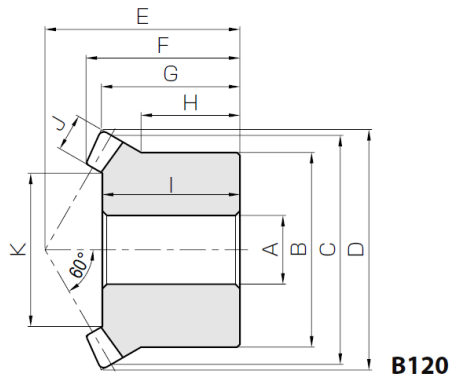
Setelah observasi dilakukan, dilakukan perumusan masalah yang terdapat pada lingkup observasi yang dilakukan. Permasalahan yang akan diteliti adalah potensi yang dimiliki oleh *angular magnetic bevel gear* untuk menggantikan roda gigi konvensional. Untuk itu, rumusan masalah yang telah ditentukan adalah bagaimana karakteristik torsi dari desain *angular magnetic bevel gear* dengan variasi jumlah magnet dan celah udara.

3.1.3. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mendapatkan informasi yang lebih detail untuk menunjang penelitian yang akan dilakukan. Informasi yang dicari berupa dasar teori roda gigi, *magnetic gear*, karakteristik magnet permanen, metode elemen hingga dan penelitian terdahulu yang telah dirangkum.

3.1.4. Penentuan Data Awal

Data awal yang digunakan berasal dari spesifikasi *angular miter gear* produksi Kohara Gear Industry Co., Ltd. dengan kode SAM3-20120. Dari spesifikasi tersebut, diambil parameter dimensi dan torsi yang mampu ditransmisikan. Spesifikasi *angular miter gear* produksi Kohara Gear Industry Co., Ltd. dengan kode SAM3-20120 terdapat pada gambar 3.2. Spesifikasi tersebut yang menjadi dasar perancangan *angular magnetic bevel gear*.



(a)

Catalog No.	Gear ratio	Module	No. of teeth	Shaft angle	Shape	Bores	Hub dia.	Pitch dia.	Outside dia.		Mounting distance	Total length		Crown to back length	
						A ₁₁₇			D	E		F	G		
SAM1.5-20045	1	m1.5	20	45°	B45	8	25	30	32.77	45	19.33	9.36			
SAM2-20045		m2	20	45°	B45	10	30	40	43.69	60	26.08	12.48			
SAM2.5-20045		m2.5	20	45°	B45	12	40	50	54.62	75	31.92	15.6			
SAM3-20045		m3	20	45°	B45	14	50	60	65.54	90	38.66	18.72			
SAM1.5-20060	1	m1.5	20	60°	B60	8	25	30	32.59	40	22.3	14.77			
SAM2-20060		m2	20	60°	B60	12	32	40	43.46	50	26.39	16.36			
SAM2.5-20060		m2.5	20	60°	B60	14	40	50	54.33	60	30.49	17.94			
SAM3-20060		m3	20	60°	B60	16	50	60	65.19	70	34.59	19.54			
SAM1.5-20120	1	m1.5	20	120°	B120	8	26	30	31.5	26	20.69	18.64			
SAM2-20120		m2	20	120°	B120	12	34	40	42	34	26.86	24.18			
SAM2.5-20120		m2.5	20	120°	B120	14	42	50	52.5	42	33.22	29.73			
SAM3-20120		m3	20	120°	B120	16	50	60	63	50	39.39	35.28			

(b)

Hub width	Length of bore	Face width	Holding surface dia.	Allowable torque (N·m)		Allowable torque (kgf·m)		Backlash (mm)	Weight (kg)	Catalog No.
				Bending strength	Surface durability	Bending strength	Surface durability			
H	I	J	K							
7.75	18	11	17	4.30	0.38	0.44	0.039	0.05–0.15	0.067	SAM1.5-20045
9.65	24	15	20.92	10.3	0.95	1.05	0.097	0.06–0.16	0.15	SAM2-20045
12.58	30	18	30.07	19.6	1.85	2.00	0.19	0.07–0.17	0.31	SAM2.5-20045
15.51	36	22	34	34.4	3.30	3.51	0.34	0.08–0.18	0.55	SAM3-20045
12.58	21	9	18.18	3.54	0.32	0.36	0.033	0.05–0.15	0.077	SAM1.5-20060
13.05	24	12	21.93	8.39	0.78	0.86	0.080	0.06–0.16	0.15	SAM2-20060
13.82	28	15	29.15	16.4	1.56	1.67	0.16	0.07–0.17	0.27	SAM2.5-20060
15.16	32	18	36.36	28.3	2.74	2.89	0.28	0.08–0.18	0.47	SAM3-20060
13.88	18	5	19.22	2.43	0.29	0.25	0.030	0.05–0.15	0.073	SAM1.5-20120
17.26	24	6.5	26.78	5.66	0.70	0.58	0.072	0.06–0.16	0.16	SAM2-20120
20.64	29	8.5	32.03	11.4	1.45	1.16	0.15	0.07–0.17	0.31	SAM2.5-20120
24.02	35	10	39.59	19.4	2.53	1.98	0.26	0.08–0.18	0.53	SAM3-20120

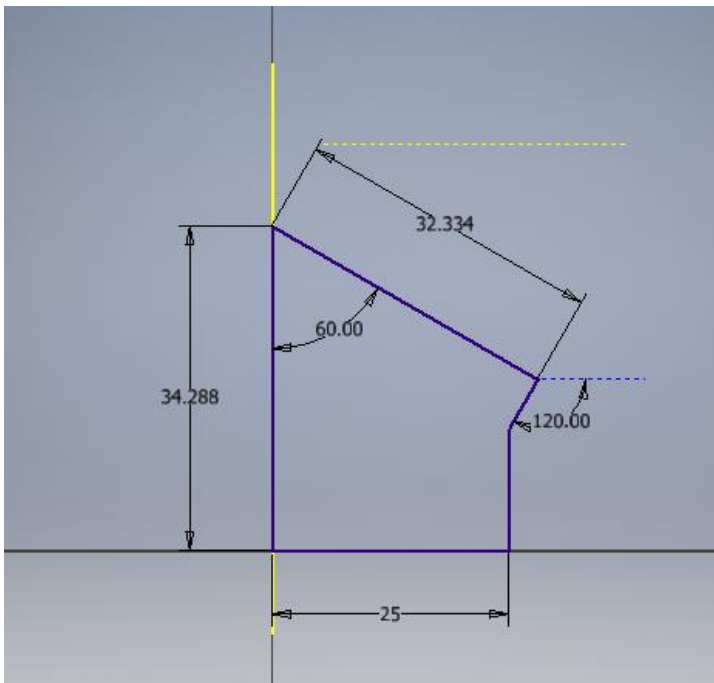
(c)

Gambar 3.2 Spesifikasi SAM3-20120 (a) Gambar Teknik (b) Dimensi (c) Dimensi dan Torsi

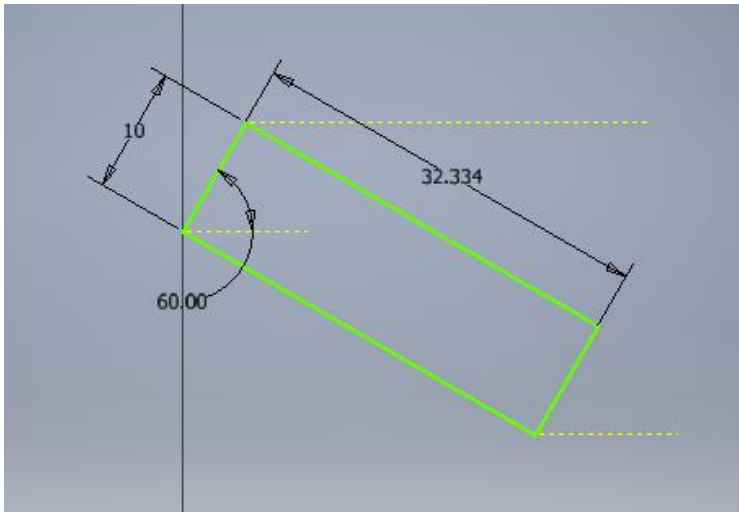
3.1.5. Pemodelan 3D *Angular Magnetic Bevel Gear*

Perancangan model 3D *angular magnetic bevel gear* dilakukan dengan program *Inventor 2017*. Pada gambar 3.3 *Sketch 2 Dimensi*, terdapat dua buah bagian yang dibuat yaitu *hub gear* dan magnet permanen. Berikut penjelasan lebih detail dari pemodelan 3D:

- a. Membuat *sketch* yang nantinya akan diproses agar menjadi 3 dimensi.



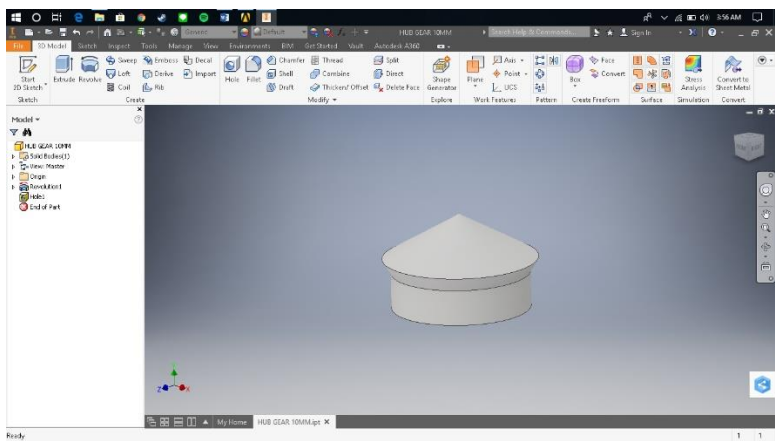
(a)



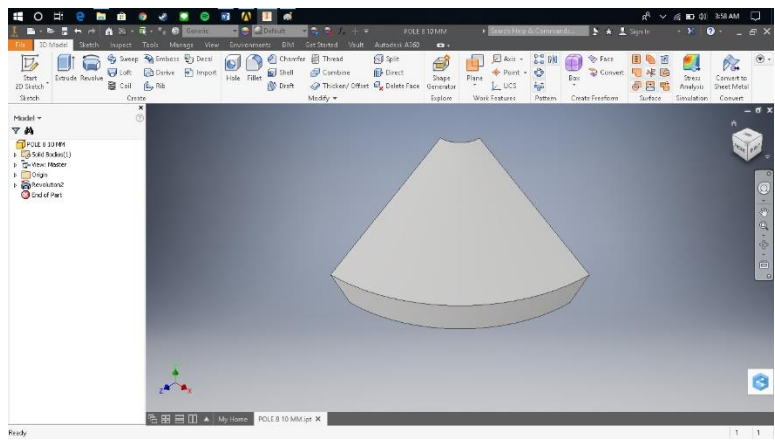
(b)

Gambar 3.3 *Sketch 2 Dimensi (a) Hub Gear (b) Magnet Permanen*

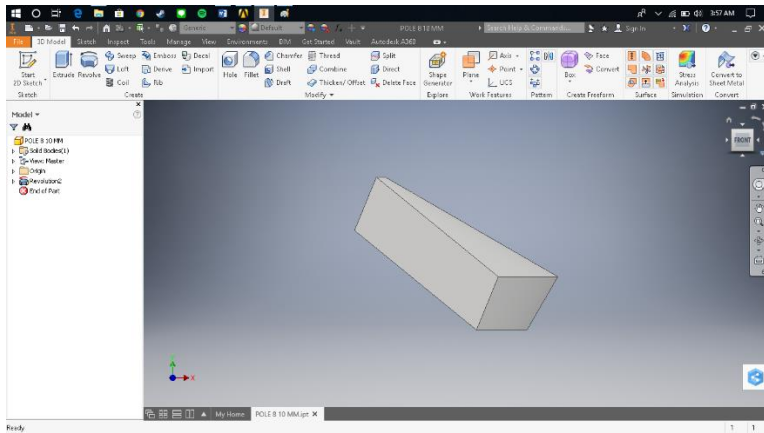
b. *Sketch* yang telah dibuat kemudian diproses *revolute* agar menjadi 3 dimensi seperti pada gambar 3.4 Model 3D. Untuk bagian *hub gear*, dilakukan *revolute* sebesar 360° . Sedangkan bagian magnet permanen, dilakukan *revolute* sebesar 90° untuk jumlah magnet 4 buah, 45° untuk jumlah magnet 8 buah dan $22,5^\circ$ untuk jumlah magnet 16 buah.



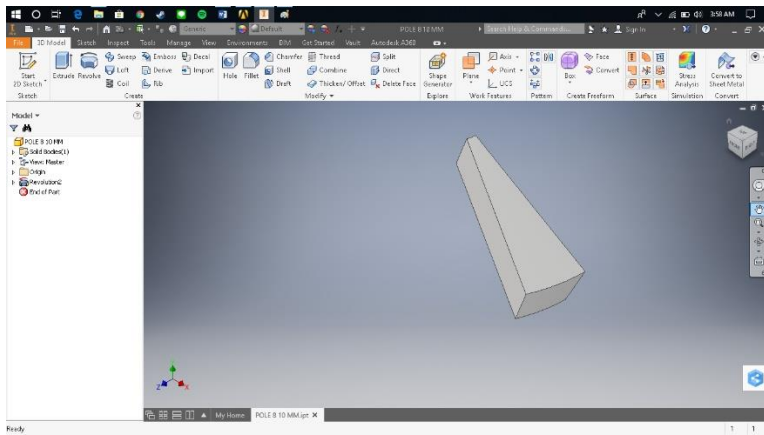
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 3.4 Model 3D (a) hub gear (b) Magnet Permanen 90° (c) Magnet Permanen 45° (d) Magnet permanen 22,5°

3.1.6. Validasi Simulasi

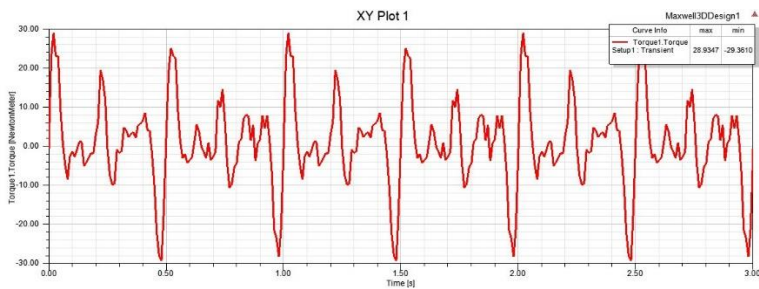
Simulasi pada penelitian ini menggunakan *software* Ansoft Maxwell 3D v. 17. Untuk membuktikan apakah simulasi yang dilakukan sudah sesuai, dilakukan validasi simulasi dengan objek simulasi adalah model dari penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Murugunandam. Pada validasi simulasi ini, diharapkan hasil yang mendekati hasil yang ada pada penelitian tersebut. *Software* yang digunakan pada penelitian yang dilakukan Murugunandam adalah MagNet.

Hasil yang didapatkan pada penelitian oleh Murugunandam terdapat pada Gambar 2.12 Hasil Simulasi dengan Variasi $N_p = 16$, $N_L = 4$ dan Celah Udara 0.5 mm (a) *Flux Density* (b) Grafik Torsi terhadap Waktu. Untuk hasil seluruh simulasi dapat dilihat pada tabel 3.1 Hasil Simulasi Penelitian Murugunandam

Tabel 3.1 Hasil Simulasi Penelitian Murugunandam

<i>Air Gap Length</i>	0.5 mm	1 mm	1.5 mm	2 mm
<i>Result</i>	29 Nm	25.5 Nm	20.5 Nm	16.0 Nm

Kemudian dilakukan simulasi menggunakan *software* Ansoft Maxwell 3D v. 17 dengan model yang sama dengan penelitan oleh Murugunandam. Gambar 3.5 adalah hasil simulasi untuk model yang dibuat oleh Murugunandam.



Gambar 3.5 Hasil Validasi Simulasi

Sedangkan untuk hasil validasi simulasi yang lain terdapat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Hasil Validasi Simulasi

<i>Air Gap Length</i>	0.5 mm	1 mm	1.5 mm	2 mm
<i>Result</i>	28,9 Nm	25.6 Nm	20.7 Nm	16.1 Nm

Dapat dilihat bahwa hasil validasi simulasi tidak berbeda jauh dari hasil penelitian oleh Muruganandam. *Error* yang terjadi di bawah 10% sehingga dapat disimpulkan bahwa simulasi yang dilakukan *valid*.

3.1.7. Simulasi FEM (*Magnetostatic Solution*)

Setelah model 3D *angular magnetic bevel gear* telah dibuat, dilakukan simulasi FEM dengan penyelesaian *magnetostatic*. Penyelesaian *magnetostatic* dilakukan pada kondisi statis. Dari simulasi ini akan didapatkan hasil berupa *static magnetic field* (H), *current density* (J) dan *magnetic flux density* (B). Selain itu, didapatkan juga besaran turunan seperti gaya dan torsi. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan pada simulasi FEM (*magnetostatic solution*) akan dijelaskan pada sub bab 3.2.

3.1.8. Simulasi FEM (*Transient Solution*)

Setelah simulasi FEM (*magnetostatic solution*) telah selesai, dilakukan simulasi FEM dengan penyelesaian *transient*. Penyelesaian *transient* dilakukan dengan basis waktu. Dari simulasi ini akan didapatkan hasil berupa *static magnetic field* (H), *current density* (J) dan *magnetic flux density* (B). Selain itu, didapatkan juga besaran turunan seperti gaya dan torsi. Penjelasan lebih lanjut mengenai tahapan pada simulasi FEM (*magnetostatic solution*) akan dijelaskan pada sub bab 3.2.

3.1.9. Pengambilan dan Pengolahan Data

Setelah semua simulasi telah selesai, data pokok yang diambil adalah torsi yang ditransmisikan. Data yang didapat adalah hasil variasi jumlah magnet dan celah udara. Setelah itu, data tersebut dikelompokkan menjadi sesuai jumlah magnet dan dibuat grafik. Kemudian, ketiga grafik tersebut dimasukkan dalam satu grafik untuk dianalisa.

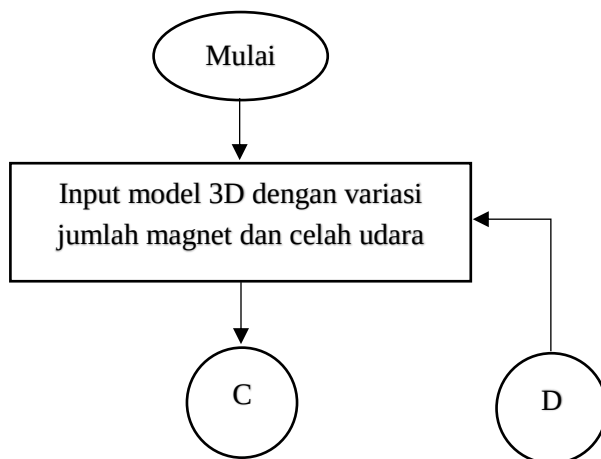
3.1.10. Analisa Data dan Pembahasan

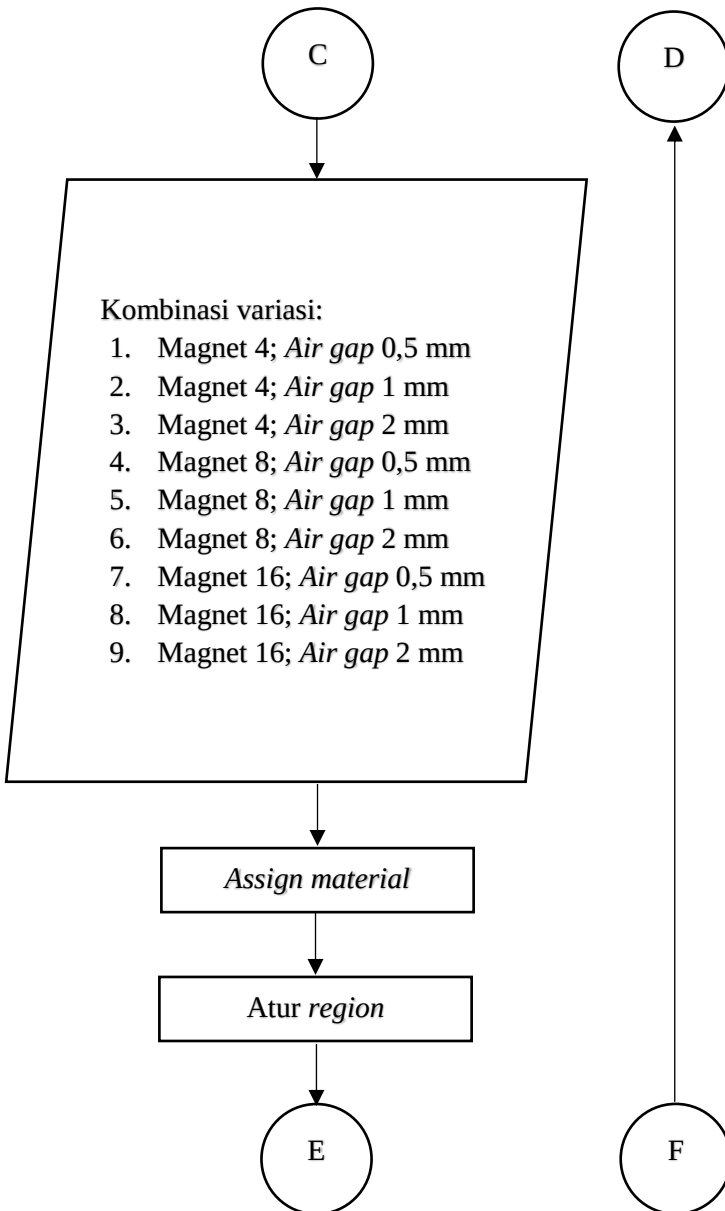
Setelah data selesai diolah, dilakukan analisa dan pembahasan mengenai hasil dari simulasi. Analisa meliputi bagaimana pengaruh jumlah magnet terhadap karakteristik torsi dan bagaimana pengaruh celah udara magnet terhadap karakteristik torsi.

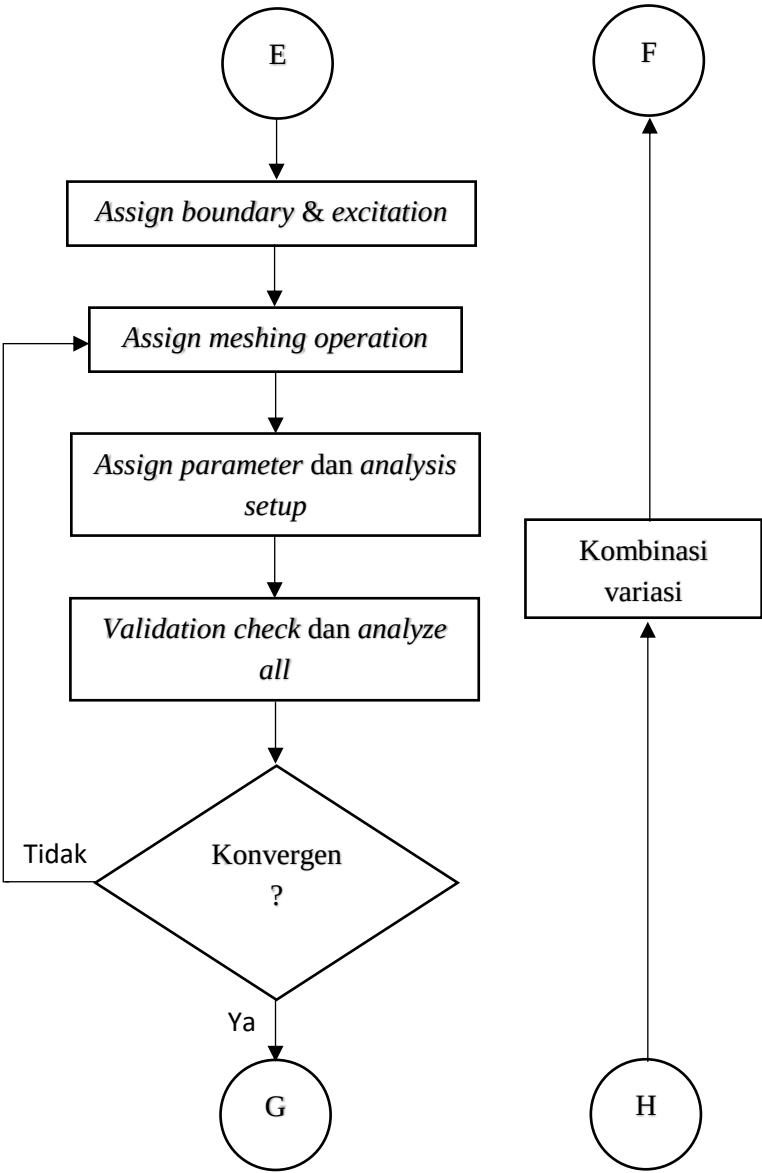
3.1.11. Kesimpulan Penelitian

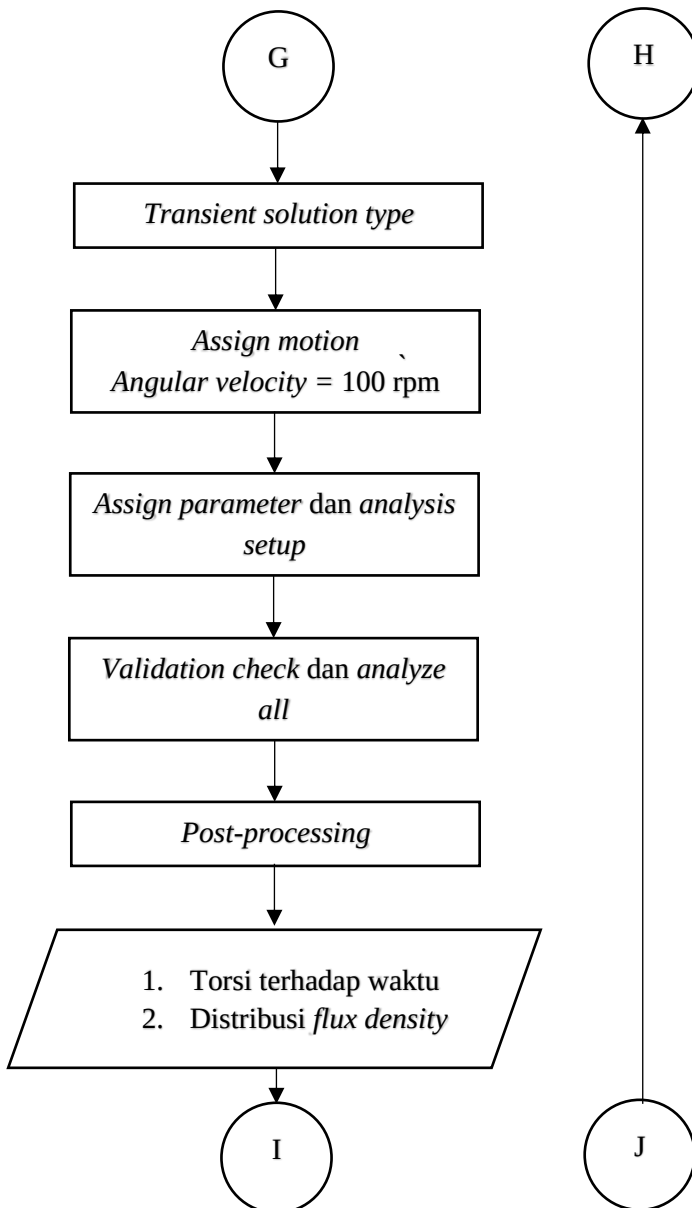
Dari analisa data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan yang menjawab tujuan dari penelitian ini.

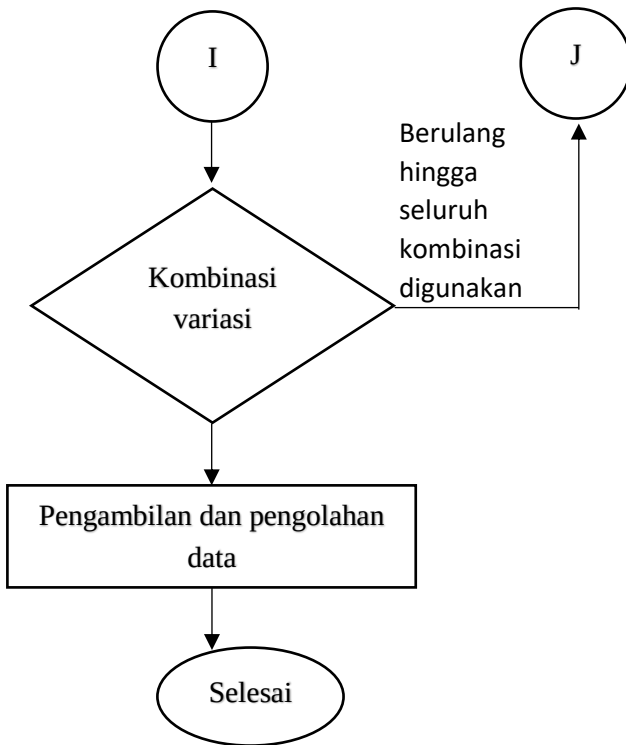
3.2. Diagram Alir Simulasi











Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi

Gambar 3.6 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan simulasi penelitian ini. Simulasi menggunakan *software* Ansoft Maxwell v17. Penjelasan tentang tiap tahapan adalah sebagai berikut.

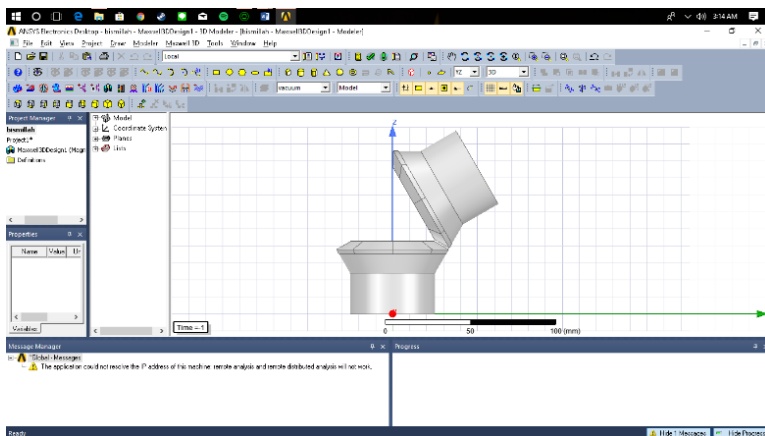
3.2.1. *Input Model 3 Dimensi*

Untuk melakukan *input* model 3 dimensi, hal yang pertama dilakukan adalah membuka *software* ANSYS Electronics v18 kemudian pilih *project* Maxwell 3D Design. *Input* model 3 dimensi

terdapat pada *menu Modeler*. Bagian *angular magnetic bevel gear* yang harus dimasukkan adalah *hub gear* dan magnet permanen seperti pada gambar 3.7 Hasil *Input* dan *Assembly 3D Model*. Penyusunan model dilakukan dengan variasi jumlah magnet permanen seperti pada tabel 3.3. Penyusunan dilanjutkan dengan mengatur variasi celah udara pada pasangan *angular magnetic bevel gear* sebesar 0,5; 1; dan 2 mm.

Tabel 3.3 Spesifikasi Magnet Permanen dengan Variasi Jumlah Magnet

No.	Kelompok Magnet	Volume ($\times 10^{-9} \text{ m}^3$)
1	4 Magnet	1330,45
2	8 Magnet	665,22
3	16 Magnet	332,61

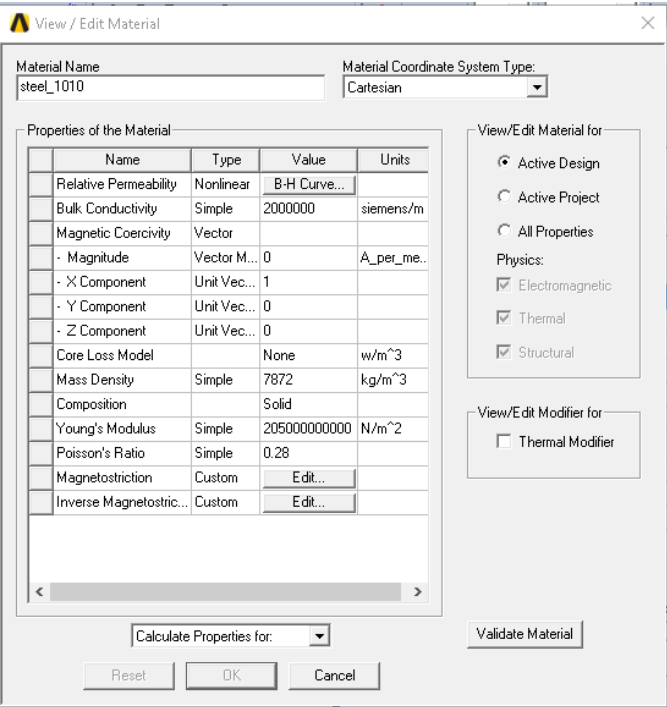


Gambar 3.7 Hasil *Input* dan *Assembly 3D Model*

3.2.2. Assign Material

Setelah memasukkan model ke dalam *project*, dilakukan *assign material* yang berfungsi memberikan material pada model. Material yang digunakan berasal dari *library* Ansoft Maxwell v.17. Material *hub gear* adalah *steel 1010*, sedangkan magnet permanen

menggunakan NdFeB48M. *Properties* untuk tiap material terdapat pada gambar 3.8.



(a)

View / Edit Material

Material Name: NdFeB48M NORTH

Material Coordinate System Type: Cylindrical

Properties of the Material

Name	Type	Value	Units
Relative Permeability	Simple	1.0523	
Bulk Conductivity	Simple	667000	siemens/m
Magnetic Coercivity	Vector		
- Magnitude	Vector M...	-1035000	A_per_me...
- R Component	Unit Vec...	1	
- Phi Component	Unit Vec...	0	
- Z Component	Unit Vec...	0	
Composition		Solid	
Young's Modulus	Simple	1600000000...	N/m^2
Poisson's Ratio	Simple	0.24	
Magnetostriction	Custom	Edit...	
Inverse Magnetostrict...	Custom	Edit...	

View/Edit Material for:

☒ Active Design

☐ Active Project

☐ All Properties

Physics:

☒ Electromagnetic

☒ Thermal

☒ Structural

View/Edit Modifier for:

☐ Thermal Modifier

Calculate Properties for: [v]

Reset OK Cancel

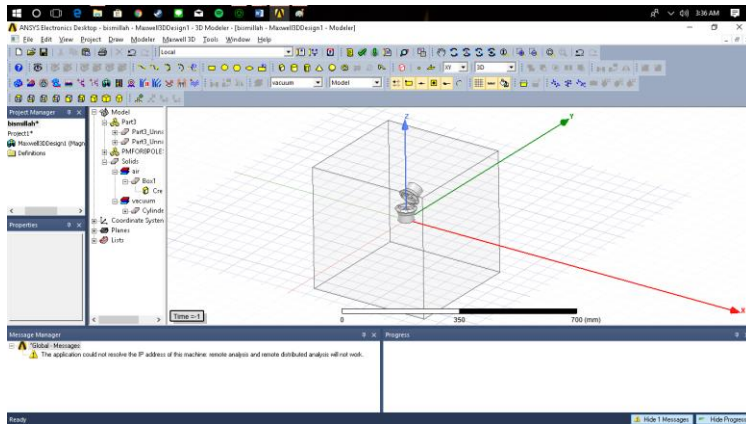
Validate Material

(b)

Gambar 3.8 Material Properties (a) Steel 1010 (b) NdFeB48M

3.2.3. Atur Region

Region adalah daerah di sekitar *angular magnetic bevel gear* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. Pembuatan *region* dilakukan dengan membuat model 3D berbentuk balok dengan ukuran 400 x 400 x 400 mm dan diatur sebagai daerah berisikan udara seperti pada gambar 3.9.



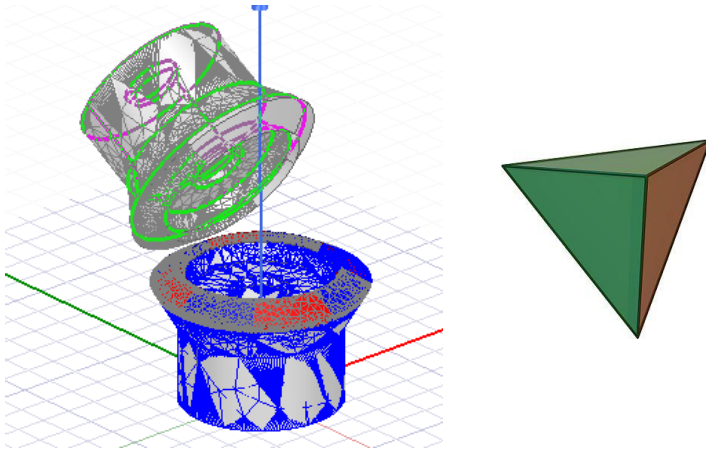
Gambar 3.9 Pembuatan Region

3.2.4. *Assign Boundary & Excitation*

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

3.2.5. *Assign Meshing Operation*

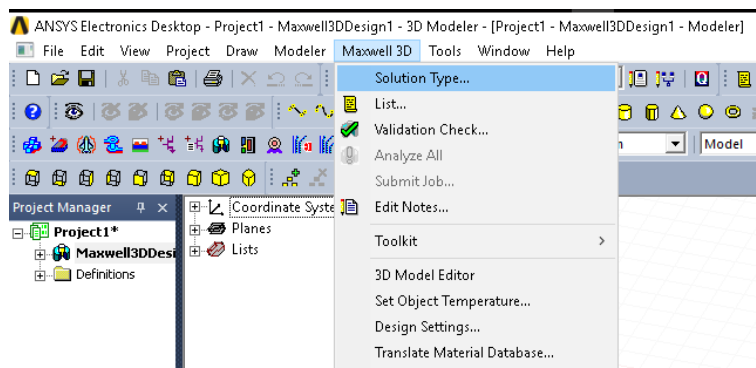
Selanjutnya, pengaturan *mesh* pada setiap model 3 dimensi. Pada gambar 3.10 Bentuk *Meshing*, bentuk *meshing* volume yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe tetrahedra. Sedangkan metode *mesh* yang digunakan yaitu *Mesh inside selection*, kemudian opsi *length based*.



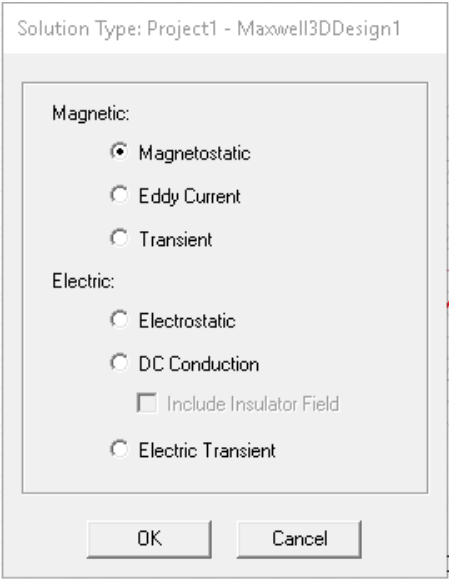
Gambar 3.10 Bentuk *Meshing*

3.2.6. *Assign Parameter dan Analysis Setup*

Assign Parameter berfungsi untuk menentukan parameter yang nantinya dihasilkan dari simulasi. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah torsi. Parameter dimasukkan dengan memilih objek kemudian pilih opsi *assign* parameter, kemudian pilih opsi *torque*. *Assign parameter* dilakukan pada *primary* dan *secondary gear*. Selanjutnya adalah pengaturan analisis yang dilakukan *software* seperti pada gambar 3.11 Pemilihan Solusi Simulasi. Gambar 3.12 Pengaturan Analisis menjelaskan bahwa pada penyelesaian *magnetostatic*, pengaturan ini bertujuan untuk mencapai hasil analisa yang konvergen. Metode yang digunakan adalah *adaptive passes* sebanyak 10 dengan *error* sebesar 1% sedangkan pada penyelesaian *transient*, pengaturan ini berfungsi untuk mengatur lama pengambilan data dan *timeframe* pengambilan data. Lama pengambilan data sebesar 2 detik dan pengambilan data setiap 0,02 detik.

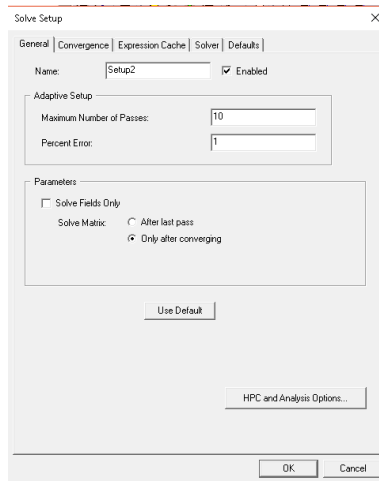


(a)

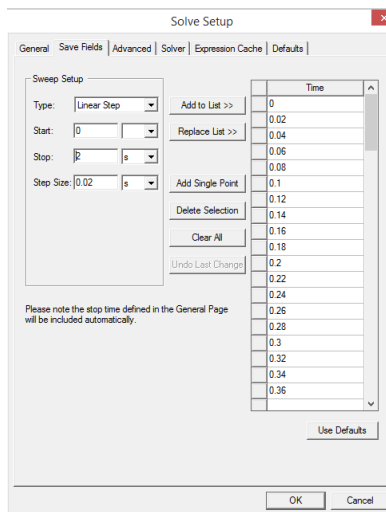


(b)

Gambar 3.11 Pemilihan Solusi Simulasi (a) Menu Maxwell 3D (b) Sub-menu *Solution Type*



(a)

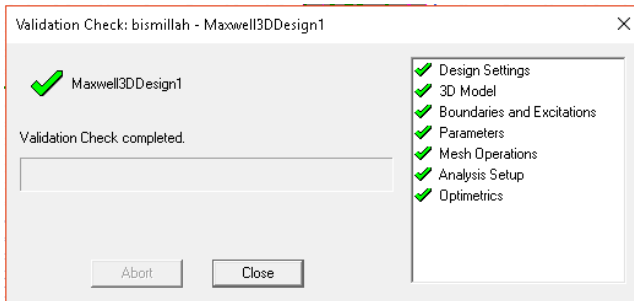


(b)

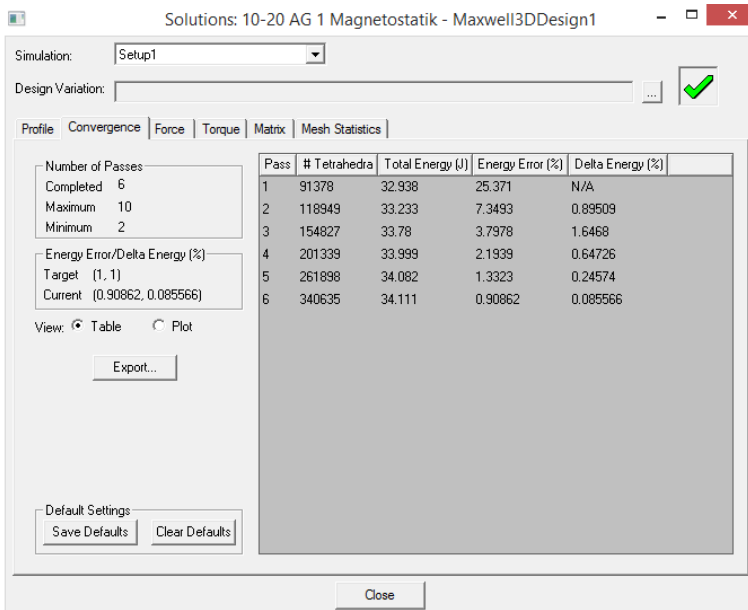
Gambar 3.12 Pengaturan Analisis (a) *Magnetostatic* (b) *Transient*

3.2.7. *Validation Check & Analyze All*

Pada gambar 3.13 Tahap *Validation Check*, terdapat proses validasi apakah model sudah siap untuk dianalisa. Apabila telah memenuhi seluruh kriteria yang ada, maka simulasi dapat dilanjutkan ke tahap analisa. Pada penyelesaian magnetostatic, *software* akan melakukan iterasi seperti yang sudah kita atur sebelumnya hingga hasil analisa yang konvergen tercapai seperti pada gambar 3.14 Tahap Iterasi Analisis *Magnetostatic*. Jika hasil analisa tidak mencapai konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada *meshing* yang telah dibuat. Pada penyelesaian *transient*, hasil analisa akan diambil dari *timeframe* yang telah ditentukan dengan salah satu *angular magnetic bevel gear* diatur berputar pada kecepatan tertentu.



Gambar 3.13 Tahap *Validation Check*



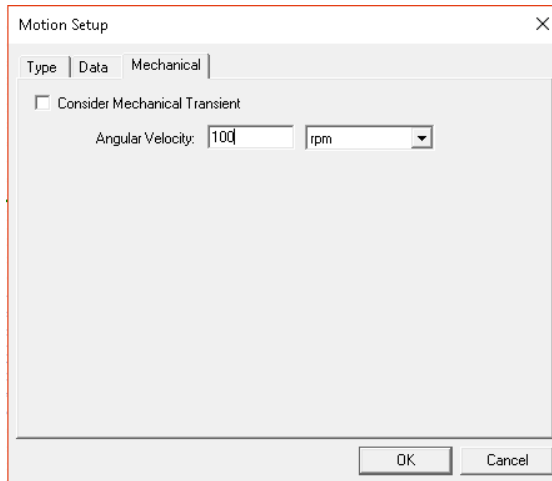
Gambar 3.14 Tahap Iterasi Analisis *Magnetostatic*

3.2.8. *Transient Solution Type*

Setelah hasil analisa mencapai konvergen, maka langkah selanjutnya adalah simulasi dengan penyelesaian *transient*. Penyelesaian *transient* diatur melalui *sub menu* Solution Type pada *menu* Maxwell 3D.

3.2.9. *Assign Motion*

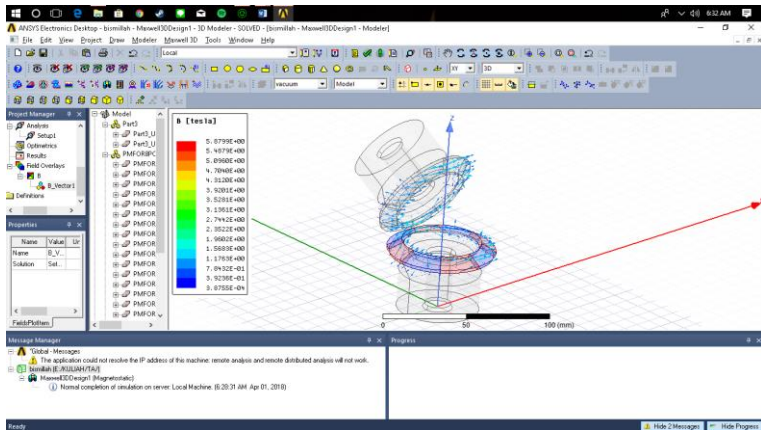
Untuk melanjutkan simulasi dengan penyelesaian *transient*, dibutuhkan satu buah *angular magnetic bevel gear* sebagai *driver* dan pasangannya sebagai *driven*. *Assign motion* berfungsi untuk mengatur pergerakan model. Gambar 3.15 *Assign Motion* menjelaskan bahwa dibutuhkan gerak rotasi dengan kecepatan sudut 100 rpm (sesuai dengan pengujian produk KHK Gear SAM3-20120).



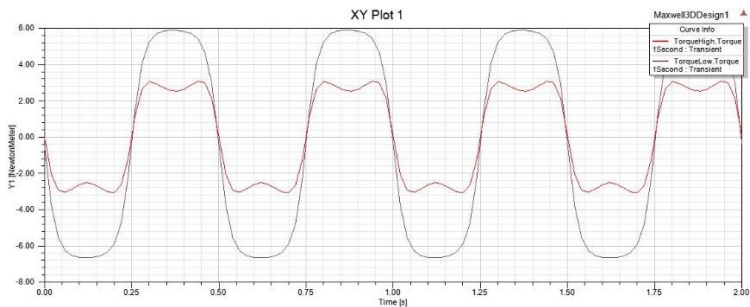
Gambar 3.15 Assign Motion

3.2.10. *Post-processing*

Tahap *post-processing* merupakan tahap pengambilan hasil simulasi. Setelah proses simulasi dan analisis 3D *finite element* selesai, kita akan mendapatkan data mengenai *flux density* (B) untuk penyelesaian *magnetostatic* dan torsi yang dihasilkan *angular magnetic bevel gear* untuk penyelesaian *transient*. Pada gambar 3.16, terlihat anak panah yang menunjukkan vektor dari *flux density* disertai warna yang menunjukkan besar *flux density*. Setelah mendapatkan hasil ini, akan dibandingkan besar *flux density* tiap variasi untuk melihat perbedaan yang ada dan dihubungkan dengan hasil torsi. Pada gambar 3.17, terdapat dua grafik dimana warna merah mewakili *source magnetic gear* dan warna hitam mewakili *drive magnetic gear*. Kedua grafik tersebut merupakan hasil dari parameter torsi pada *primary* dan *secondary gear*.



Gambar 3.16 Nilai dan Arah Vektor *Flux Density*



Gambar 3.17 Grafik Torsi terhadap Waktu

3.2.11. Pengambilan dan Pengolahan Data

Setelah tahap *post-processing* selesai, data dari simulasi kemudian dikumpulkan dari semua variasi dan diolah sebelum dilakukan analisa dan pembahasan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga untuk mendapatkan nilai *flux density* dan torsi pada permukaan 120° *angular magnetic bevel gear*. Simulasi yang dilakukan terdapat dua tahap, yaitu *magnetostatic* dan *transient*. Simulasi dilakukan berdasarkan variasi jumlah magnet dan celah udara. Variasi jumlah magnet yang digunakan adalah sejumlah 4, 8 dan 16 buah dengan rasio 1:1 sedangkan variasi celah udara yang digunakan adalah sebesar 0,5; 1 dan 2 mm.

Melalui proses simulasi *magnetostatic* didapatkan data besar dan arah *flux density*. Kemudian dilanjutkan dengan proses simulasi *transient* sehingga didapatkan grafik torsi dari 120° *angular magnetic bevel gear*.

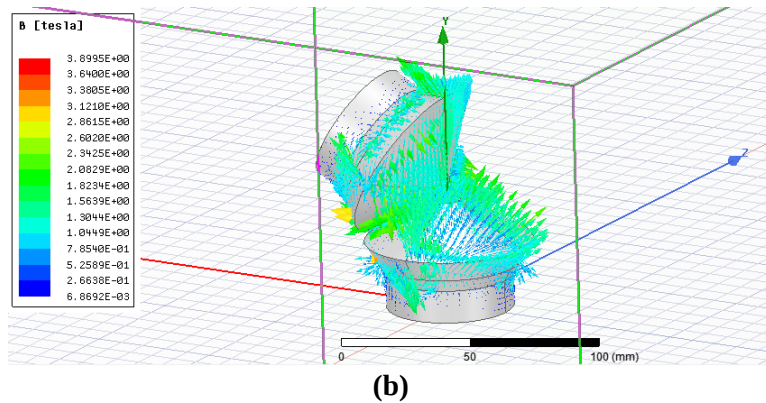
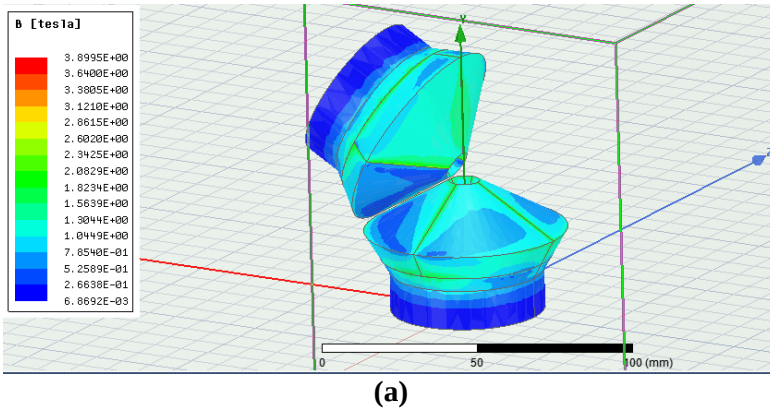
Hasil simulasi digunakan untuk mempelajari pengaruh variasi jumlah magnet dan celah udara terhadap karakteristik torsi 120° *angular magnetic bevel gear* dengan membandingkan hasil simulasi dari tiap variasi sehingga diketahui gabungan variasi yang memiliki performa paling optimal dari desain yang telah dibuat.

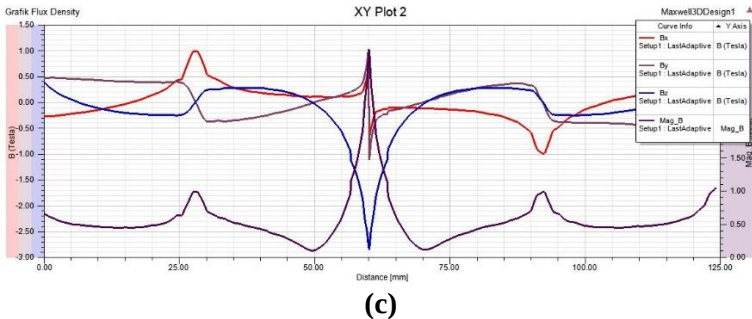
4.1. Analisis Flux Density Hasil Simulasi Magnetostatic

Hasil simulasi *magnetostatic* adalah konvergensi simulasi dan besar *flux density* yang pada 120° *angular magnetic bevel gear*. Konvergensi yang diinginkan adalah besar *error* di bawah 1%. Dari semua simulasi yang dilakukan, besar *error* telah mencapai angka yang diinginkan. Selain itu, dari tiap simulasi didapatkan besar dan arah dari *flux density*. Besar dan arah *flux density* diilustrasikan pada model yang telah dibuat. *Flux density* diilustrasikan anak panah yang menunjukkan arah vektor dan juga memiliki warna untuk mengilustrasikan nilai skalar. Hasil simulasi *magnetostatic* dijelaskan pada sub bab 4.

4.1.1. Hasil Simulasi *Magnetostatic* dengan Variasi Jumlah Magnet 4 Buah

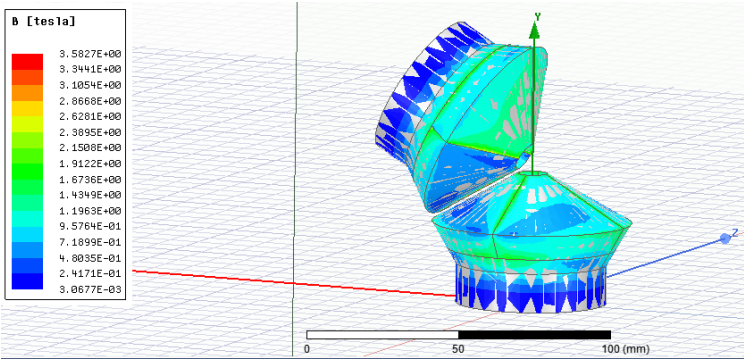
Pada variasi jumlah magnet sebanyak 4 buah terdapat 3 hasil dengan variasi celah udara sebesar 0,5; 1 dan 2 mm. Hasil ilustrasi *flux density* pada tiap variasi dapat dilihat pada gambar 4.1 – 4.3.



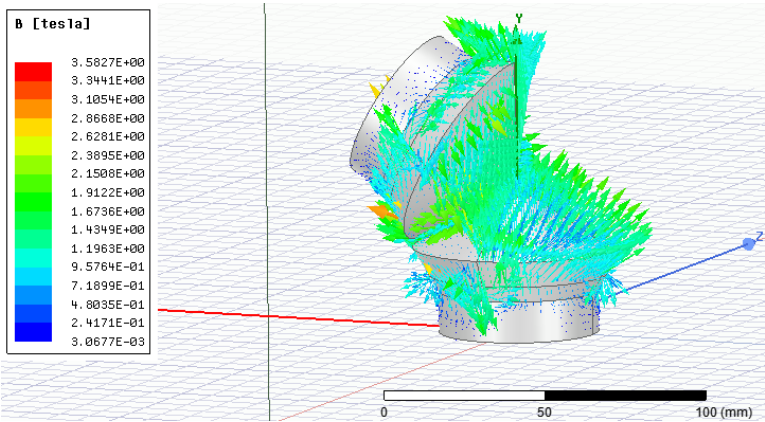


Gambar 4.1 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 0,5 mm

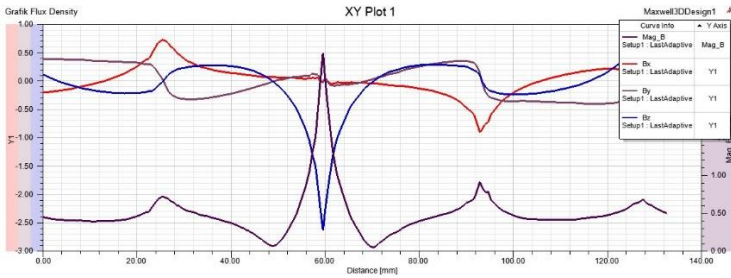
Dapat dilihat dari gambar 4.1 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 0,5 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.1 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas besar *flux density* berwarna biru muda yang memiliki nilai 1,0449-1,3044 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.1. (b) dimana mayoritas anak panah berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang memiliki nilai 0,0069-0,2664 Tesla, anak panah berwarna hijau yang memiliki nilai 1,0823-2,0829 Tesla, anak panah berwarna kuning dengan nilai 2,6020-2,8615 Tesla dan anak panah berwarna jingga dengan nilai 3,1210-3,3805 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.1. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.



(a)



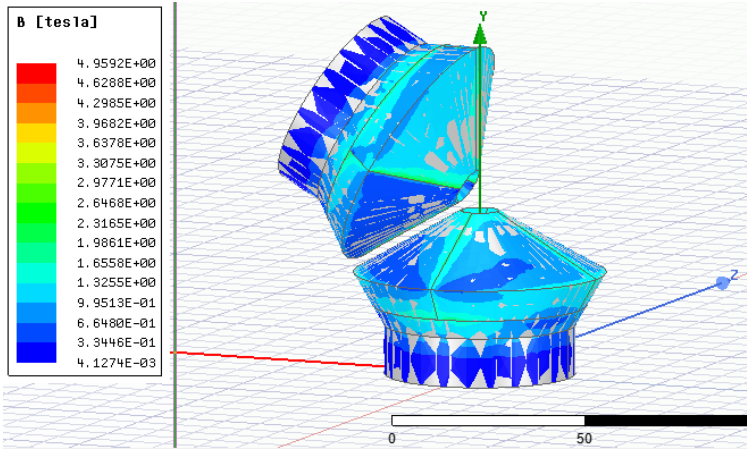
(b)



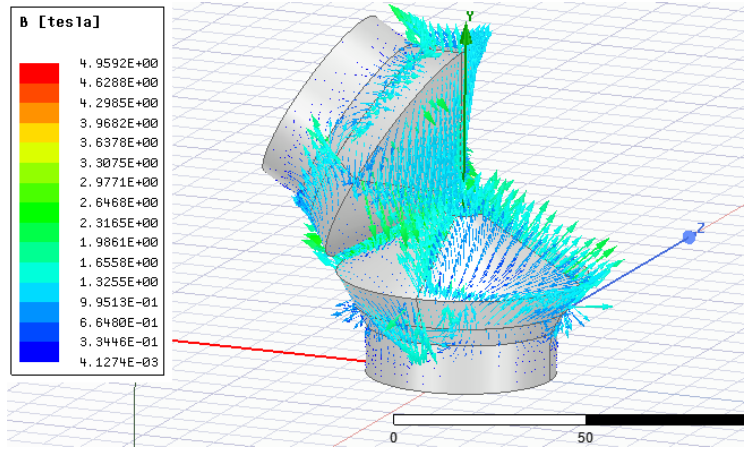
(c)

Gambar 4.2 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 1 mm

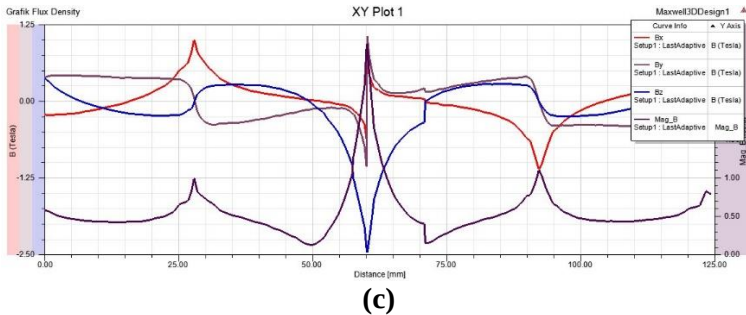
Dapat dilihat dari gambar 4.2 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 1 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.2 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas besar *flux density* berwarna biru muda yang memiliki nilai 1,0449-1,3044 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.2 (b) dimana mayoritas anak panah berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang memiliki nilai 0,0069-0,2664 Tesla, anak panah berwarna hijau yang memiliki nilai 1,0823-2,0829 Tesla, anak panah berwarna kuning dengan nilai 2,6020-2,8615 Tesla dan anak panah berwarna jingga dengan nilai 3,1210-3,3805 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.2. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.



(a)



(b)



Gambar 4.3 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 2 mm

Dapat dilihat dari gambar 4.3 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 4 dengan Celah Udara 2 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.3 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas besar *flux density* berwarna biru muda yang memiliki nilai 1,0449-1,3044 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.3 (b) dimana mayoritas anak panah berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang memiliki nilai 0,0069-0,2664 Tesla dan anak panah berwarna hijau yang memiliki nilai 1,0823-2,0829 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.3. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.

Dari ketiga hasil simulasi *magnetostatic* pada 120° *angular magnetic bevel gear* dengan jumlah magnet 4 buah, terdapat perbedaan *flux density* yang dihasilkan akibat variasi celah udara. Pada variasi celah udara sebesar 0,5 mm, mayoritas *flux density* berwarna biru muda namun pada permukaan dimana *primary gear* dan *secondary gear* pada posisi terdekat, terdapat *flux density* berwarna kuning dan jingga. Selain itu, *flux density* tersebar di seluruh permukaan model. Kemudian pada variasi celah udara

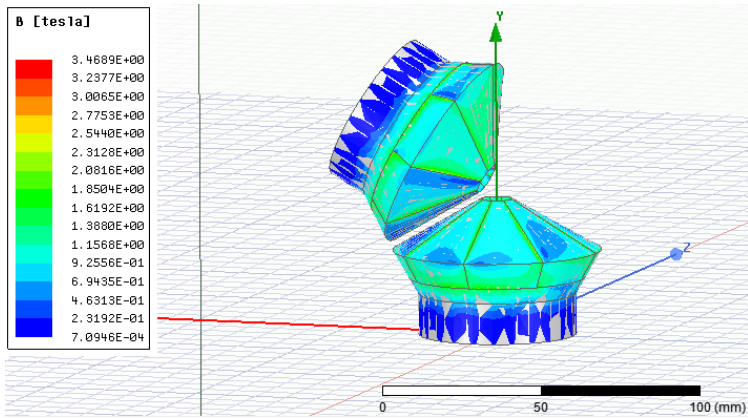
sebesar 1 mm, masih terdapat *flux density* berwarna kuning dan jingga tetapi besar dan arahnya tidak seperti pada variasi sebesar 0,5 mm. Selain besar *flux density* yang lebih kecil, arah yang berubah menjadi lebih acak berpengaruh pada torsi yang dihasilkan. Terlihat *flux density* tidak tersebar secara merata pada permukaan model. Pada variasi celah udara sebesar 2 mm, nilai *flux density* terbesar pada kisaran 1,0823-2,0829 Tesla yang diilustrasikan dengan anak panah berwarna hijau. *Flux density* yang tersebar pada permukaan model juga semakin tidak merata.

Besar dan arah *flux density* dipengaruhi oleh jarak titik yang diamati pada magnet kutub utara dengan magnet kutub selatan. Pada bagian tengah magnet kutub utara mayoritas anak panah berwarna biru tua, semakin mendekati magnet kutub selatan mulai muncul anak panah berwarna hijau. Terlihat *flux density* terbesar ada pada magnet kutub utara *primary gear* yang berdekatan dengan magnet kutub selatan *secondary gear*. Terjadi perubahan arah vektor yang diakibatkan perubahan arah magnetisasi ketika magnet kutub selatan *secondary gear* berada pada posisi terdekat dengan magnet kutub utara *primary gear*. Arah vektor *flux density* tegak lurus dengan arah vektor *surface current density* yang menuju dari magnet kutub utara ke magnet kutub selatan. Hal tersebut diikuti dengan besar *flux density* yang semakin besar seiring dengan semakin dekatnya jarak magnet kutub utara dengan kutub selatan. Hal ini dibuktikan dengan *flux density* dari hasil simulasi yang semakin melemah ketika celah udara bertambah. Ketika magnet kutub selatan *primary gear* berdekatan dengan magnet kutub utara *secondary gear*, maka arah *flux density* menjadi terbalik. Hal ini berpengaruh pada besar torsi yang terjadi saat simulasi *transient*. Pengaruh dari *flux density* terhadap grafik torsi akan dijelaskan pada sub bab 4.2.

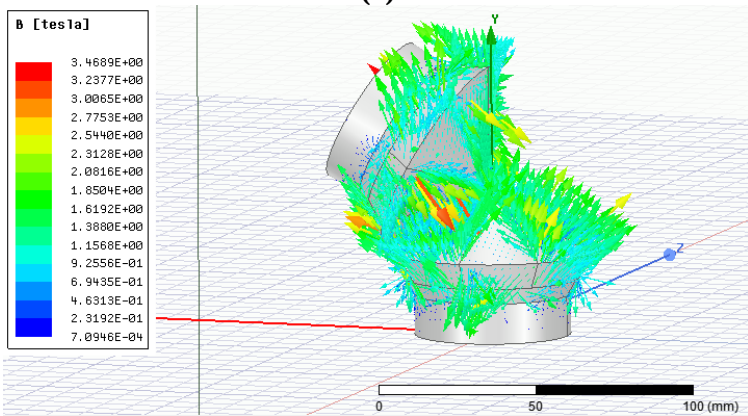
4.1.2. Hasil Simulasi *Magnetostatic* dengan Variasi Jumlah Magnet 8 Buah

Pada variasi jumlah magnet sebanyak 8 buah terdapat 3 hasil dengan variasi celah udara sebesar 0,5; 1 dan 2 mm. Hasil

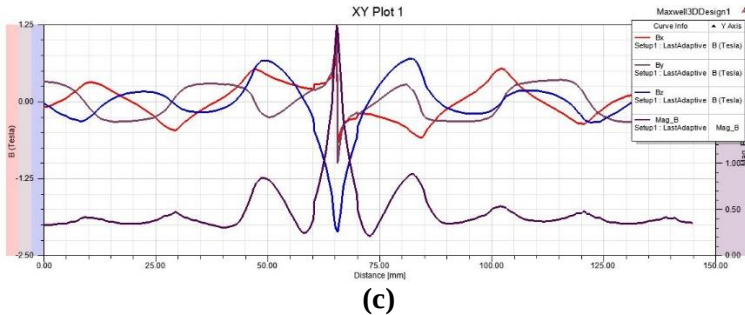
ilustrasi *flux density* pada tiap variasi dapat dilihat pada gambar 4.4 – 4.6.



(a)

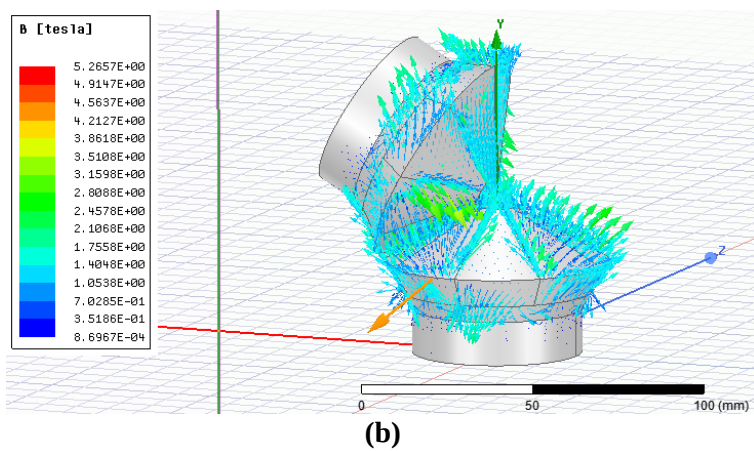
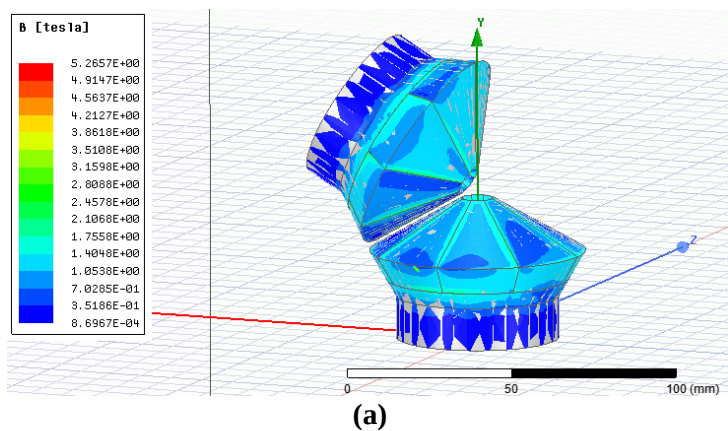


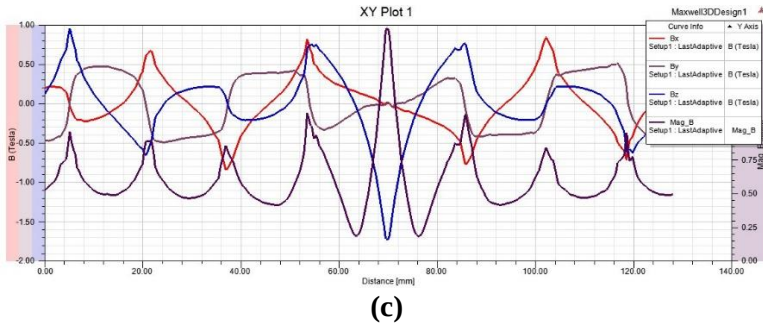
(b)



Gambar 4.4 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 0,5 mm

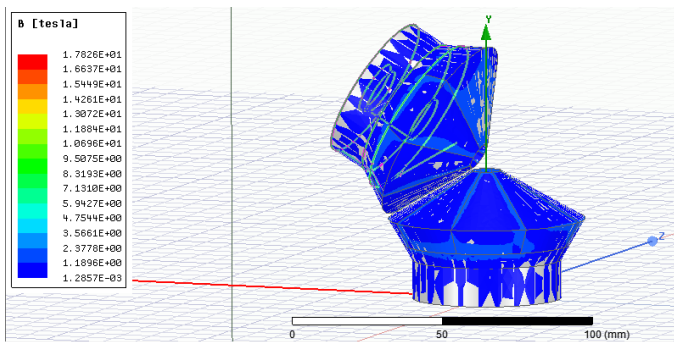
Dapat dilihat dari gambar 4.4 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 0,5 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.4 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas besar *flux density* berwarna biru muda yang memiliki nilai 0,9256-1,1568 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.4 (b) dimana mayoritas anak panah berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang memiliki nilai 0,0007-0,0232 Tesla, anak panah berwarna hijau yang memiliki nilai 1,6192-1,8504 Tesla, anak panah berwarna kuning yang memiliki nilai 2,3128-2,5440 Tesla, anak panah berwarna jingga yang memiliki nilai 2,7753-3,0065 Tesla, anak panah warna jingga tua yang memiliki nilai 3,0065-3,2377 Tesla dan anak panah warna merah yang memiliki nilai 3,2377-3,4689 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.4. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.



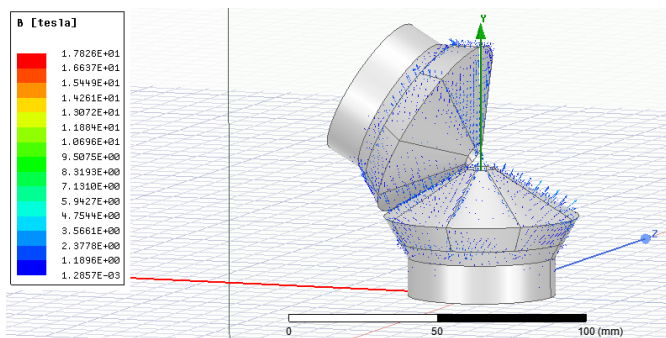


Gambar 4.5 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 1 mm

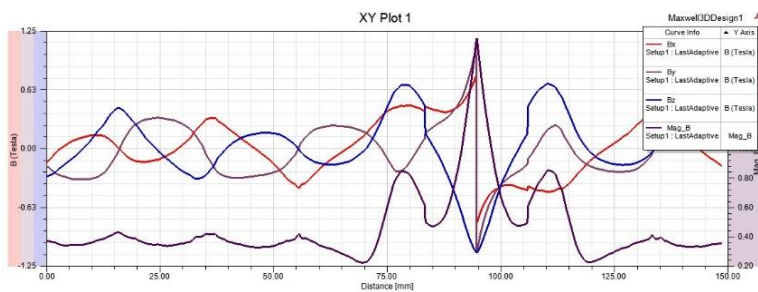
Dapat dilihat dari gambar 4.5 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 1 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.5 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas besar *flux density* berwarna biru muda yang memiliki nilai 1,4048-1,7558 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.5 (b) dimana mayoritas anak panah berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang memiliki nilai 0,0008-0,3519 Tesla, anak panah berwarna hijau yang memiliki nilai 2,4578-2,8088 Tesla, anak panah berwarna hijau kekuningan yang memiliki nilai dan anak panah berwarna jingga yang memiliki nilai 4,2127-4,5637 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.5. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.6 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 2 mm

Dapat dilihat dari gambar 4.6 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 8 dengan Celah Udara 2 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.6 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas *flux density* berwarna biru tua dengan nilai 0,0013-1,1896 Tesla. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru yang lebih muda dengan nilai 1,1896-2,3778 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.6. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.

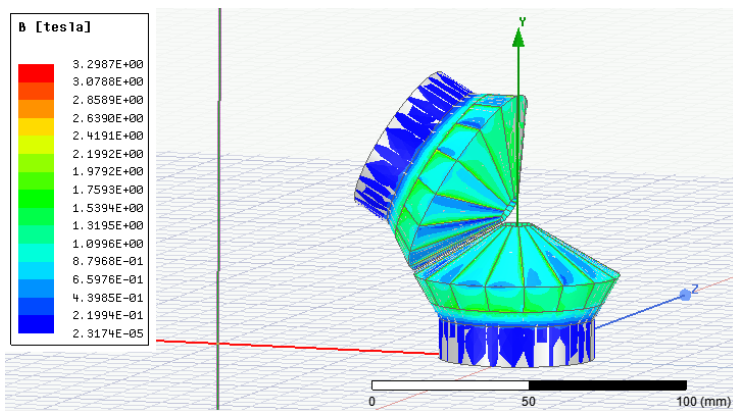
Dari ketiga hasil simulasi *magnetostatic* pada 120° *angular magnetic bevel gear* dengan jumlah magnet 8 buah, terdapat perbedaan *flux density* yang dihasilkan akibat variasi celah udara. Pada variasi celah udara sebesar 0,5 mm, mayoritas *flux density* berwarna biru muda namun pada permukaan dimana *primary gear* dan *secondary gear* pada posisi terdekat, terdapat *flux density* berwarna kuning dan jingga. Kemudian pada variasi celah udara sebesar 1 mm, masih terdapat *flux density* berwarna kuning dan jingga tetapi besar dan arahnya tidak seperti pada variasi sebesar 0,5 mm. Selain besar *flux density* yang lebih kecil, arah yang berubah menjadi lebih acak berpengaruh pada torsi yang dihasilkan. Terlihat *flux density* tidak tersebar secara merata pada permukaan model. Pada variasi celah udara sebesar 2 mm, nilai *flux density* terbesar pada kisaran 1,1896-2,3778 Tesla yang diilustrasikan dengan anak panah berwarna biru yang lebih muda.

Besar dan arah *flux density* dipengaruhi oleh jarak titik yang diamati pada magnet kutub utara dengan magnet kutub selatan. Pada bagian tengah magnet kutub utara mayoritas anak panah berwarna biru tua, semakin mendekati magnet kutub selatan mulai muncul anak panah berwarna hijau. Terlihat *flux density* terbesar ada pada magnet kutub utara *primary gear* yang berdekatan dengan magnet kutub selatan *secondary gear*. Terjadi

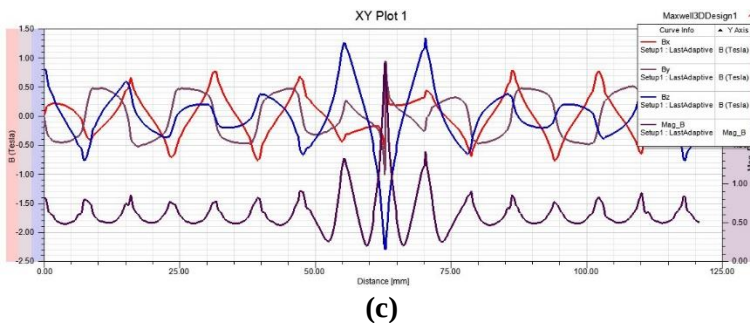
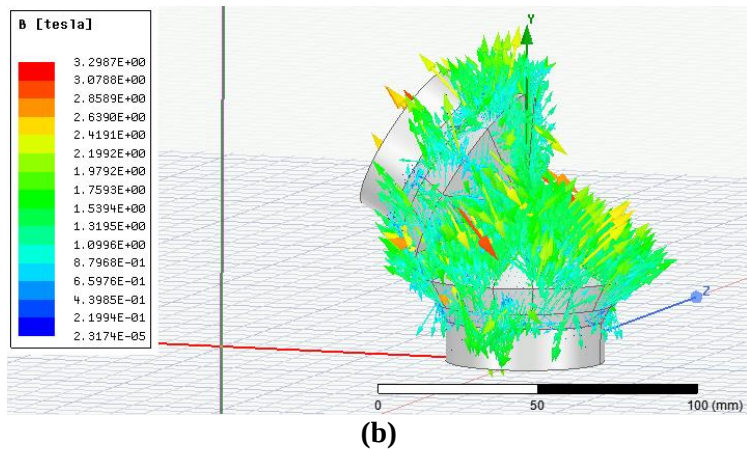
perubahan arah vektor yang diakibatkan perubahan arah magnetisasi ketika magnet kutub selatan *secondary gear* berada pada posisi terdekat dengan magnet kutub utara *primary gear*. Arah vektor *flux density* tegak lurus dengan arah vektor *surface current density* yang menuju dari magnet kutub utara ke magnet kutub selatan. Hal tersebut diikuti dengan besar *flux density* yang semakin besar seiring dengan semakin dekatnya jarak magnet kutub utara dengan kutub selatan. Hal ini dibuktikan dengan *flux density* dari hasil simulasi yang semakin melemah ketika celah udara bertambah. Ketika magnet kutub selatan *primary gear* berdekatan dengan magnet kutub utara *secondary gear*, maka arah *flux density* menjadi terbalik. Hal ini berpengaruh pada besar torsi yang terjadi saat simulasi *transient*. Pengaruh dari *flux density* terhadap grafik torsi akan dijelaskan pada sub bab 4.2.

4.1.3. Hasil Simulasi *Magnetostatic* dengan Variasi Jumlah Magnet 16 Buah

Pada variasi jumlah magnet sebanyak 16 buah terdapat 3 hasil dengan variasi celah udara sebesar 0,5; 1 dan 2 mm. Hasil ilustrasi *flux density* pada tiap variasi dapat dilihat pada gambar 4.7 – 4.9.



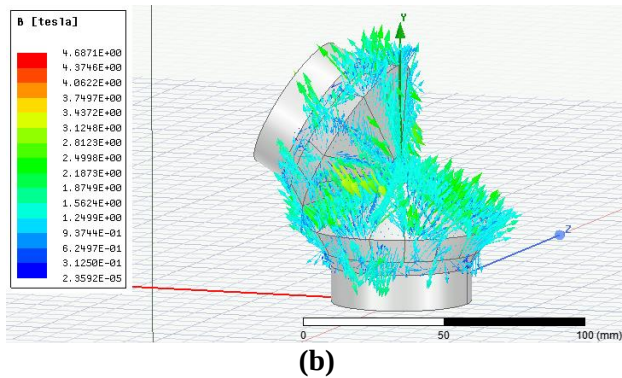
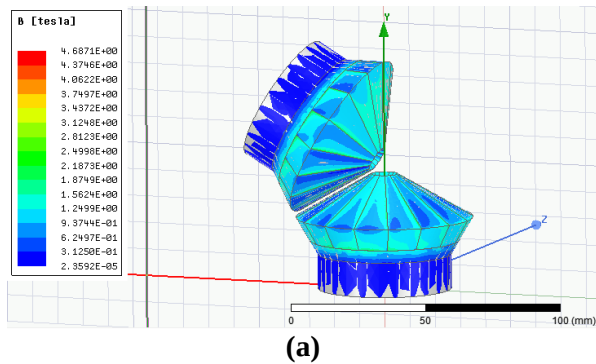
(a)

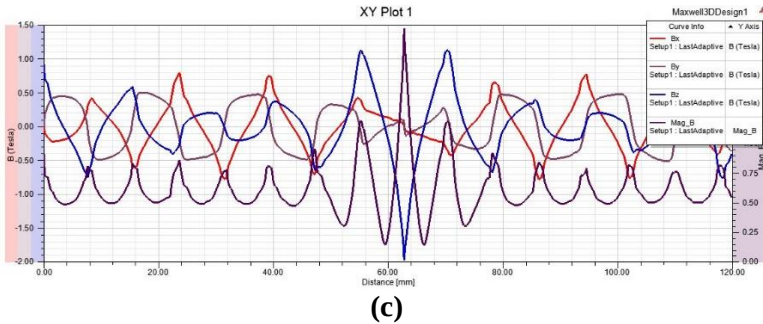


Gambar 4.7 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 0,5 mm

Dapat dilihat dari gambar 4.7 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 0,5 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.7 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas besar *flux density* berwarna biru muda yang memiliki nilai 0,8797-1,0996 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.7 (b) dimana mayoritas anak panah

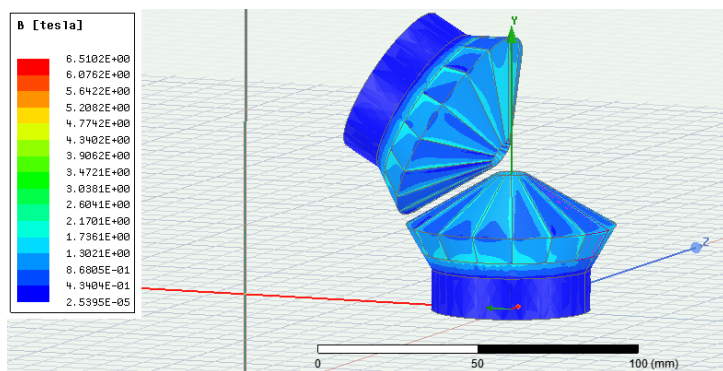
berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang memiliki nilai 0,00002-0,2199 Tesla, anak panah berwarna hijau yang memiliki nilai 1,5394-1,7593 Tesla, anak panah berwarna kuning yang memiliki nilai 2,1992-2,4191 Tesla, anak panah berwarna jingga yang memiliki nilai 2,6390-2,8589 Tesla dan anak panah warna jingga tua yang memiliki nilai 2,8589-3,0788 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.7. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.



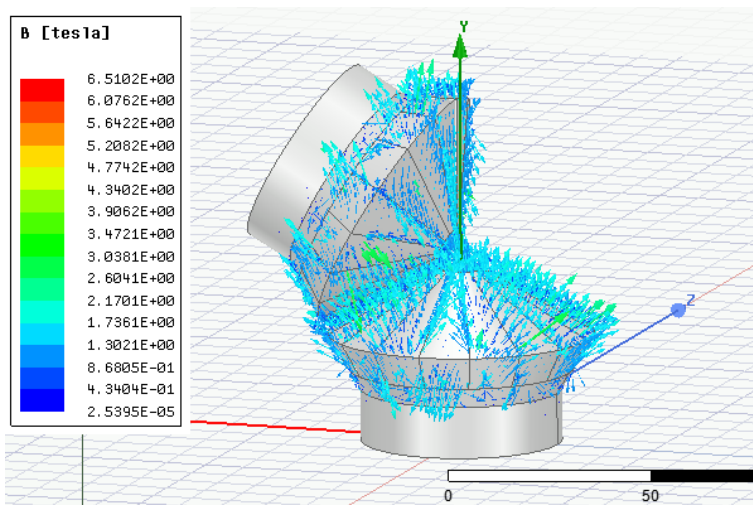


Gambar 4.8 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 1 mm

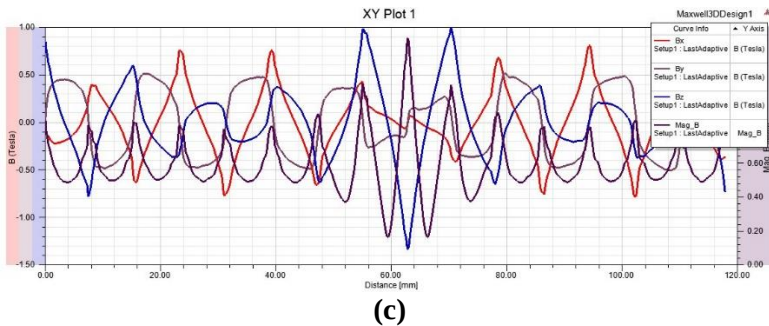
Dapat dilihat dari gambar 4.8 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 1 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.8 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas besar *flux density* berwarna biru muda yang memiliki nilai 1,2499-1,5624 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.8 (b) dimana mayoritas anak panah berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang memiliki nilai 0,00002-0,3125 Tesla, anak panah berwarna hijau yang memiliki nilai 2,1873-2,4998 Tesla dan anak panah berwarna kuning kehijauan yang memiliki nilai 2,8123-3,1248 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.8. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.



(a)



(b)



Gambar 4.9 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 2 mm

Dapat dilihat dari gambar 4.9 Hasil Simulasi *Magnetostatic* Jumlah Magnet 16 dengan Celah Udara 2 mm, *flux density* hanya terdapat pada magnet kutub utara. Gambar 4.9 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas besar *flux density* berwarna biru yang lebih muda dengan nilai 0,8681-1,3021 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.9 (b) dimana mayoritas anak panah berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang memiliki nilai 0,00002-0,4340 Tesla, anak panah berwarna biru muda yang memiliki nilai 1,7361-2,1701 Tesla dan anak panah berwarna hijau toska yang memiliki nilai 2,6041-3,0381 Tesla. Dapat dilihat pada gambar 4.9. (c) *flux density* maksimal terdapat pada vektor z. Hasil maksimal ini didapat pada titik terdekat antara *primary gear* dengan *secondary gear*. *Flux density* vektor z dikarenakan *surface current density* berubah ke arah y sedangkan arah *flux density* tegak lurus dengan arah *surface current density*.

Dari ketiga hasil simulasi *magnetostatic* pada 120° *angular magnetic bevel gear* dengan jumlah magnet 16 buah, terdapat perbedaan *flux density* yang dihasilkan akibat variasi celah udara. Pada variasi celah udara sebesar 0,5 mm, mayoritas *flux density* berwarna biru muda namun pada permukaan dimana *primary gear* dan *secondary gear* pada posisi terdekat, terdapat *flux density*

berwarna kuning dan jingga. Kemudian pada variasi celah udara sebesar 1 mm, masih terdapat *flux density* berwarna kuning tetapi besar dan arahnya tidak seperti pada variasi sebesar 0,5 mm. Selain besar *flux density* yang lebih kecil, arah yang berubah menjadi lebih acak berpengaruh pada torsi yang dihasilkan. Terlihat *flux density* tidak tersebar secara merata pada permukaan model. Pada variasi celah udara sebesar 2 mm, nilai *flux density* terbesar pada kisaran 2,6041-3,0381 Tesla yang diilustrasikan dengan anak panah berwarna hijau toska.

Besar dan arah *flux density* dipengaruhi oleh jarak titik yang diamati pada magnet kutub utara dengan magnet kutub selatan. Pada bagian tengah magnet kutub utara mayoritas anak panah berwarna biru tua, semakin mendekati magnet kutub selatan mulai muncul anak panah berwarna hijau. Terlihat *flux density* terbesar ada pada magnet kutub utara *primary gear* yang berdekatan dengan magnet kutub selatan *secondary gear*. Terjadi perubahan arah vektor yang diakibatkan perubahan arah magnetisasi ketika magnet kutub selatan *secondary gear* berada pada posisi terdekat dengan magnet kutub utara *primary gear*. Arah vektor *flux density* tegak lurus dengan arah vektor *surface current density* yang menuju dari magnet kutub utara ke magnet kutub selatan. Hal tersebut diikuti dengan besar *flux density* yang semakin besar seiring dengan semakin dekatnya jarak magnet kutub utara dengan kutub selatan. Hal ini dibuktikan dengan *flux density* dari hasil simulasi yang semakin melemah ketika celah udara bertambah. Ketika magnet kutub selatan *primary gear* berdekatan dengan magnet kutub utara *secondary gear*, maka arah *flux density* menjadi terbalik. Hal ini berpengaruh pada besar torsi yang terjadi saat simulasi *transient*. Pengaruh dari *flux density* terhadap grafik torsi akan dijelaskan pada sub bab 4.2.

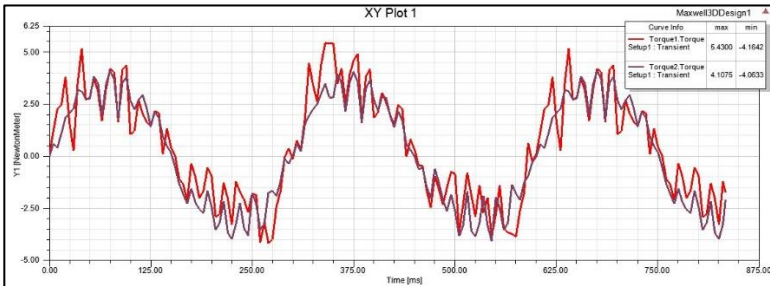
4.2. Analisis Torsi Hasil Simulasi *Transient*

Hasil dari simulasi *transient* adalah grafik torsi dari model 120° *angular magnetic bevel gear*. Grafik torsi didapatkan setelah model diberikan putaran. Pada simulasi ini, putaran dilakukan pada

kecepatan sudut sebesar 100 rpm. Grafik torsi yang dihasilkan simulasi ini mewakili torsi pada *primary gear* dan *secondary gear*. Dari proses simulasi ini, dapat diketahui besar torsi maksimal yang dapat disalurkan dan efisiensi dari tiap konfigurasi *gear*. Hasil tersebut kemudian dibandingkan antara satu dengan yang lain sehingga dapat diketahui pengaruh variasi jumlah magnet dan celah udara terhadap torsi yang dihasilkan. Hasil simulasi *transient* dijelaskan pada sub bab 4.

4.2.1. Hasil Simulasi *Transient* dengan Variasi Jumlah Magnet 4 Buah

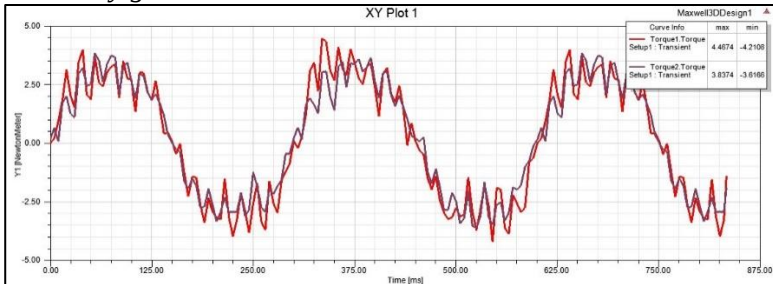
Setelah simulasi *magnetostatic* selesai, dilakukan simulasi *transient*. Sama dengan simulasi *magnetostatic*, terdapat variasi celah udara pada pemodelan dengan variasi jumlah magnet sebanyak 4 buah. Variasi celah udara sebesar 0,5; 1 dan 2 mm. Nilai torsi untuk tiap variasi celah udara dapat dilihat pada gambar 4.10 – 4.12.



Gambar 4.10 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 0,5 mm

Gambar 4.10 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 0,5 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola

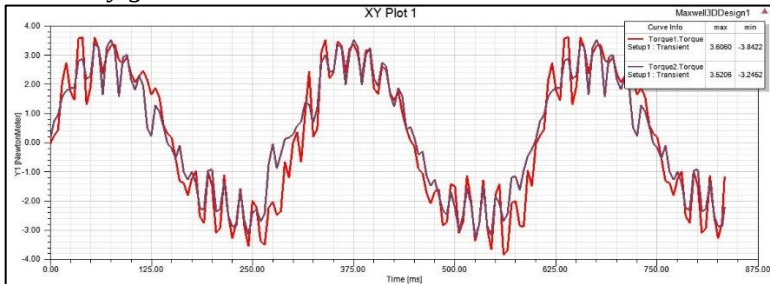
sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 5,4300 Nm dan nilai minimal sebesar -4,1542 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 4,1075 Nm dan nilai minimal sebesar -4,0633 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.



Gambar 4.11 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 1 mm

Gambar 4.11 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 1 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 4,4674 Nm dan nilai minimal sebesar -4,2108 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada

sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 3,8374 Nm dan nilai minimal sebesar -3,6166 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.



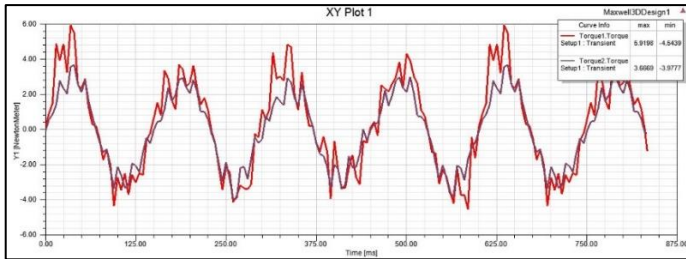
Gambar 4.12 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 2 mm

Gambar 4.12 Grafik Torsi Jumlah Magnet 4 Buah dan Celah Udara 2 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 3,6060 Nm dan nilai minimal sebesar -3,8422 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 3,5206 Nm dan nilai minimal sebesar -3,2462 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.

Dari ketiga hasil simulasi *transient* pada 120° *angular magnetic bevel gear*, torsi yang dihasilkan memiliki pola yang sama dengan *flux density* hasil simulasi *magnetostatic*. Semakin besar celah udara, maka semakin kecil nilai torsi yang dihasilkan. Hal ini terbukti dari nilai maksimal dan minimal dari tiap variasi dimana variasi celah udara sebesar 0,5 mm adalah yang terbesar dan variasi celah udara sebesar 2 mm adalah yang terkecil. Jika dibandingkan grafik satu dengan yang lain, dapat dilihat bahwa grafik variasi celah udara sebesar 0,5 mm cenderung lebih fluktuatif dibandingkan variasi celah udara yang lain. Hal ini disebabkan oleh nilai *flux density* pada variasi celah udara sebesar 0,5 mm lebih berubah-ubah sedangkan pada variasi celah udara sebesar 1 mm, *flux density* cenderung lebih stabil dan variasi celah udara sebesar 2 mm memiliki nilai *flux density* yang paling stabil. Nilai *flux density* yang berubah-ubah dipengaruhi oleh jarak dan luas sapuan dari tiap magnet. Semakin kecil celah udara maka nilai *flux density* semakin besar. Semakin luas sapuan magnet maka nilai *flux density* semakin besar. Maka dari itu, *flux density* sangat berpengaruh pada nilai torsi yang dihasilkan. Nilai maksimal didapatkan ketika titik yang diamati berada pada magnet kutub utara sedangkan nilai minimal didapatkan ketika titik yang diamati berada pada magnet kutub selatan.

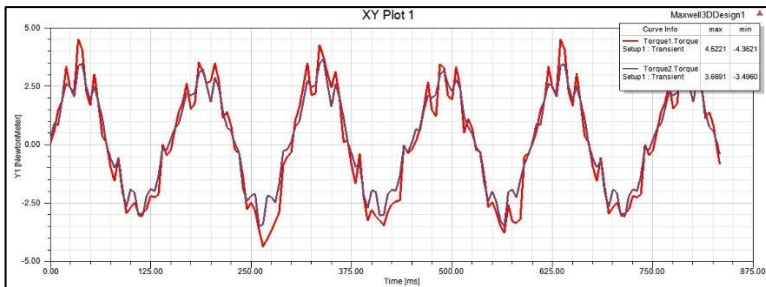
4.2.2. Hasil Simulasi *Transient* dengan Variasi Jumlah Magnet 8 Buah

Setelah simulasi *magnetostatic* selesai, dilakukan simulasi *transient*. Sama dengan simulasi *magnetostatic*, terdapat variasi celah udara pada pemodelan dengan variasi jumlah magnet sebanyak 8 buah. Variasi celah udara sebesar 0,5; 1 dan 2 mm. Nilai torsi untuk tiap variasi celah udara dapat dilihat pada gambar 4.13 – 4.15.



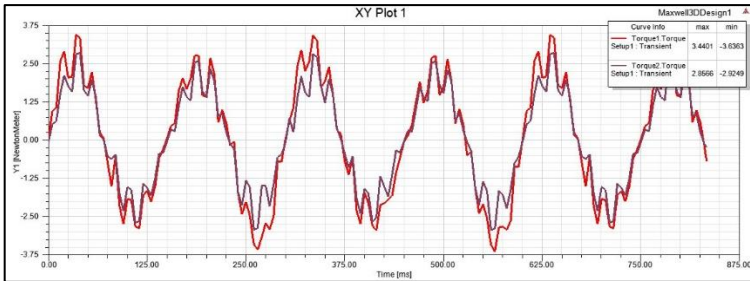
Gambar 4.13 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 0,5 mm

Gambar 4.13 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 0,5 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 5,9196 Nm dan nilai minimal sebesar -4,5439 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 3,6669 Nm dan nilai minimal sebesar -3,9777 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.



Gambar 4.14 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 1 mm

Gambar 4.14 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 1 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 4,5721 Nm dan nilai minimal sebesar -4,3621 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 3,6891 Nm dan nilai minimal sebesar -3,4960 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.



Gambar 4.15 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 2 mm

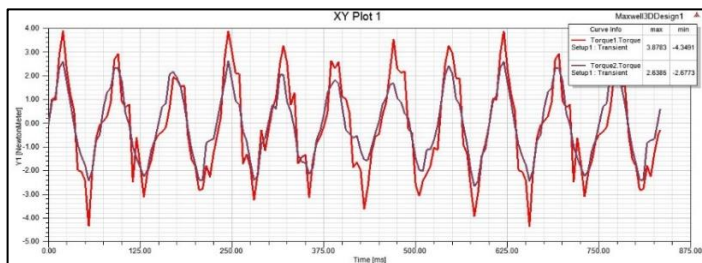
Gambar 4.15 Grafik Torsi Jumlah Magnet 8 Buah dan Celah Udara 2 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 3,4401 Nm dan nilai minimal sebesar -3,6363 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 2,8556 Nm dan nilai minimal sebesar -2,9249 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.

Dari ketiga hasil simulasi *transient* pada 120° *angular magnetic bevel gear*, torsi yang dihasilkan memiliki pola yang sama dengan *flux density* hasil simulasi *magnetostatic*. Semakin besar celah udara, maka semakin kecil nilai torsi yang dihasilkan. Hal ini terbukti dari nilai maksimal dan minimal dari tiap variasi dimana variasi celah udara sebesar 0,5 mm adalah yang terbesar

dan variasi celah udara sebesar 2 mm adalah yang terkecil. Jika dibandingkan grafik satu dengan yang lain, dapat dilihat bahwa grafik variasi celah udara sebesar 0,5 mm cenderung lebih fluktuatif dibandingkan variasi celah udara yang lain. Hal ini disebabkan oleh nilai *flux density* pada variasi celah udara sebesar 0,5 mm lebih berubah-ubah sedangkan pada variasi celah udara sebesar 1 mm, *flux density* cenderung lebih stabil dan variasi celah udara sebesar 2 mm memiliki nilai *flux density* yang paling stabil. Nilai *flux density* yang berubah-ubah dipengaruhi oleh jarak dan luas sapuan dari tiap magnet. Semakin kecil celah udara maka nilai *flux density* semakin besar. Semakin luas sapuan magnet maka nilai *flux density* semakin besar. Maka dari itu, *flux density* sangat berpengaruh pada nilai torsi yang dihasilkan. Nilai maksimal didapatkan ketika titik yang diamati berada pada magnet kutub utara sedangkan nilai minimal didapatkan ketika titik yang diamati berada pada magnet kutub selatan.

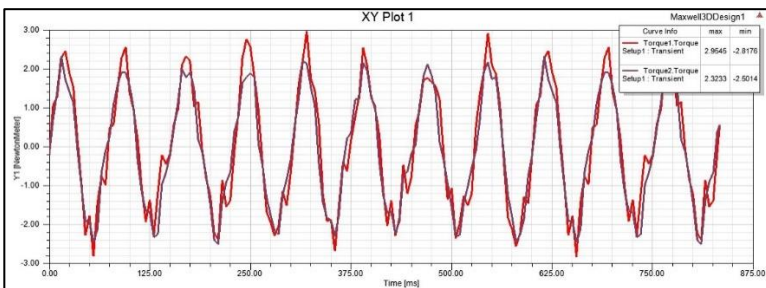
4.2.3. Hasil Simulasi *Transient* dengan Variasi Jumlah Magnet 16 Buah

Setelah simulasi *magnetostatic* selesai, dilakukan simulasi *transient*. Sama dengan simulasi *magnetostatic*, terdapat variasi celah udara pada pemodelan dengan variasi jumlah magnet sebanyak 16 buah. Variasi celah udara sebesar 0,5; 1 dan 2 mm. Nilai torsi untuk tiap variasi celah udara dapat dilihat pada gambar 4.16 – 4.18.



Gambar 4.16 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 0,5 mm

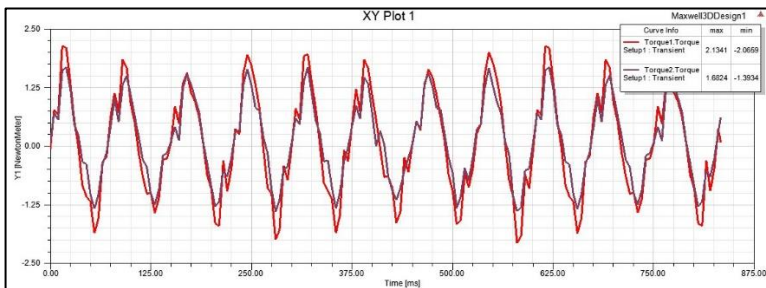
Gambar 4.16 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 0,5 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 3,8783 Nm dan nilai minimal sebesar -4,3491 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 2,6385 Nm dan nilai minimal sebesar -2,6773 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.



Gambar 4.17 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 1 mm

Gambar 4.17 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 1 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan

garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 2,9545 Nm dan nilai minimal sebesar -2,8176 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 2,3233 Nm dan nilai minimal sebesar -2,5014 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.



Gambar 4.18 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 2 mm

Gambar 4.18 Grafik Torsi Jumlah Magnet 16 Buah dan Celah Udara 2 mm, merupakan hasil simulasi *transient* 120° *angular magnetic bevel gear* dimana terdapat dua buah garis grafik. Garis grafik berwarna merah merupakan garis grafik torsi *primary gear* sedangkan garis grafik berwarna biru merupakan garis grafik torsi *secondary gear*. Kedua garis grafik memiliki pola sinusoidal. Pola sinusoidal diakibatkan pada simulasi ini hanya *primary gear* yang berputar sedangkan *secondary gear* tidak berputar. Garis grafik merah memiliki nilai maksimal sebesar 2,1341 Nm dan nilai minimal sebesar -2,0659 Nm. Nilai maksimal

torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° dari magnet kutub utara *primary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *primary gear*. Garis grafik biru memiliki nilai maksimal sebesar 1,6824 Nm dan nilai minimal sebesar -1,3934 Nm. Nilai maksimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub utara *secondary gear*. Nilai minimal torsi yang dihasilkan berada pada sudut 90° magnet kutub selatan *secondary gear*.

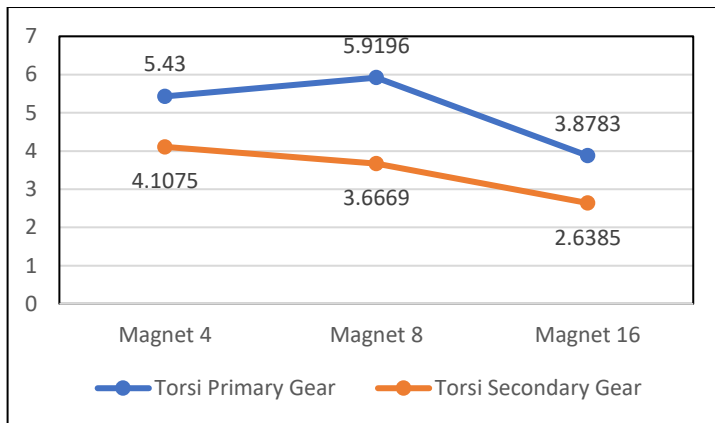
Dari ketiga hasil simulasi *transient* pada 120° *angular magnetic bevel gear*, torsi yang dihasilkan memiliki pola yang sama dengan *flux density* hasil simulasi *magnetostatic*. Semakin besar celah udara, maka semakin kecil nilai torsi yang dihasilkan. Hal ini terbukti dari nilai maksimal dan minimal dari tiap variasi dimana variasi celah udara sebesar 0,5 mm adalah yang terbesar dan variasi celah udara sebesar 2 mm adalah yang terkecil. Jika dibandingkan grafik satu dengan yang lain, dapat dilihat bahwa grafik variasi celah udara sebesar 0,5 mm cenderung lebih fluktuatif dibandingkan variasi celah udara yang lain. Hal ini disebabkan oleh nilai *flux density* pada variasi celah udara sebesar 0,5 mm lebih berubah-ubah sedangkan pada variasi celah udara sebesar 1 mm, *flux density* cenderung lebih stabil dan variasi celah udara sebesar 2 mm memiliki nilai *flux density* yang paling stabil. Nilai *flux density* yang berubah-ubah dipengaruhi oleh jarak dan luas sapuan dari tiap magnet. Semakin kecil celah udara maka nilai *flux density* semakin besar. Semakin luas sapuan magnet maka nilai *flux density* semakin besar. Maka dari itu, *flux density* sangat berpengaruh pada nilai torsi yang dihasilkan. Nilai maksimal didapatkan ketika titik yang diamati berada pada magnet kutub utara sedangkan nilai minimal didapatkan ketika titik yang diamati berada pada magnet kutub selatan.

4.3. Analisis Pengaruh Jumlah Magnet dan Celah Udara terhadap Torsi dan Efisiensi

Setelah mendapatkan hasil dari simulasi *magnetostatic* dan *transient*, dilakukan analisis pengaruh jumlah magnet dengan

membandingkan nilai torsi maksimal *primary* dan *secondary gear* tiap variasi jumlah magnet pada variasi celah udara yang sama. Dari perbandingan tersebut, akan didapatkan variasi jumlah magnet dan celah udara yang menghasilkan torsi terbesar dengan efisiensi yang baik.

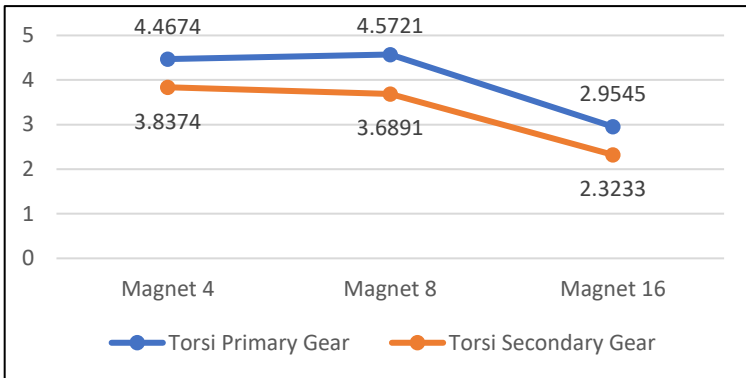
Dari hasil simulasi *transient*, didapatkan grafik torsi dengan torsi maksimal *primary* dan *secondary gear* dari tiap variasi. Kemudian, nilai torsi dari tiap variasi jumlah magnet pada celah udara sebesar 0,5 mm dibandingkan menggunakan grafik pada gambar 4.19 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 0,5 mm.



Gambar 4.19 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 0,5 mm

Jumlah magnet 8 buah memiliki torsi *primary gear* terbesar dengan nilai 5,9196 Nm, kemudian diikuti jumlah magnet 4 buah dengan nilai 5,4300 Nm dan jumlah magnet 16 buah dengan nilai 3,8783 Nm. Sedangkan untuk torsi *secondary gear*, jumlah magnet 4 buah memiliki torsi terbesar dengan nilai 4,1075 Nm kemudian diikuti jumlah magnet 8 buah dengan nilai 3,6669 Nm dan jumlah magnet 16 buah dengan nilai 2,6385 Nm.

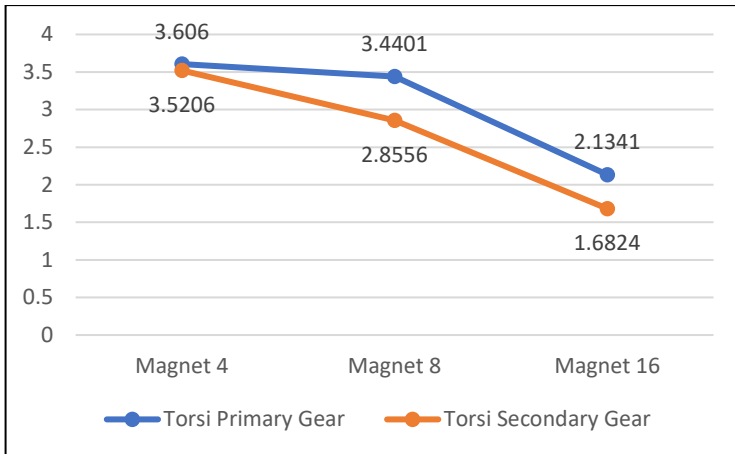
Selanjutnya, nilai torsi tiap variasi jumlah magnet pada celah udara sebesar 1 mm dibandingkan menggunakan grafik pada gambar 4.20 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 1 mm.



Gambar 4.20 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 1 mm

Jumlah magnet 8 buah memiliki torsi *primary gear* terbesar dengan nilai 4,5721 Nm, kemudian diikuti jumlah magnet 4 buah dengan nilai 4,4674 Nm dan jumlah magnet 16 buah dengan nilai 2,9545 Nm. Sedangkan untuk torsi *secondary gear*, jumlah magnet 4 buah memiliki torsi terbesar dengan nilai 3,8374 Nm kemudian diikuti jumlah magnet 8 buah dengan nilai 3,6891 Nm dan jumlah magnet 16 buah dengan nilai 2,3233 Nm.

Selanjutnya, nilai torsi tiap variasi jumlah magnet pada celah udara sebesar 2 mm dibandingkan menggunakan grafik pada gambar 4.21 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 2 mm.



Gambar 4.21 Grafik Perbandingan Torsi pada Celah Udara 2 mm

Jumlah magnet 4 buah memiliki torsi *primary gear* terbesar dengan nilai 3,6860 Nm, kemudian diikuti jumlah magnet 8 buah dengan nilai 3,4401 Nm dan jumlah magnet 16 buah dengan nilai 2,1341 Nm. Sedangkan untuk torsi *secondary gear*, jumlah magnet 4 buah memiliki torsi terbesar dengan nilai 3,5206 Nm kemudian diikuti jumlah magnet 8 buah dengan nilai 2,8556 Nm dan jumlah magnet 16 buah dengan nilai 1,6824 Nm.

Dari perbandingan yang telah dilakukan, torsi *primary gear* terbesar dihasilkan dengan jumlah magnet 8 buah pada celah udara 0,5 mm yang memiliki nilai 5,9196 Nm sedangkan torsi *secondary gear* terbesar dihasilkan dengan jumlah magnet 4 buah pada celah udara 0,5 mm yang memiliki nilai 4,1075 Nm. Dengan hasil tersebut, celah udara sebesar 0,5 mm memiliki pengaruh paling baik terhadap *flux density* karena nilai magnetisasi yang lebih besar akibat jarak yang lebih dekat dibandingkan variasi celah udara yang lain. *Flux density* yang lebih besar dapat menghasilkan torsi yang lebih besar. Namun terdapat kekurangan yang terjadi akibat dari celah udara yang kecil, yaitu *flux density* yang lebih banyak dan lebih beragam sehingga torsi yang

dihasilkan menjadi fluktuatif. Hal ini disebabkan permukaan yang mengalami magnetisasi lebih banyak karena jarak yang lebih dekat.

Berdasarkan perbandingan yang telah dilakukan, torsi *primary gear* terbesar didapatkan dengan menggunakan magnet 8 buah. Hal ini didukung dengan data dimana jumlah magnet 8 buah menghasilkan torsi *primary gear* terbesar pada celah udara 0,5 dan 1 mm. Untuk torsi pada *secondary gear*, torsi terbesar dihasilkan dengan menggunakan magnet 4 buah. Untuk mengetahui jumlah magnet yang menghasilkan torsi terbaik, dilakukan perhitungan efisiensi dengan membandingkan torsi maksimal pada *secondary gear* dengan *primary gear*. Hasil perhitungan terdapat pada tabel 4.1 Tabel Perhitungan Efisiensi 120° *Angular Magnetic Bevel Gear*.

Tabel 4.1 Perhitungan Efisiensi 120° *Angular Magnetic Bevel Gear*

No.	Jumlah Magnet (buah)	Celah Udara (mm)	Torsi <i>Primary Gear</i> (Nm)	Torsi <i>Secondary Gear</i> (Nm)	Efisiensi (%)
1.	4	0,5	5,4300	4,1705	76,81
2.		1	4,4674	3,8374	85,89
3.		2	3,6860	3,5206	95,51
4.	8	0,5	5,9196	3,6669	61,95
5.		1	4,5721	3,6891	80,69
6.		2	3,4401	2,8556	83,00
7.	16	0,5	3,8783	2,6385	68,03
8.		1	2,9545	2,3233	78,64
9.		2	2,1341	1,6824	78,83

Berdasarkan perhitungan efisiensi yang telah dilakukan, variasi jumlah magnet 4 buah memiliki rata-rata efisiensi yang paling besar, yaitu 86,07 %. Hal ini menunjukkan bahwa jumlah magnet 4 buah merupakan jumlah magnet yang paling baik

dibandingkan variasi jumlah magnet yang lain. Meskipun torsi maksimal pada *primary gear* tidak sebesar variasi jumlah magnet 8 buah, torsi pada *secondary gear* terbesar dihasilkan oleh variasi jumlah magnet 4 buah. Hal ini dikarenakan luas sapuan yang paling besar sehingga *slip* yang terjadi tidak terlalu besar ketika diputar pada kecepatan sudut 100 rpm. Pernyataan sebelum ini diperkuat dengan rumus torsi pada persamaan 2.8-2.10 dimana jumlah magnet mempengaruhi besar torsi yang dihasilkan. Pada persamaan 2.8-2.10, jumlah magnet memiliki pengaruh pada luas sapuan dari tiap magnet. Luas sapuan memiliki pengaruh terhadap besar sudut ϕ_{edge} . Dari variasi jumlah magnet yang ditentukan, variasi jumlah magnet 4 buah memiliki luas sapuan yang paling maksimal dalam menghasilkan torsi. Namun terdapat kekurangan yaitu, grafik torsi yang lebih fluktuatif akibat luas sapuan yang lebih besar mengakibatkan *flux density* yang dihasilkan lebih banyak dan bervariasi karena magnetisasi yang terjadi lebih banyak. Berdasarkan efisiensi, celah udara sebesar 2 mm memiliki rata-rata efisiensi yang lebih baik yaitu sebesar 85,78%. Karena nilai torsi yang ditransmisikan lebih kecil dibandingkan variasi celah udara yang lain, celah udara sebesar 2 mm tidak menjadi konfigurasi terbaik untuk 120° *angular magnetic bevel gear*.

4.4. Perbandingan Angular Magnetic Bevel Gear dengan Mechanical Angular Miter Gear

Setelah melakukan simulasi, dapat diketahui torsi yang dapat disalurkan oleh 120° *angular magnetic bevel gear* dengan konfigurasi jumlah magnet 4 buah dan celah udara 0,5 mm. Hasil torsi pada *primary gear* sebesar 5,4300 Nm dan torsi pada *secondary gear* sebesar 4,1705 Nm dengan efisiensi 76,81%. Produk dari Kohara Gear Industry Co., Ltd. yaitu *angular miter gear* SAM3-20120 memiliki spesifikasi sebagaimana tertera pada gambar 3.2 Spesifikasi SAM3-20120. Dapat diketahui bahwa SAM3-20120 memiliki *pressure angle* sebesar 20°, material yang digunakan S45C, *tooth hardness* di bawah 194 HB dan modul sebesar 3. Dengan spesifikasi tersebut, SAM3-20120 mampu

menyalurkan torsi sebesar 19,4 Nm tanpa melebihi batas *bending strength*. Maka dari itu, desain dari 120° *angular magnetic bevel gear* tidak mampu bersaing dengan *mechanical gear* produk dari Kohara Gear Industry Co., Ltd. yaitu SAM3-20120.

Untuk bersaing dengan *mechanical gear* perlu dilakukan beberapa perubahan pada spesifikasi *mechanical gear*. Pada pembahasan ini, spesifikasi yang dirubah hanya material dan modul dari SAM3-20120. Maka dari itu, dilakukan perhitungan sebagai berikut.

$$W^t = \frac{2T}{d_{av}} \quad (4.1)$$

dimana W^t : gaya tangensial *gear* (N)
 T : torsi (Nm)
 d_{av} : *pitch diameter* (m)

Kemudian, dilakukan perhitungan *bending stress number* (S_t) dengan persamaan 4.2.

$$S_t = \sigma = \frac{W^t}{F m} K_o K_v \frac{K_s K_m}{K_x J} \quad (4.2)$$

dimana S_t : *bending stress number* (MPa)
 W^t : gaya tangensial *gear* (N)
 F : *net face width* (mm)
 m : modul (mm)
 K_o : *overload factor*
 K_v : *dynamic factor*
 K_s : *size factor for bending*
 K_m : *load distribution factor*
 K_x : *lengthwise curvature factor for bending strength*
 J : *bending strength geometry factor*

Kemudian, dilakukan perhitungan *gear bending strength* dengan menggunakan persamaan 4.3.

$$S_{wt} = \sigma_{all} = \frac{S_{at}K_L}{S_F K_T K_R} \quad (4.3)$$

dimana

- S_{wt} : *permissible bending stress number* (MPa)
- S_{at} : *bending stress number (allowable)* (MPa)
- K_L : *stress-cycle factor for bending strength*
- S_F : *safety factor*
- K_T : *temperature factor*
- K_R : *reliability factor*

Kemudian nilai S_t dengan S_{wt} dibandingkan agar diketahui apakah desain *gear* sudah tepat. Nilai S_t harus lebih kecil dari S_{wt} agar desain *gear* aman untuk digunakan. Untuk perubahan yang dilakukan, parameter yang berubah hanya modul dan material. Perbandingan antara SAM3-20120 standar dengan SAM3-20120 yang sudah dimodifikasi terdapat pada tabel 4.2 Perbandingan SAM3-20120 *Standard* dengan *Down-Grade*. Perhitungan *mechanical gear* yang standar adalah sebagai berikut:

$$W^t = \frac{2T}{d_{av}}$$

$$W^t = \frac{2(19,4)}{0,055}$$

$$W^t = 705,455 \text{ Nm}$$

$$S_t = \sigma = \frac{W^t}{F m} K_o K_v \frac{K_s K_m}{K_x J}$$

$$S_t = \sigma = \frac{705,455}{10 \times 3} K_1$$

$$S_t = \sigma = 23,515 K_1 \text{ MPa}$$

$$S_{wt} = \sigma_{all} = \frac{S_{at} K_L}{S_F K_T K_R}$$

$$S_{wt} = \sigma_{all} = 62,48 K_2 \text{ MPa}$$

$$S_{wt} > S_t \text{ (aman)}$$

Tabel 4.2 Perbandingan SAM3-20120 *Standard* dengan *Down-Grade* Bagian I

SAM3-20120	Material JIS	S_{wt} (MPa)	S_t (MPa)	S_{wt} /S_t Ratio
<i>Standard</i>	S45C	62,48 K ₂	23,515 K ₁	2,657
<i>Down-Grade</i>	SUS303	56,48 K ₂	21,257 K ₁	2,657

(lanjutan) **Tabel 4.2** Perbandingan SAM3-20120 *Standard* dengan *Down-Grade* Bagian II

SAM3-20120	Modul (mm)	W^t (N)	d_{av} (m)	T (Nm)
<i>Standard</i>	3	705,455	0,055	19,4
<i>Down-Grade</i>	1	212,568	0,055	5,9

K₁ adalah konstanta pada persamaan 4.2 yang bernilai sama antara SAM3-20120 standar dengan yang sudah dimodifikasi sedangkan

K_2 adalah konstanta pada persamaan 4.3 yang bernilai sama antara SAM3-20120 standar dengan yang sudah dimodifikasi. Dapat dilihat bahwa dengan perubahan modul yang lebih kecil dan material yang lebih rendah, 120° *angular magnetic gear* masih belum bisa bersaing dengan *mechanical gear*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pengaruh jumlah magnet terhadap karakteristik torsi adalah jumlah magnet permanen meningkat sebesar 100%, torsi menurun sebesar 12,08%. Jumlah magnet permanen meningkat sebesar 300%, torsi menurun sebesar 36,73%. Pada desain yang telah dibuat, variasi jumlah magnet 4 buah merupakan jumlah magnet paling optimal karena memiliki luas sapuan terbesar dengan rata-rata efisiensi sebesar 86,07 % dan torsi maksimal *primary gear* sebesar 5,4300 Nm dan torsi maksimal *secondary gear* sebesar 4,1705 Nm.
2. Pengaruh celah udara terhadap karakteristik torsi adalah celah udara meningkat 100%, torsi menurun sebesar 7,99%. Celah udara meningkat sebesar 300%, torsi menurun sebesar 15,58%. Hal ini disebabkan oleh *flux density* yang lebih besar akibat jarak magnetisasi yang lebih dekat. Pada desain yang telah dibuat, variasi celah udara sebesar 0,5 mm merupakan celah udara paling optimal dengan torsi maksimal *primary gear* sebesar 5,9196 Nm dan torsi maksimal *secondary gear* sebesar 4,1705 Nm.
3. 120° *angular magnetic bevel gear* memiliki efisiensi dimana efisiensi terbaik didapatkan pada jumlah magnet 4 buah dan celah udara 2 mm. Rata-rata efisiensi dengan jumlah magnet 4 buah sebesar 86,07% dan rata-rata efisiensi dengan celah udara sebesar 2 mm sebesar 85,78%.

5.2. Saran

Hasil simulasi ini merupakan sarana pendukung dalam pengembangan teknologi *magnetic gear* sebagai salah satu alternatif penyalur daya dengan efisiensi yang cukup tinggi, perawatan yang lebih sedikit dan kemungkinan kegagalan akibat *tegangan bending* dan *shear* yang lebih kecil. Adapun beberapa saran dari hasil penelitian ini yaitu:

1. Perlu dilakukan penelitian mengenai demagnetisasi yang terjadi akibat celah udara yang kecil.
2. Perlu dilakukan penelitian mengenai tegangan *bending* dan *shear* yang terjadi akibat gaya tarik menarik dan tolak menolak magnet permanen.
3. Pengoptimalan torsi yang disalurkan dengan melakukan perubahan seperti geometri, jenis magnet permanen, pola penyusunan magnet permanen, dsb.

DAFTAR PUSTAKA

- Ansoft Co. 2005. *Ansoft Maxwell 3D Electromagnetic and Electromechanical Analysis*. Pittsburgh: Ansoft Corporation.
- Budynas, R. G. 2008. *Shigley's Mechanical Engineering Design 9th Edition*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Hamidizadeh, S. 2016. *Study of Magnetic Properties and Demagnetization Models of Permanent Magnets for Electric Vehicles Application*. Montréal: Department of Mining and Materials Engineering, McGill University.
- Joergensen, F. T. 2010. *Design and Construction of Permanent Magnetic Gears*. Denmark: Department of Energy Technology, Aalborg University.
- Maitra, G.M. 2001. *Hand Book of Gear Design Second Edition*. New Delhi: Tata McGrawHill
- Muruganandam, G. 2013. *Design and Implementation of a Novel Magnetic Bevel Gear*. Tamilnadu: Department of Electrical and Electronics Engineering, Sona College of Technology.
- Virjoghe, E. O. 2012. *Finite Element Analysis of Stationary Magnetic Field*. Romania: Valahia University of Targoviste.
- Wibowo, P. P. 2017. *Pemodelan dan Analisis Berdasarkan Studi Eksperimental Pengaruh Modifikasi Profil Gigi terhadap Karakteristik Dinamik pada Involute Spur Gear*. Surabaya: Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wu, Y.C. 2015. *Transmitted Torque Analysis of a Magnetic Gear Mechanism with Rectangular Magnets*. Taiwan: Department of Mechanical Engineering, National Yunlin University of Science & Technology.

BIODATA PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Hafiz Yogastyawan. Lahir di Gresik pada tanggal 5 Mei 1996. Merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Muhammad Ikhwan dan Yuni Setyaningrum. Riwayat pendidikan penulis diawali di TK PIKPG (2000-2002). Kemudian, melanjutkan pendidikan di SD Muhammadiyah GKB (2002-2008). Selanjutnya, pendidikan dilanjutkan di SMP Negeri 1 Gresik pada tahun 2008-2011. Pada tahun 2011-2014, penulis menempuh pendidikan di SMA Negeri 1 Gresik. Penulis melanjutkan pendidikan S-1 di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis aktif dalam kegiatan akademis dan kemahasiswaan. Dalam kegiatan kemahasiswaan, penulis menjadi *staff* Divisi Organisasi Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin (LBMM) ITS. Kemudian, menjadi Ketua Divisi Organisasi LBMM ITS.

Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui *email* hafiz.yogastyawan@gmail.com.